

# La Relatività di Einstein



*Associazione*  
**UNIVERSITA'**  
**DEL TEMPO LIBERO**  
**DI CARAVAGGIO** *aps*



*G. Battistoni*  
*INFN Milano*

# Cosa intendiamo per relatività?

Il concetto di **relatività** è collegato alla misurazione di eventi: dove e quando essi accadono e quanto distano tra loro nello spazio e nel tempo.

Trasformazioni di misure tra osservatori **in moto relativo tra loro** (da qui il nome di **relatività**)

# GALILEO: la prima formulazione del concetto di **relatività**



enunciò l'equivalenza tra due sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro

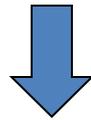
Le leggi che descrivono il moto dei corpi restano sempre le stesse, sia che il sistema di riferimento sia in quiete, sia che si muova di **moto rettilineo uniforme**



**sistemi di riferimento "Inerziali"**

# Sistemi di riferimento inerziali

- Si definisce **inerziale** un sistema di riferimento in moto con velocità costante rispetto alle stelle fisse
- La terra non obbedisce esattamente a questa condizione, ma la deviazione è molto piccola e può essere considerata trascurabile
- **Le leggi della Meccanica sono le stesse in tutti i riferimenti inerziali**



**Quindi il movimento della Terra non influenza l'esito degli esperimenti**

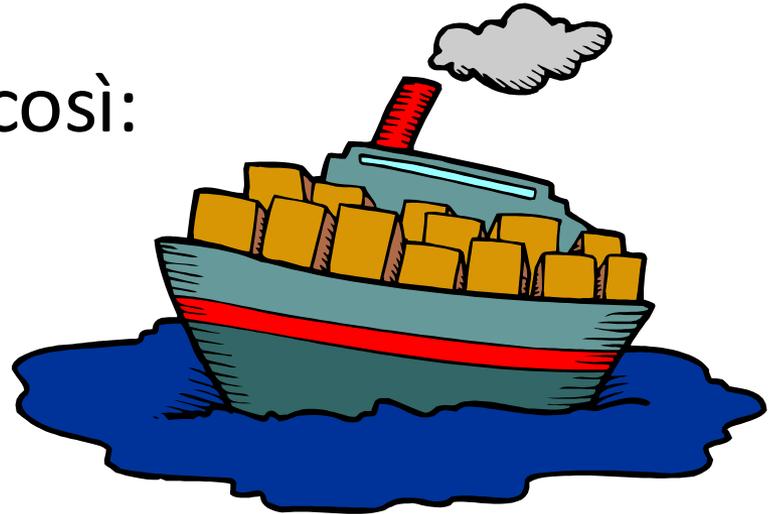
# Gli avversari di Galileo ribattevano:



“Se la Terra realmente si muovesse, facendo cadere una pietra da una torre, la pietra non cadrebbe esattamente giù, perché nel frattempo la Terra sotto la pietra dovrebbe essersi spostata”

## Da Gaileo in poi rispondiamo così:

“Se all’ interno di una barca in movimento facciamo cadere una pietra questa cadrà esattamente in verticale rispetto al punto da cui la lasciamo cadere”



# LE TRASFORMAZIONI DI GALILEO

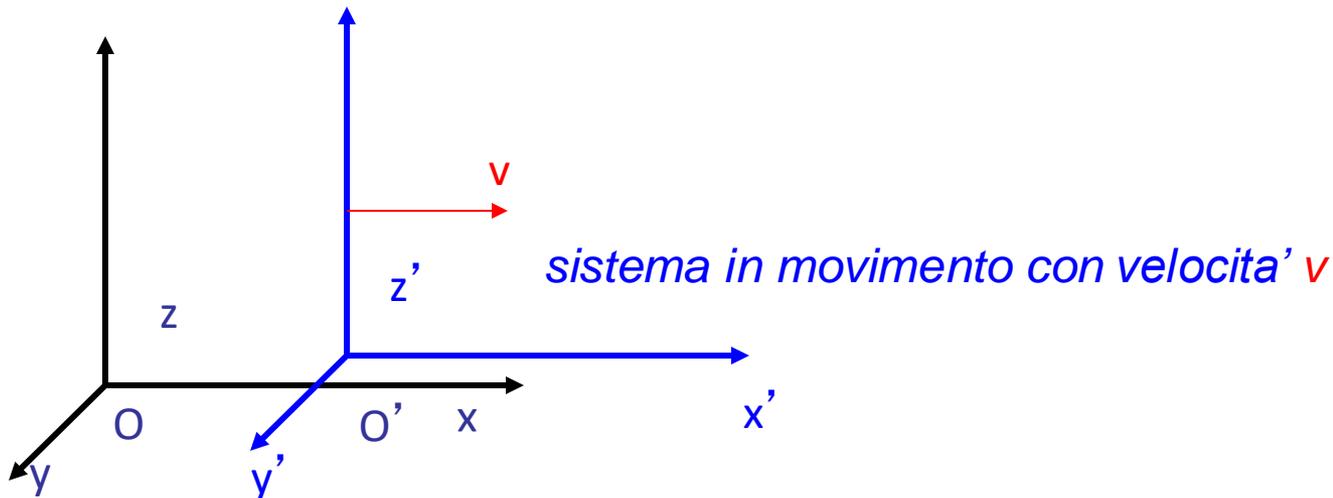
## “Evento”:

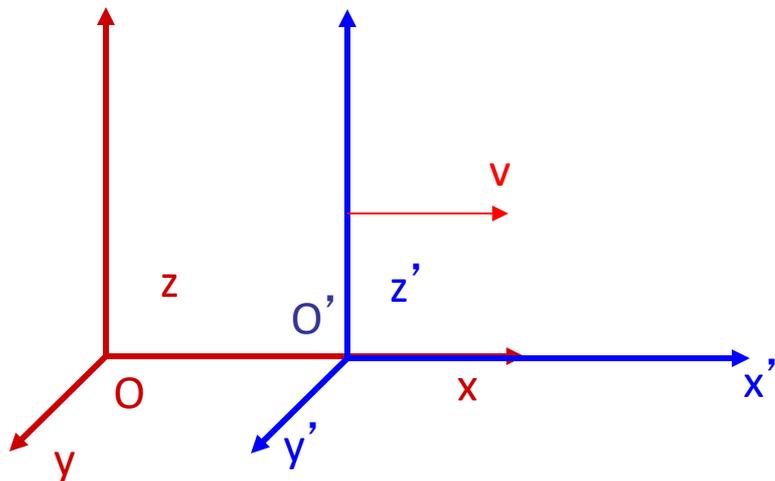
qualcosa che accade in un certo punto, ad un certo tempo

Per descrivere un evento usiamo 4 numeri:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$  che chiamiamo coordinate spazio temporali.

Consideriamo ora due sistemi di riferimento:

1. Uno fermo che chiameremo  $O$ ,
2. l'altro si muove con velocità  $v$  costante che chiameremo  $O'$





In P si verifica un evento ed un osservatore S misurerà la posizione e l'istante in cui avviene l'evento assegnando coordinate  $x, y, z, t$

Un osservatore S' in movimento con velocità  $v$  rispetto a S assegnerà coordinate  $x', y', z', t'$

*Le equazioni che mettono in relazione le coordinate spazio-temporali di uno stesso evento nei due sistemi di riferimento sono:*

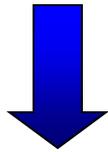
$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Nella relatività galileiana:



Il problema del tempo assoluto non venne mai messo in discussione



Il problema della simultaneità di due eventi lontani non venne mai messo in discussione

**Da ricordare:**

**Nella fisica classica Spazio, Tempo, Massa sono assoluti: hanno lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento**

# Da dove si parte: la fisica alla fine del 1800

1. **La Meccanica** di Newton e Lagrange: ritenute di portata universale e assolutamente valide per la descrizione di tutti i corpi estesi
2. **La Termodinamica**
3. **Le Equazioni di Maxwell**: sintesi di tutto ciò che si conosce sull'elettromagnetismo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$



Da esse scaturisce che la luce è **radiazione elettromagnetica**  
Fenomeno ondulatorio a tutti gli effetti

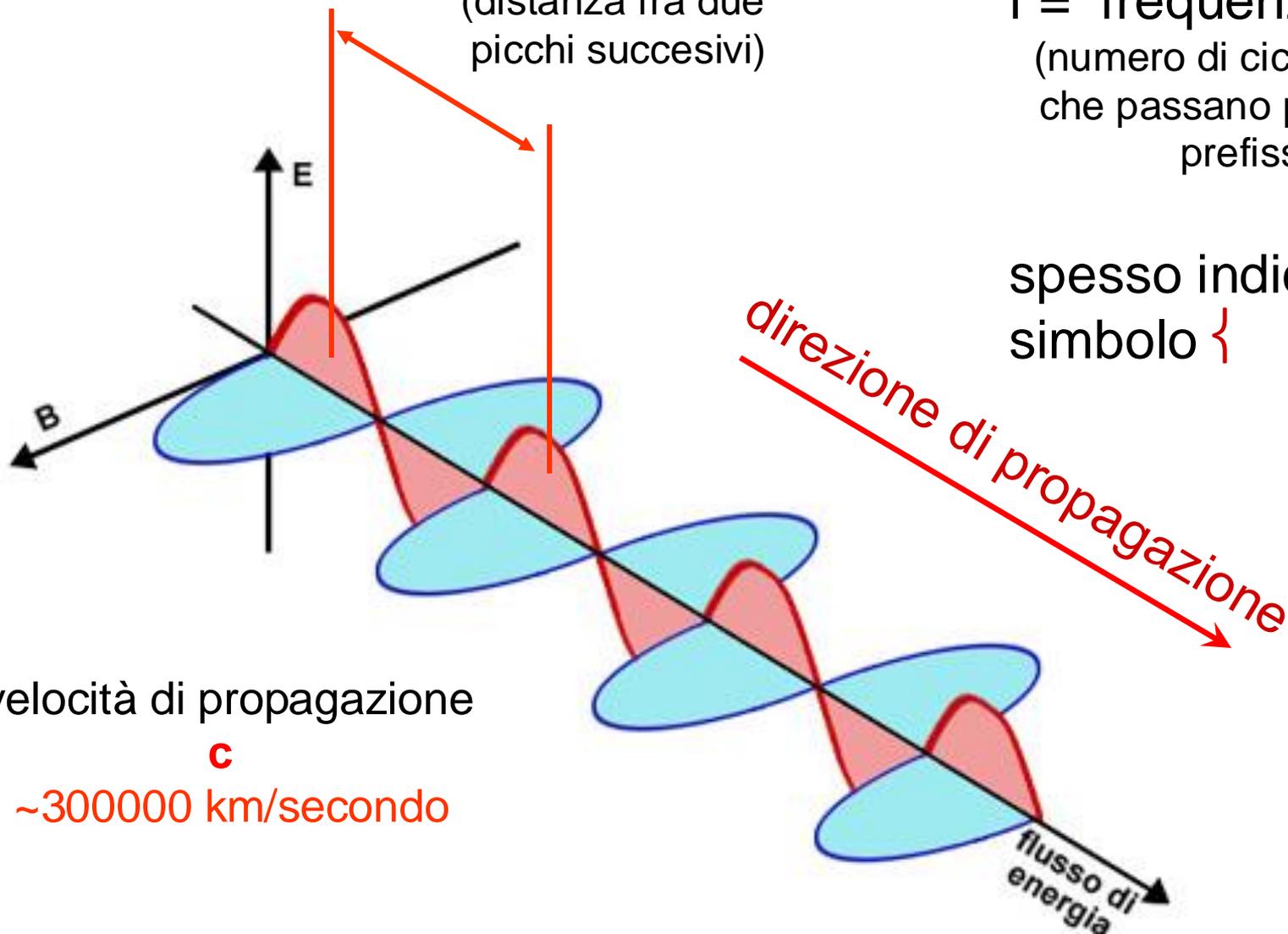
# La propagazione della luce

$\lambda$  = lunghezza d'onda

(distanza fra due picchi successivi)

$f$  = frequenza =  $c/\lambda$   
(numero di cicli al secondo che passano per un punto prefissato)

spesso indicata con il simbolo  $\nu$



velocità di propagazione

**c**

~300000 km/secondo

## Nasce un problema: “l'etere”

Nella fisica dell'epoca si pensava che i **movimenti ondulatori dovevano propagarsi in qualche elemento: le onde del mare si propagavano attraverso l'acqua, le onde sonore attraverso l'aria.**

Visto che le onde elettromagnetiche non potevano propagarsi nel vuoto, si vide bene di teorizzare l'esistenza di una sostanza che permettesse di trasportare le onde elettromagnetiche.

questo elemento fu chiamato **etere luminifico**, o semplicemente, **etere** (*il termine fu preso in prestito da Aristotele*)

# Caratteristiche dell'etere

## Trasparenza Rigidità Leggerezza Onnipresenza

- I fisici pensavano che ogni corpo che si muovesse nell'universo producesse un vento (vento d'etere) che si muoveva alla stessa velocità del corpo in movimento ma con direzione opposta.
- Per esempio, la Terra si muove nell'universo a  $\sim 30$  Km/s perciò ci dovrebbe essere un vento a  $\sim 30$  Km/s che spazzerebbe la Terra in direzione opposta al proprio cammino.
- Ovviamente qualsiasi cosa è influenzata dal vento, compresa la luce.

# Michelson e Morley

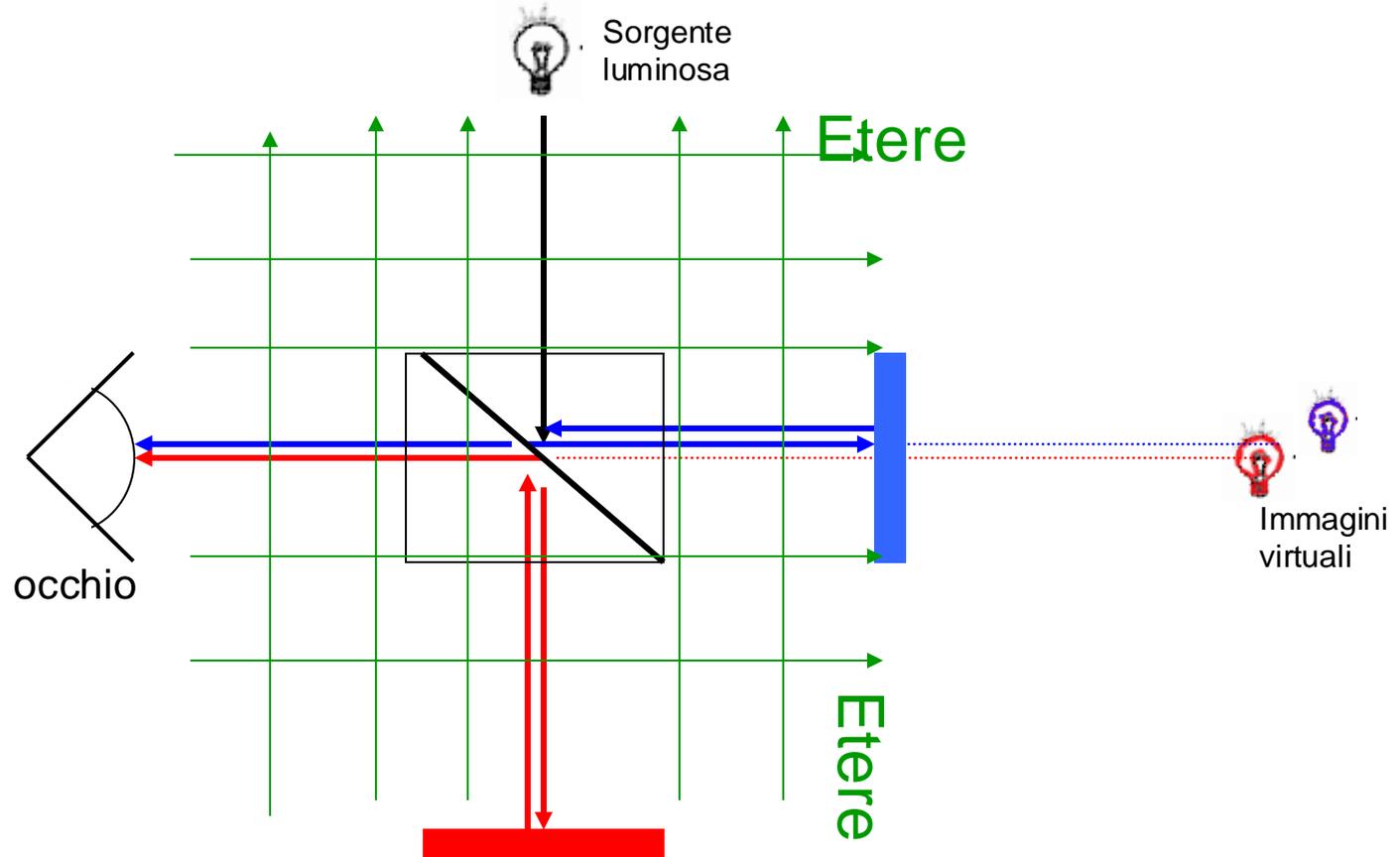
Albert Abhram Michelson, decise di provare a misurare la velocità della luce per vedere se si trovava traccia del vento d'etere.

Si mise in contatto con Eduard Morley, che offrì il suo seminterrato per l'esperimento.

Correva l'anno 1887.



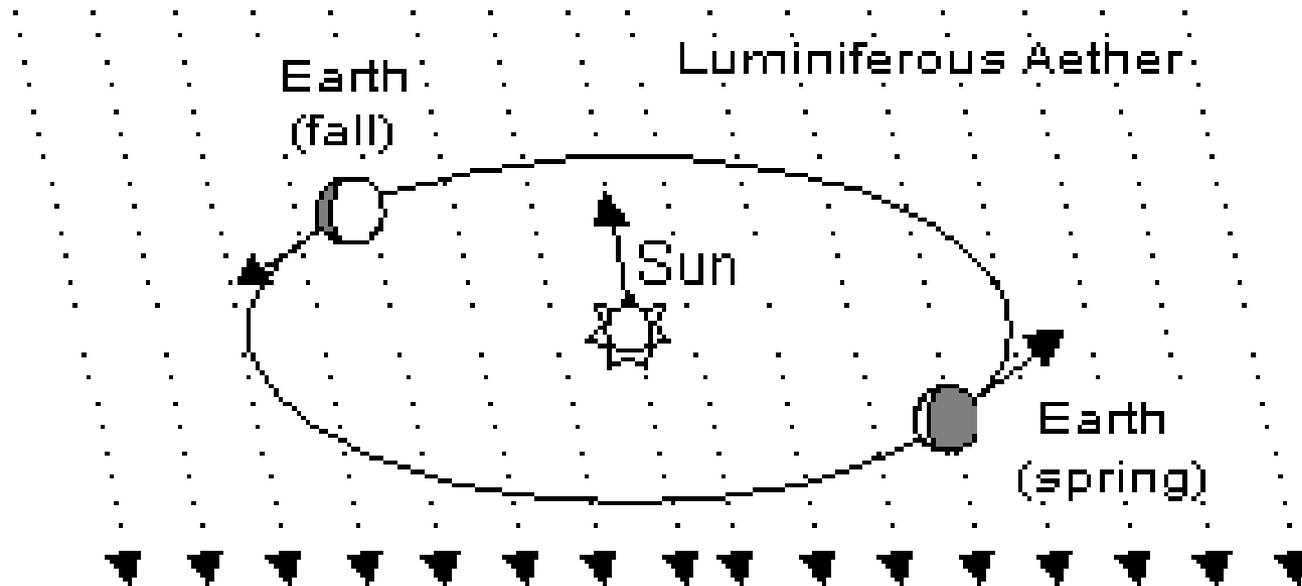
# Schema dell'esperimento di Michelson



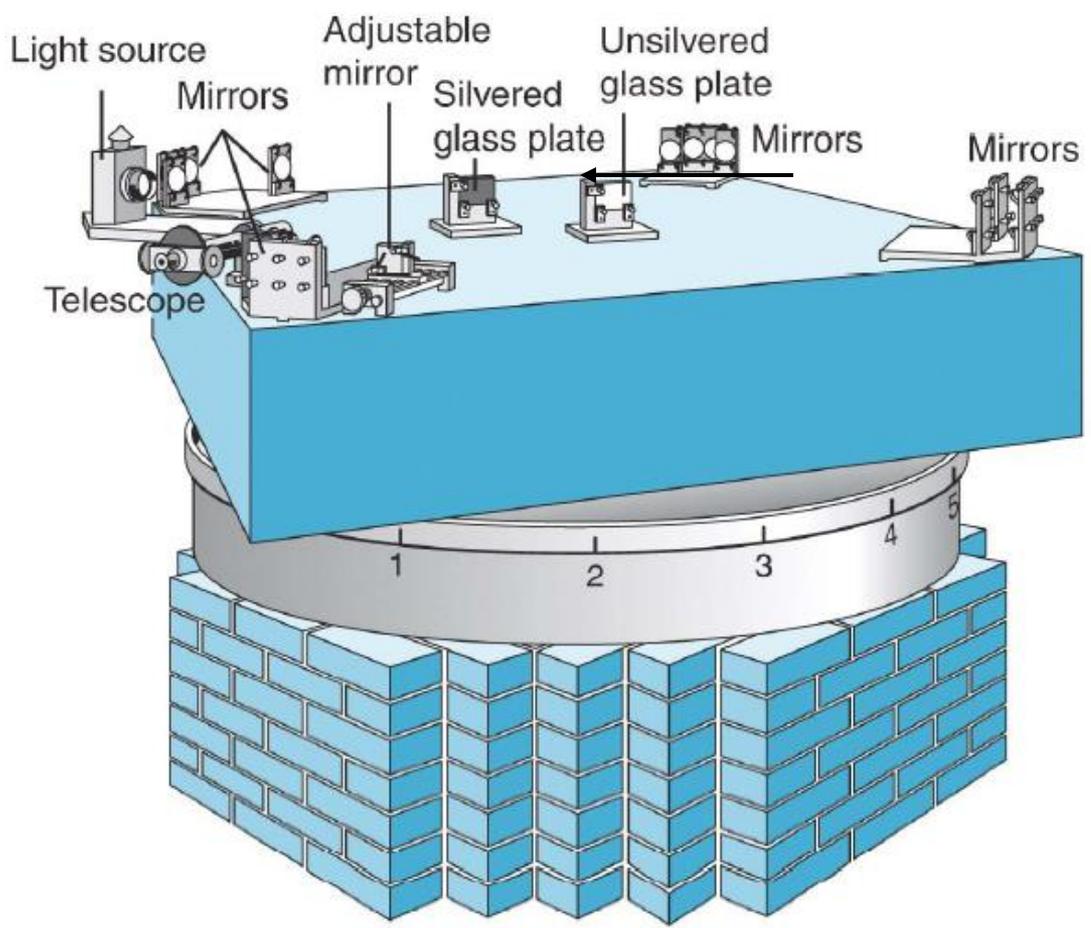
## Interferometro:

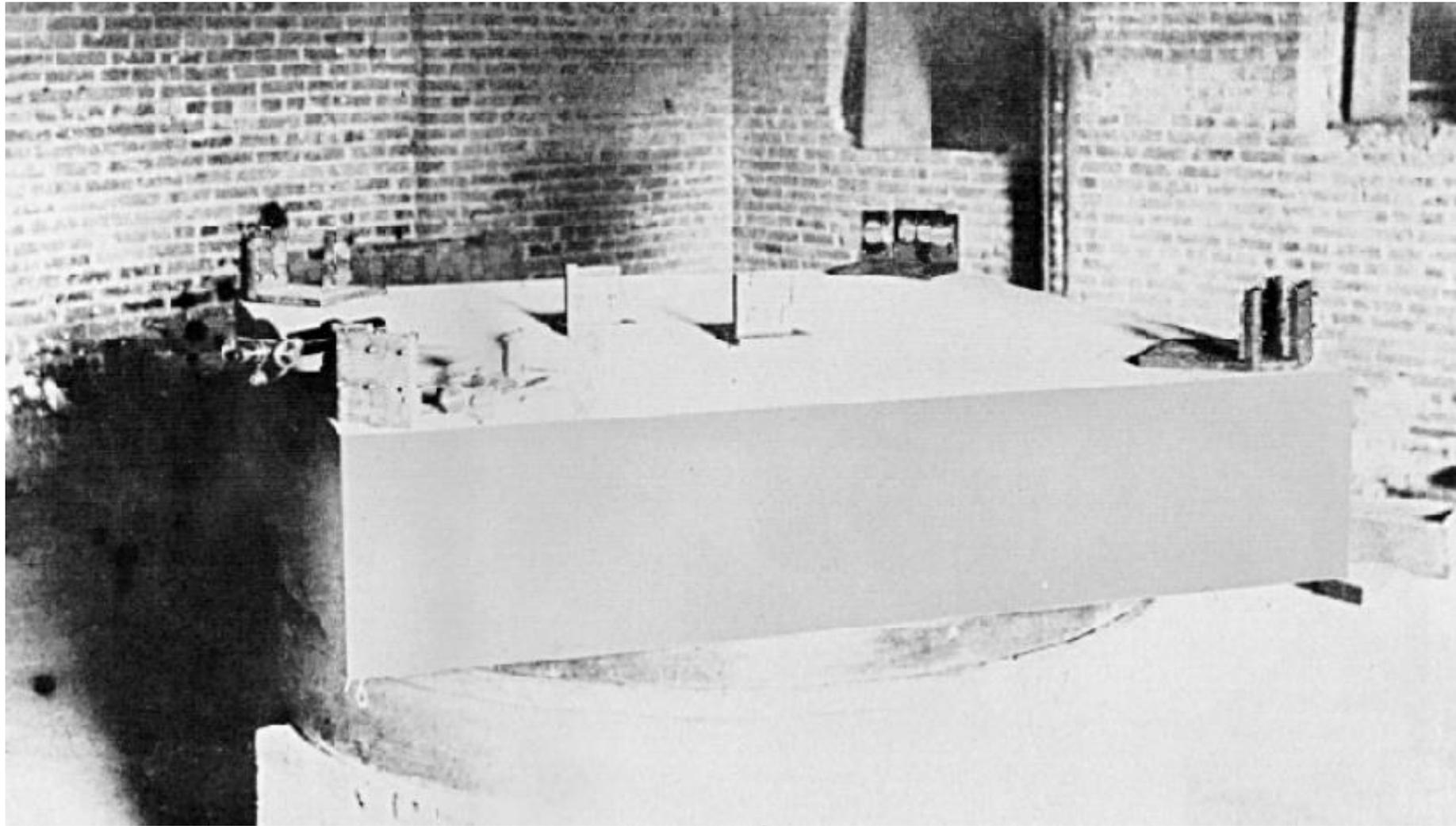
un sistema di specchi inviava il raggio di luce che percorreva due cammini di uguale lunghezza, ma posti in direzione rispettivamente parallela e perpendicolare al moto della Terra.

L'interferometro di Michelson era direttamente connesso con la Terra, perciò se noi immaginiamo che l'etere sia fisso rispetto al sole, la Terra (e con essa pure l'interferometro) si muove nell'etere con una velocità pari a  $\sim 30$  Km/s in direzioni diverse a seconda delle stagioni.



Se c'è un moto relativo rispetto all'etere, allora i tempi di percorrenza dei due cammini sono differenti





Il risultato dell'esperimento di Michelson e Morley fu che la velocità della Terra rispetto all'etere era nulla in qualsiasi periodo dell'anno, confutando l'esistenza del mezzo cosmico ipotizzato.

**Il vento d'etere non esiste!**

**la velocità della luce è indipendente  
dal moto della sorgente e  
dell'osservatore**

**Questa è l'ipotesi da cui partirà  
Einstein per sviluppare la nuova teoria  
della relatività.**



Hendrik Antoon Lorentz  
(1853-1928)  
Nobel 1902

H.A.Lorentz introduce nel 1892 un paio di ipotesi per spiegare il risultato negativo degli esperimenti di Michelson e Morley:

- 1) qualsiasi corpo subisce una contrazione nella direzione del moto relativo all'etere stazionario di un fattore pari a

$$\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

contrazione di Fitzgerald

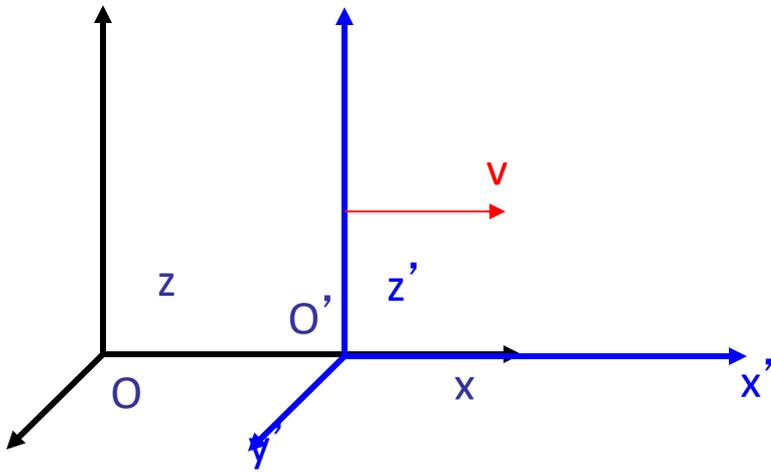
- 1) l'idea di tempo locale

- Nel 1904 Lorentz osservò che le equazioni di Maxwell non sono invarianti per trasformazioni galileiane,
- Basandosi sulla contrazione di Fitzgerald e sul concetto di tempo locale ricava le "trasformazioni di Lorentz"
- si introducono importanti modifiche alle trasformazioni di Galileo (*ma se la velocità relativa è molto piccola rispetto alla velocità della luce, si riottengono le trasformazioni di Galileo*).

# Le trasformazioni di

## Galileo

## Lorentz



$$x' = x - vt$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

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

# Albert Einstein

**Albert Einstein** nacque il 14 Marzo 1879 a Ulm, in Germania.

Suo padre era propr  
industria elettrochin

A causa di un fallime  
fu costretto a trasfer  
Munich poi a Milanc

Albert era affascinat  
scienze, materie che

Dal 1902 egli divenne un esaminatore ufficiale  
all'ufficio brevetti di Berna dove lavorò per  
sette anni



I genitori

# Anno 1905

L'anno 1905 fu un grande momento per la scienza; infatti Einstein pubblicò, a soli 26 anni, quattro articoli sul giornale *Annalen Der Physik*, articoli che avrebbero alterato il corso della scienza del XX Sec.

Il primo articolo trattava la teoria quantistica della luce:

***Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.*** (Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce)

18 marzo 1905

Il secondo trattava dei casuali cambiamenti termici nelle molecole, chiamati Browniani:

***Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.*** (Sul moto di particelle in sospensione in un fluido in quiete, come previsto dalla teoria cinetico-molecolare del calore)

11 maggio 1905

# Terzo articolo: proposta della Relatività Speciale

30 giugno 1905

*Zur Elektrodynamik bewegter Körper.*

(Elettrodinamica dei corpi in movimento)

- ***1° Postulato della relatività:***

Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Non esiste un sistema di riferimento privilegiato

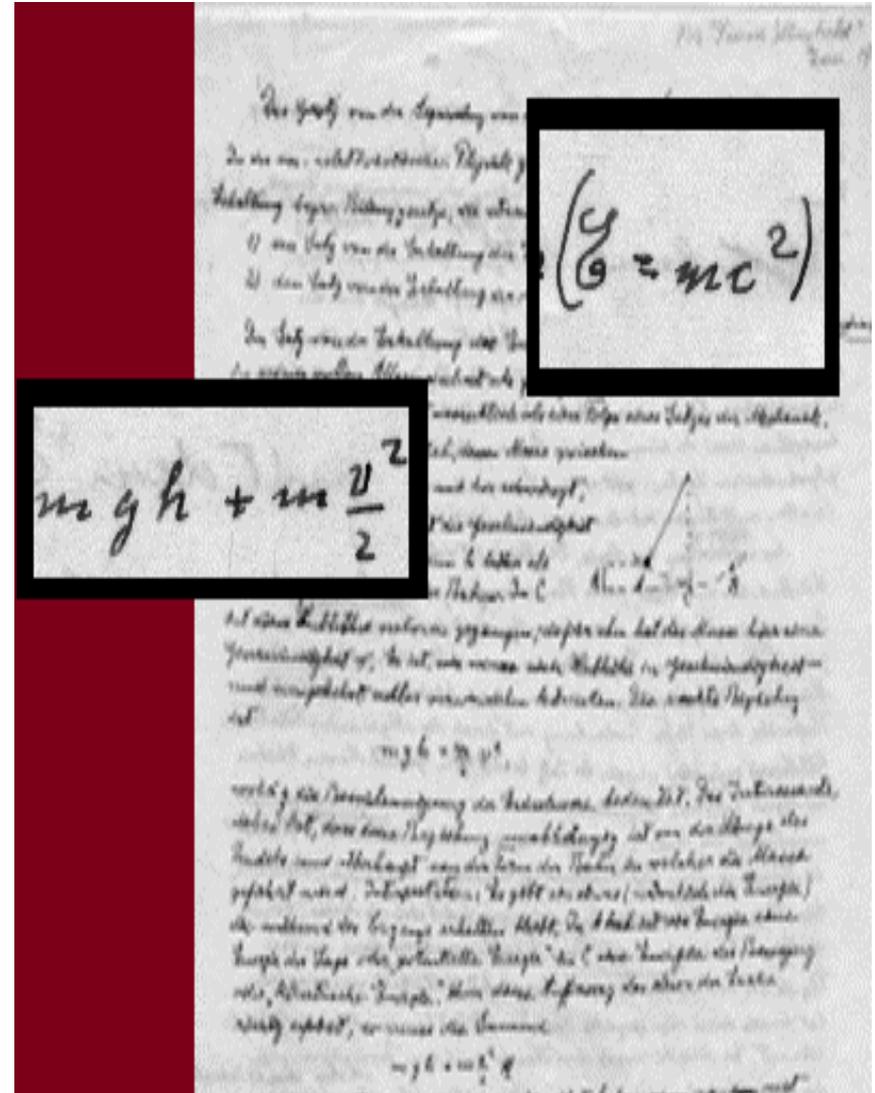
- ***2° Postulato o della velocità della luce:***

La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore ***c*** in tutte le direzioni e in tutti i sistemi di riferimento inerziali

## Il quarto articolo:

27 settembre 1905

***Ist die Tragheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?***  
(L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?)



- Per costruire una teoria fisica senza contraddizioni, che ammetta queste due affermazioni come postulati, è necessaria una revisione dei concetti di tempo e di spazio.
- Abbiamo constatato prima di avere a che fare con due affermazioni corrette ma in contrasto fra di loro secondo la fisica classica.
- Più precisamente esse non sono compatibili nel momento in cui viene accostato un postulato che la fisica classica sottintende:  
quello dell'**invarianza del tempo**.

# CRITICA AI CONCETTI DI SPAZIO, TEMPO E SIMULTANEITA'



# Cosa vuol dire simultaneità?



Einstein, in quanto fisico, vuole una definizione operativa, precisa, ripetibile e universale

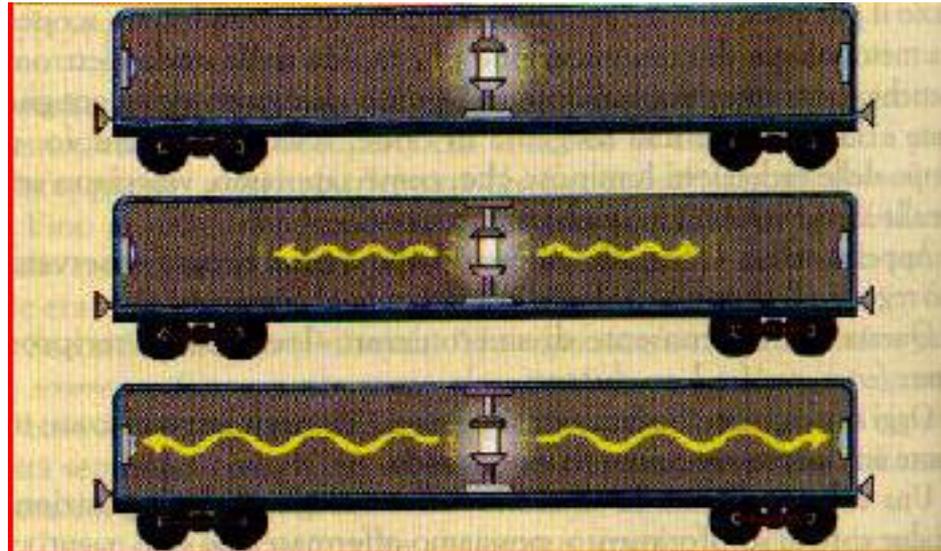
L'assioma della costanza della velocità della luce permette di stabilire in modo operativo e non ambiguo quando due eventi sono simultanei o no.

Diciamo che due fenomeni  $F_1$  e  $F_2$  (che avvengono nei punti  $P_1$  e  $P_2$ ) sono simultanei se la luce che essi emettono giunge nello stesso istante in un punto  $P$  equidistante da  $P_1$  e da  $P_2$ .

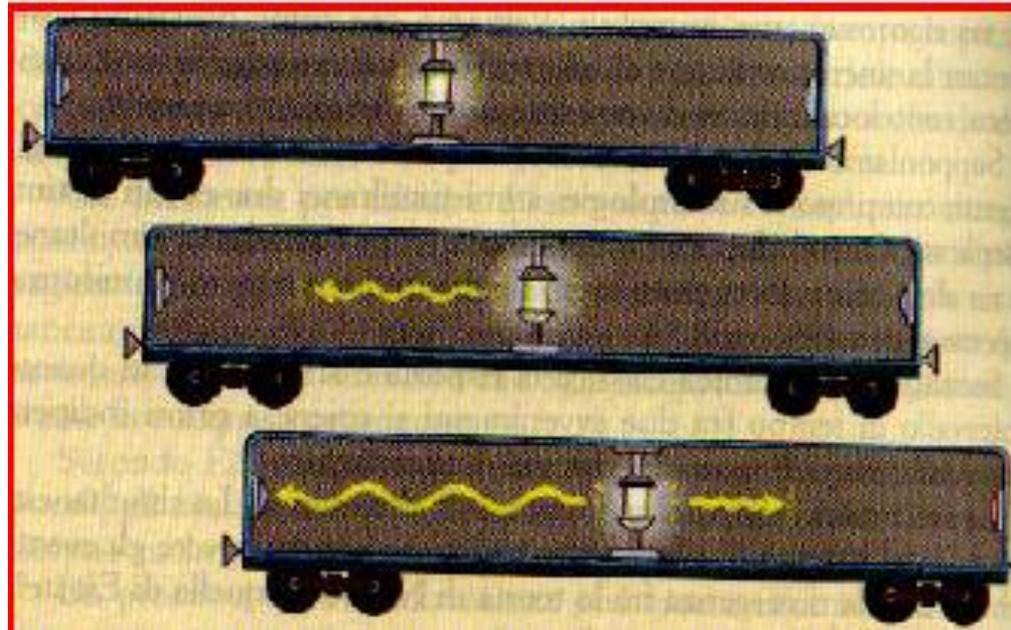
Eventi che sono simultanei in un particolare sistema di riferimento inerziale possono cessare di esserlo se la misura avviene rispetto a un diverso riferimento inerziale.



- Un osservatore si trova al buio al centro di un lungo vagone di un treno in moto con velocità costante.
- A un certo istante, utilizzando un'apposita sorgente, l'uomo invia due pennelli luminosi diretti verso le due estremità del vagone, sulle cui pareti si trovano dei dispositivi in grado di segnalare l'arrivo della radiazione luminosa.
- Poiché la velocità della luce è costante, l'onda raggiungerà i due dispositivi segnalatori nello stesso intervallo di tempo. **Per l'osservatore posto nell'interno del vagone i due eventi, "luce che raggiunge la testa" e "luce che raggiunge la coda" avvengono simultaneamente.**



- Consideriamo ora il punto di vista di un osservatore  $O'$  posto a terra con il proprio orologio mentre passa il treno.
- Anche per lui la luce si muove in entrambe le direzioni con velocità costante; però, nel valutare la stessa sequenza degli eventi, nota che, mentre la parete posteriore del vagone si avvicina verso la luce, quella anteriore se ne allontana.
- **Per il secondo osservatore, quindi, i due eventi, “luce che raggiunge la testa” e “luce che raggiunge la coda”, non sono simultanei.**



- Quindi i due eventi che sono simultanei per gli osservatori all'interno del vagone, non lo sono per quello all'esterno!
- La definizione operativa di simultaneità ne rivela il carattere relativo e non assoluto!

- Come si misura la durata di un fenomeno?
- E la lunghezza di un segmento?

E' facile convincersi che qualsiasi metodo si scelga, si ha a che fare con eventi simultanei

- La lettura dell'istante iniziale deve essere simultanea all'inizio del fenomeno
- La lettura dell'istante finale deve essere simultanea alla fine del fenomeno

**Bisognava riconsiderare il  
TEMPO**

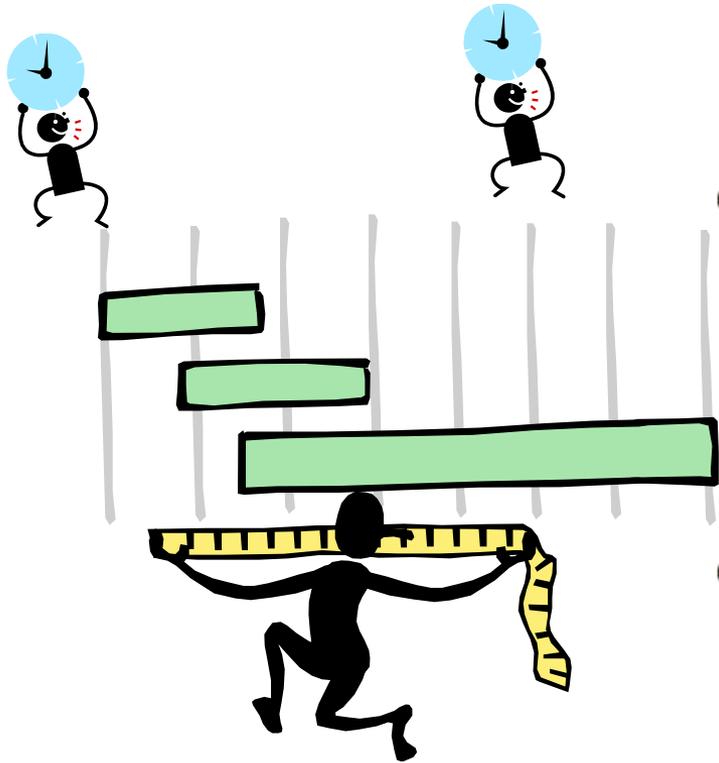
**TEMPO UNIVERSALE**

**TEMPO PROPRIO**

La durata di un fenomeno è minima se misurata nel sistema  
solidale (proprio) con esso.

l'orologio in movimento ritarda rispetto a quello in quiete (il  
tempo scorre più lentamente)

# E come si misura la lunghezza di un segmento?



- Per misurare la lunghezza di un segmento AB si deve prendere visione della posizione di A e di B simultaneamente
- La relatività della simultaneità porta come conseguenze non solo la relatività dell'intervallo temporale ma anche quella della distanza tra due punti!

# Contrazione delle lunghezze

La lunghezza di un corpo è più grande quando esso è in riposo relativamente all'osservatore (lunghezza propria).

Quando il corpo si muove con una velocità  $v$  rispetto all'osservatore la sua lunghezza misurata si contrae nella direzione del moto del fattore  $\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , mentre le sue dimensioni perpendicolari alla direzione del moto non vengono alterate.

$$l = l_o / \gamma = l_o \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

**La lunghezza di un oggetto misurato da un osservatore in moto relativo è minore di quella misurata nel riferimento dell' oggetto**

**Quando  $V=c$  la lunghezza  $L$  va a ZERO !!!**

Alla fine si riottengono le stesse leggi di trasformazione che Lorentz aveva trovato per imporre che le equazioni di Maxwell rimanessero invarianti cambiando sistema di riferimento

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \left(\frac{v}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

Se  $V \ll c$  si riottengono le trasformazioni della relatività di Galileo

# Quanto è grande il fattore di Lorentz?

	V	V/c	$(V/c)^2$	fattore di Lorentz
Auto	100 km/h	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-14}$	1.00000000000000044
Aereo	$\sim 1000$ km/h	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-12}$	1.00000000000004288
Space Shuttle	27000 km/h	$\sim 2.5 \cdot 10^{-5}$	$\sim 6.3 \cdot 10^{-10}$	1.0000000003125
elettrone in un atomo	590 km/s = $2.13 \cdot 10^6$ km/h	$\sim 0.002$	$\sim 4 \cdot 10^{-6}$	1.000001956
protone per usi medicali	128385.7 km/s $\sim 400 \cdot 10^6$ km/h	0.428	0.183	1.107
protone dentro LHC	299792.45 km/s $\sim 1.08 \cdot 10^9$ km/h	0.999999999999991	$\sim 1$	7456540.4

Il contenuto del 4° articolo del 1905

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

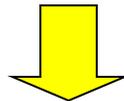
**La legge di Newton che lega forza, massa e accelerazione viene mutata profondamente**

Se un corpo raggiungesse la velocità della luce, nessuna forza la potrebbe più aumentare, non si produce più accelerazione



Nella meccanica relativistica quanto più la velocità di un corpo è grande, tanto più è difficile accrescerla

Questa resistenza è la **MASSA**



**LA MASSA AUMENTA CON LA VELOCITA'**

## Conseguenza:

massa nel sistema proprio  
di quiete (“massa a riposo”)

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Equivalenza di massa e energia

Il significato profondo sta nel fatto che l'energia può essere convertita in massa e viceversa:

Non è più necessario che in un sistema di particelle in interazione fra di loro il numero di queste rimanga costante...

**L'energia disponibile nelle collisioni fra particelle  
può essere convertita in altre nuove particelle**

# Spazio e tempo

## Esiste una stretta connessione tra spazio e tempo

- *Il tempo è una quarta dimensione misurata nelle stesse unità delle prime tre ( $x, y, z$ )*
- *Il prodotto  $ct$  rappresenta lo spazio percorso dalla luce nel tempo  $t$*
- *Un evento è qualcosa che accade in un certo punto, ad un certo tempo indipendentemente dal sistema di riferimento utilizzato: per descrivere un evento usiamo 4 numeri:  $x, y, z, t$  (o  $ct$ ), che chiamiamo coordinate spazio temporali.*
- *Questo spazio si chiama spazio di Minkowsky (Herman Minkowski, 1864 – 1909)*

# ASSOLUTO E RELATIVO

- Le grandezze **invarianti** non dipendono dal riferimento, hanno quindi **carattere assoluto**
- Le grandezze che dipendono dal riferimento sono invece relative

**Da ricordare!!**

**Nella relatività non tutto è relativo!**

Nello spazio di Minkowsky:  $x^2+y^2+z^2-c^2t^2 = x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2$

**$\Delta s$  = la distanza spazio-temporale tra due eventi risulta essere INVARIANTE al cambiare del sistema di riferimento!**

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - \Delta x^2$$

# Relatività di Galileo

## ASSOLUTO

- La coordinata temporale
- La distanza temporale

## RELATIVO

- La distanza spaziale
- La coordinata spaziale
- la velocità

# Relatività di Einstein

## ASSOLUTO

- \* L'intervallo spazio-temporale  $\Delta s^2$
- \* La velocità della luce
- \* Altre quantità tipo la seguente combinazione di Energia ( $E$ ) e Quantità di moto ( $p$ ):

$$\begin{aligned} E^2 - p^2 c^2 \\ = E'^2 - p'^2 c^2 \\ = m_0^2 c^4 \end{aligned}$$

## RELATIVO

- \* La coordinata spaziale
- \* La coordinata temporale
- \* La lunghezza
- \* La distanza spaziale
- \* La distanza temporale
- \* La velocità

*Nel lavoro quotidiano del fisico usare gli invarianti assoluti è spesso più comodo rispetto al calcolo delle trasformazioni*

# RELATIVITÀ E OGGETTIVITÀ

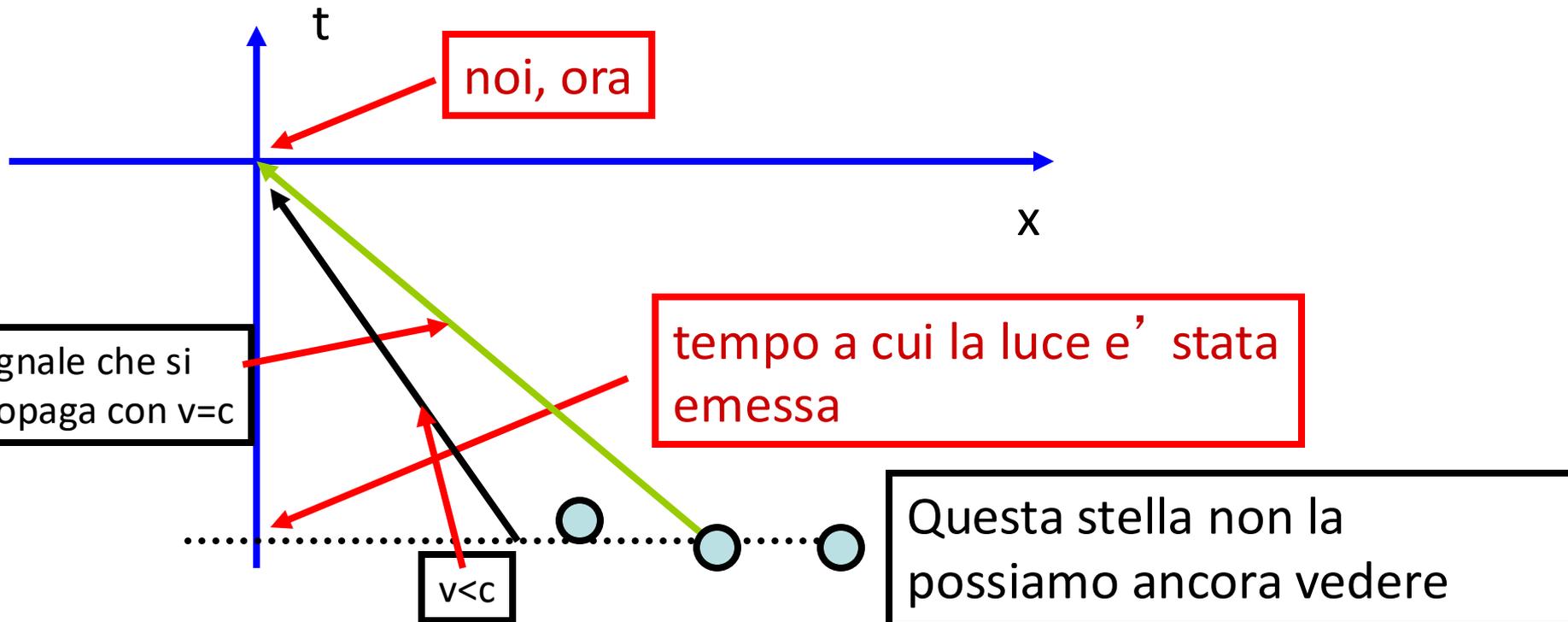
*La "Relatività", nonostante il nome che può trarre in inganno, non aveva niente a che vedere, dunque, con il relativismo filosofico:*

*al contrario essa era la teoria*

- *degli "invarianti"*
- *delle leggi che si presentano nella "stessa forma" per tutti gli osservatori (covarianza)*

# Quali stelle vediamo?

- la velocità della luce è finita
- Quello che vediamo sono immagini lontane che appartengono ad un Universo più giovane.

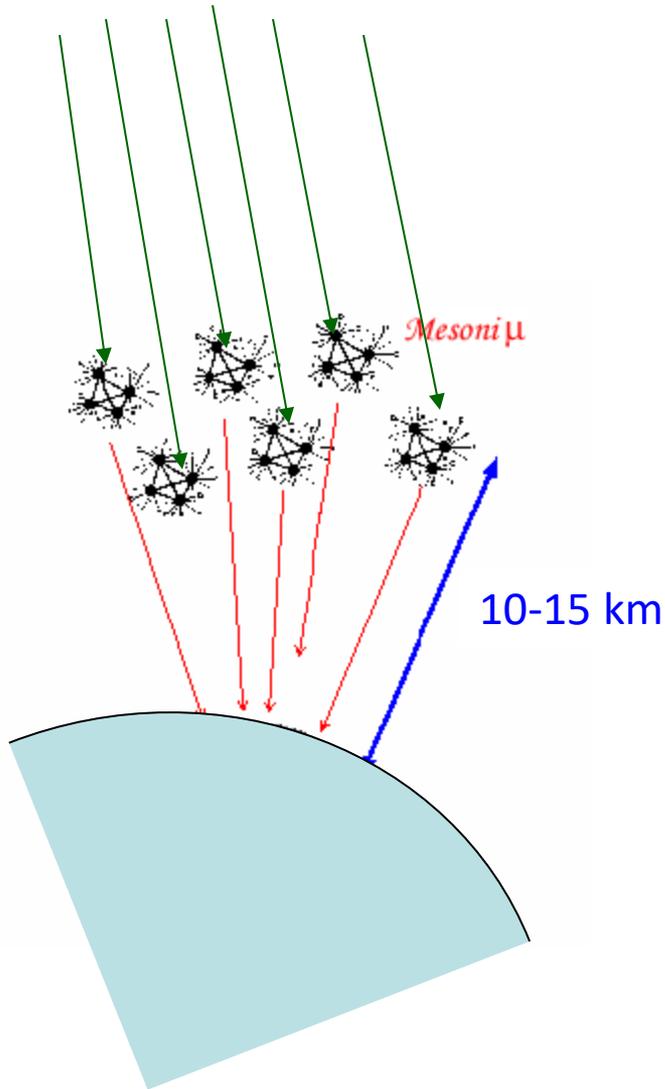


Alcune conseguenze  
dei postulati della teoria della relatività

a) dilatazione dei tempi

b)  $E=mc^2$

# I Mesoni $\mu$



Una verifica tangibile della legge della dilatazione dei tempi è fornita dalla vita propria dei **muoni cosmici**, particelle subnucleari derivanti dal processo di collisione di particelle altamente energetiche con gli atomi dell'atmosfera terrestre. Il processo di collisione genera muoni che attraversano l'atmosfera terrestre ed arrivano al suolo con una frequenza misurata di circa  $1\text{cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ .

La vita media dei muoni a riposo è di circa **2.2  $\mu$ s**

Un muone viaggiante alla velocità della luce dovrebbe percorrere quindi (se non si applicano correzioni relativistiche) in media una distanza  $s$  pari a  $s = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m}$  cioè circa 660 m prima di decadere.

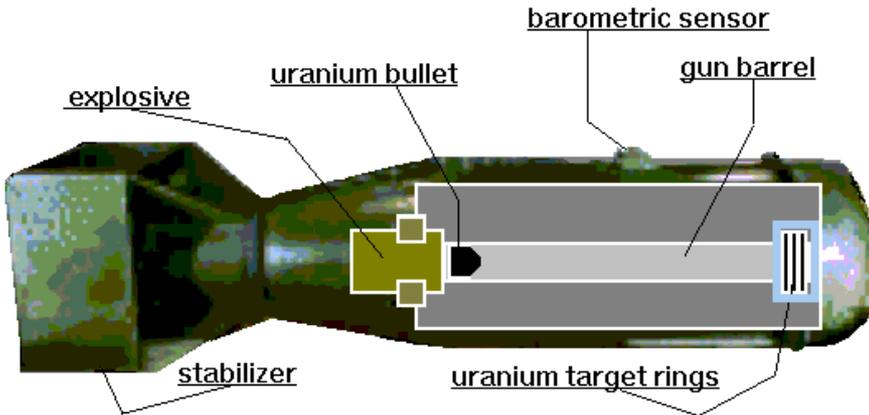
Poichè i muoni sono prodotti nella parte esterna della atmosfera che dista dal suolo circa 10-15 km, la probabilità che un muone raggiunga il suolo sarebbe del tutto trascurabile e non giustificerebbe la frequenza di arrivo misurata. Se invece si tiene conto della dilatazione dei tempi (tenendo conto della loro velocità media  $V \sim 0.995 c$ ) correggendo per il fattore di Lorentz

$$g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

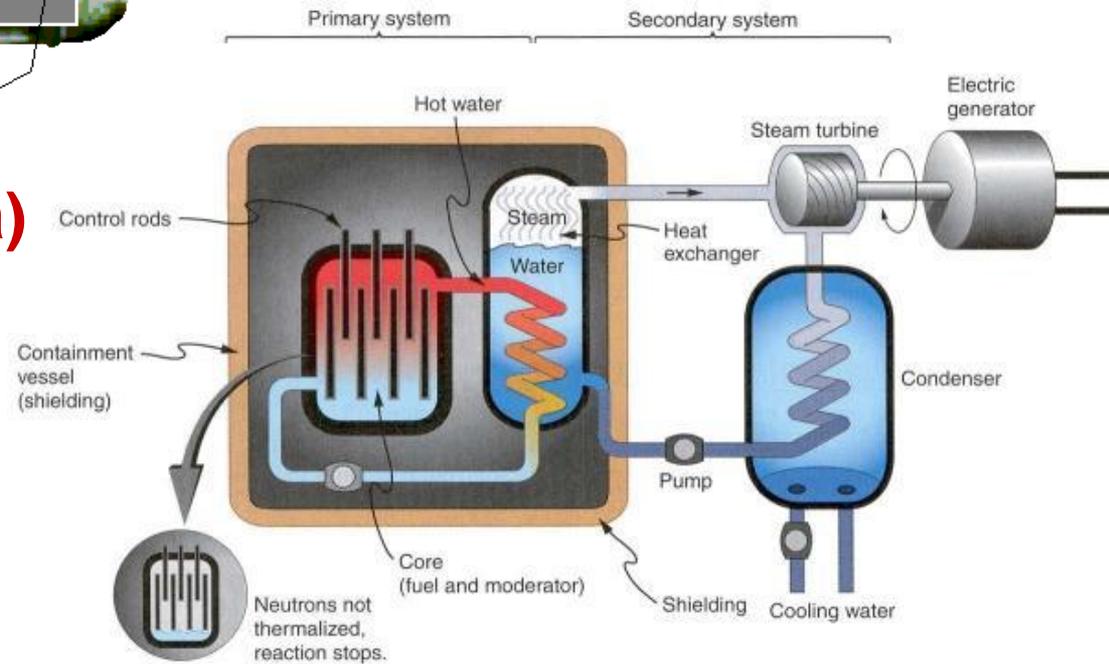
**si ottiene un percorso medio maggiore di 6 km**

Questa nuova stima suggerisce che una frazione significativa dei muoni prodotti nella parte superiore dell'atmosfera raggiunga il suolo ed è in ottimo accordo con la frequenza misurata

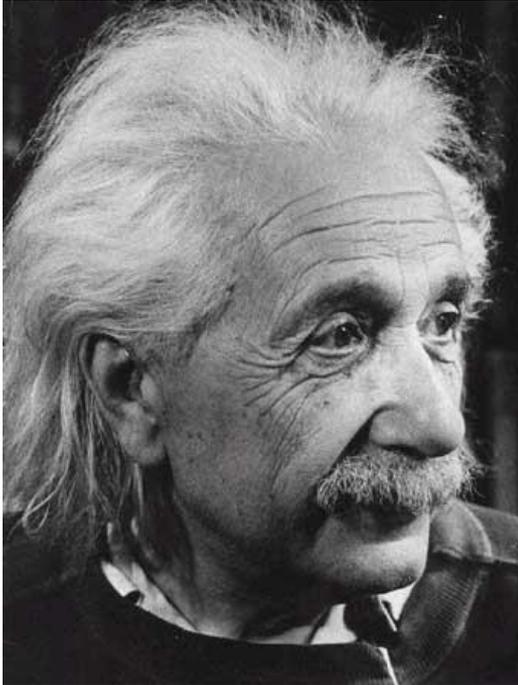
$$E = m c^2$$



## Little Boy (Hiroshima)



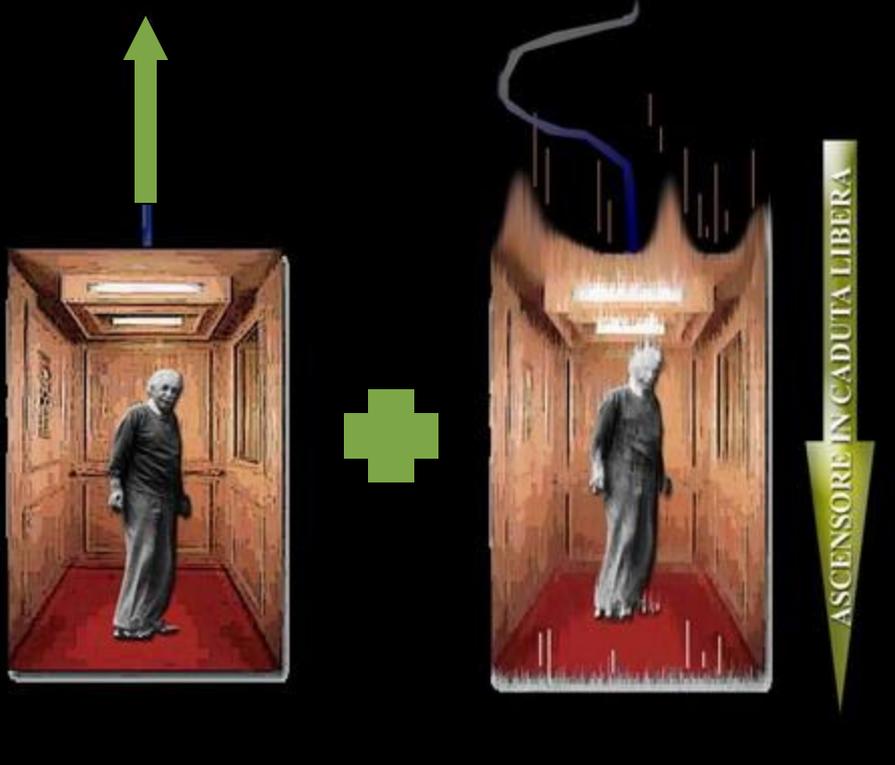
# Arriviamo al 1915: la **Relatività Generale**



Le leggi della Fisica  
sono le stesse per  
**TUTTI** gli  
osservatori

Non solamente osservatori  
inerziali, che si muovono a velocità  
costante, ma anche **accelerati**

# Relatività Generale



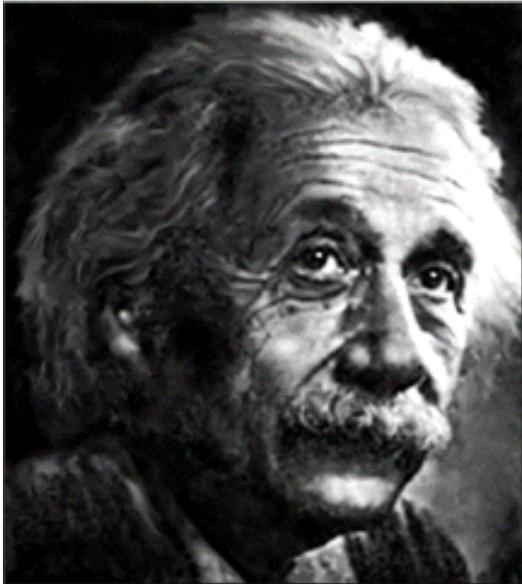
Una cabina accelerata in assenza di gravità si comporta come una cabina che risente della sola gravità

Una persona in caduta libera non sente la gravità

**Principio di equivalenza**

Effetti della gravità in sistema inerziale  $\sim$  sistema non inerziale

# Dalla Relatività Ristretta alla Relatività Generale



A. Einstein

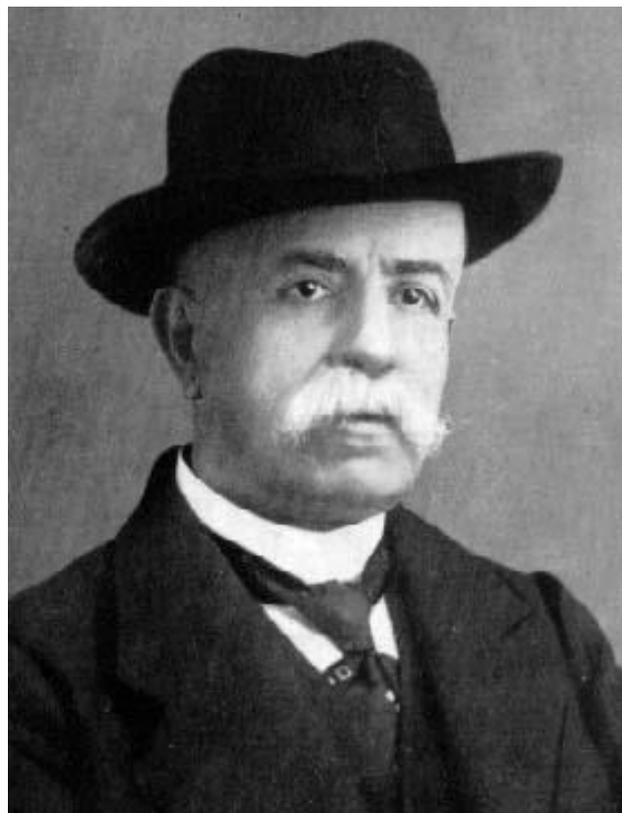
**Come formulare la matematica di  
questa estensione?**

**“La geometria differenziale” le geometrie “non euclidee”  
(Gauss, Riemann, Lobachevsky, Ricci, Levi-Civita,...)**

# Il contributo della matematica



Marcel  
Grossman



Gregorio  
Ricci Curbastro



Tullio  
Levi Civita

## Il più importante articolo

***Feldgleichungen der Gravitation*** (Le Equazioni di Campo della Gravitazione), *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, **1915 (part 2)**, 844–847

(altri articoli preparatori erano usciti nel 1914)

Poi seguirà:

***Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*** (I Fondamenti della Teoria Generale della Relatività), *Annalen der Physik (ser. 4)*, **49**, 769–822 (1916)

Relatività Generale:  
l'equazione di Einstein  
(sistema di 10 equazioni)

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

costante  
di Newton

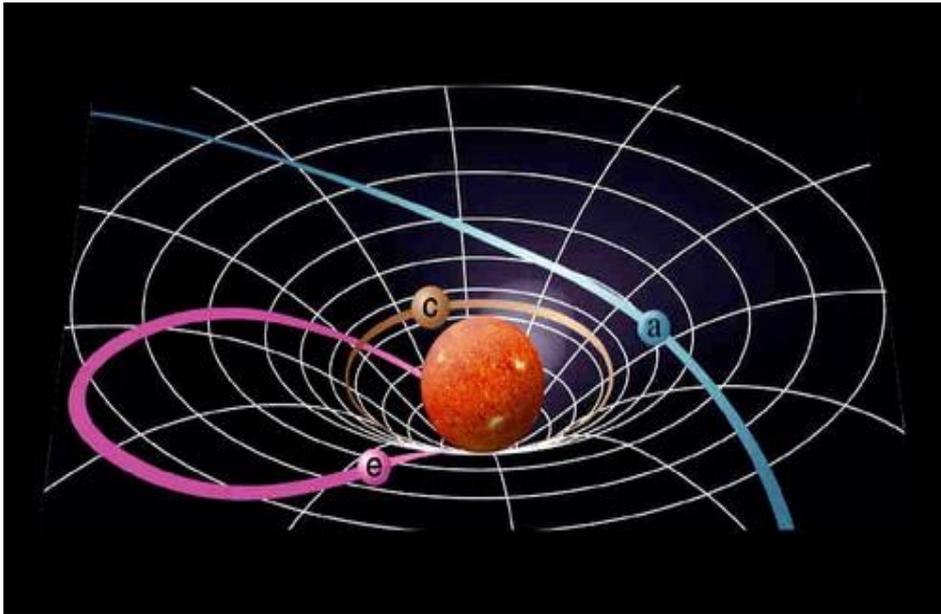
(Metro, Orologi) “=” (Energia, Materia)

**Significato:**

la struttura dello spazio-tempo è determinata  
localmente dalla massa e dall'energia che esso  
contiene

# Relatività Generale

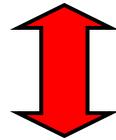
La materia incurva lo spazio-tempo!



Descrizione *geometrica*  
della gravità:  
le distorsioni dello spazio-  
tempo *sono la gravità stessa*

**Da ricordare!!**

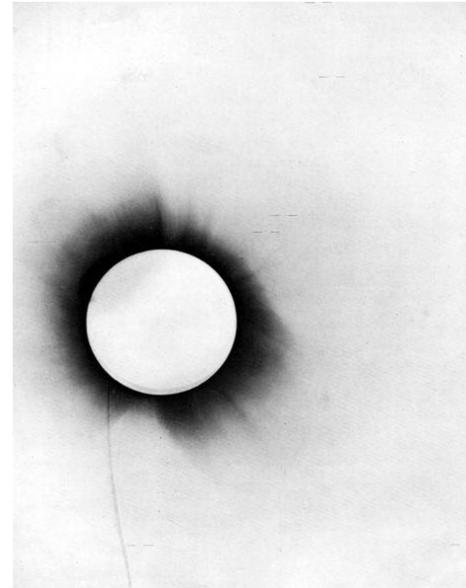
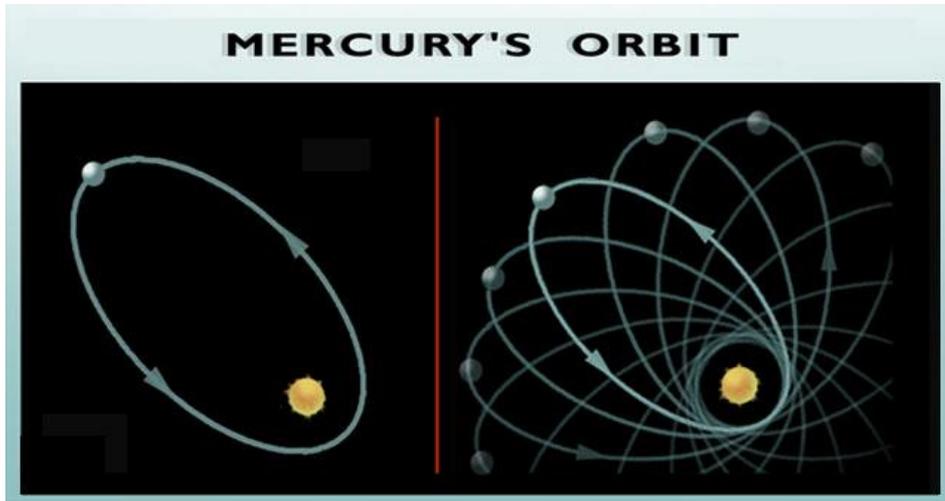
La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi



La curvatura dello spazio-tempo dice **alla materia e alla luce**  
come muoversi



# Le prime conferme sperimentali della Relatività Generale



Normal position  
of star.

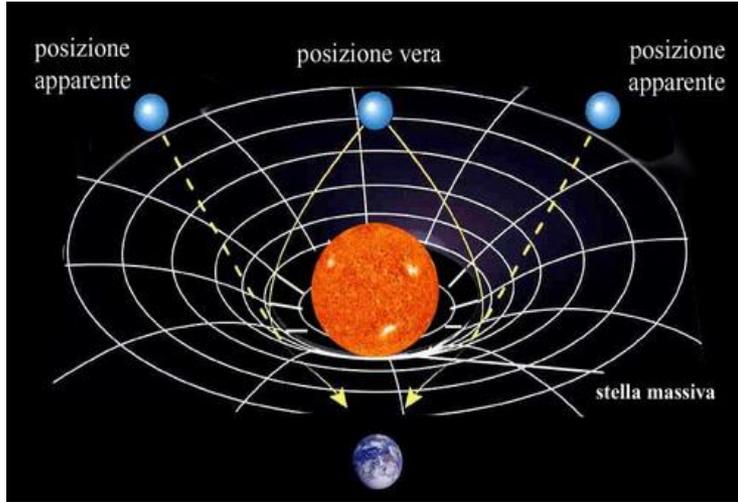


Apparent position  
of star.

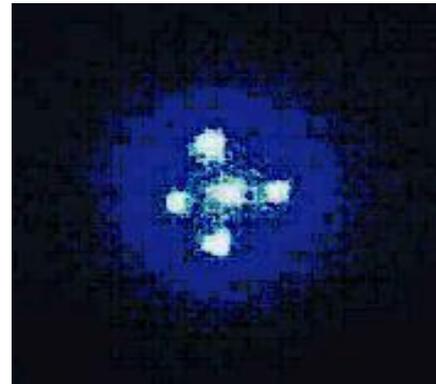


Anche il cammino della luce è influenzato dai corpi che distorcono lo spazio-tempo

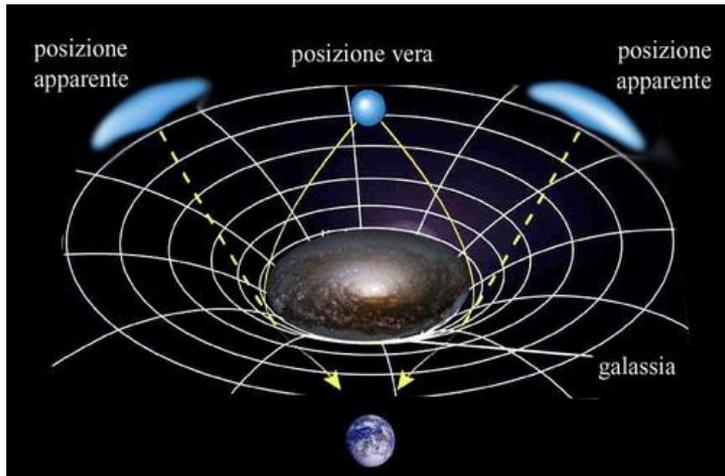
# Relatività Generale



Anello di Einstein



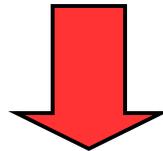
Croce di Einstein



Lente gravitazionale disomogenea

# Relatività Generale

Anche lo scorrere del tempo è influenzato dalla gravità

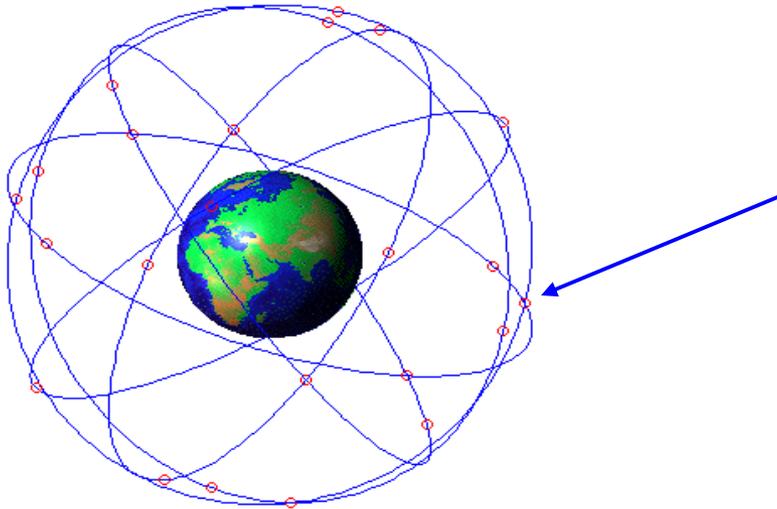


Dove la gravità è più forte, il tempo scorre più lento

**Da ricordare!!**

# Relatività Generale: una applicazione nella vita di tutti i giorni

GPS: global positioning system

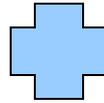


- ★ 31 satelliti
- ★ Altitudine da terra: 20000 Km
- ★ Periodo di rotazione: 12 ore
- ★ Precisione: 5-10 metri (per il pubblico...)

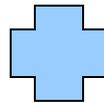
velocità di 2.9 Km/s  
(cioè  $v/c = 10^{-5}$ )

# Relatività e GPS

Almeno 4 satelliti sono sempre visibili da ogni punto della Terra ad ogni istante



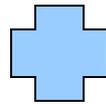
Ogni satellite ha un orologio atomico



Il ricevitore GPS compara i segnali degli orologi di diversi satelliti per usare poi il metodo del posizionamento sferico

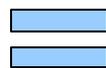
# Relatività e GPS

**Relatività ristretta – dilatazione dei tempi**  
rispetto all'osservatore sulla Terra, gli orologi sui  
satelliti sono più lenti



Ritardo di 7.2 ms al  
giorno per la velocità

**Relatività generale – curvatura dello spazio-tempo**  
rispetto all'osservatore sulla Terra, gli orologi sui  
satelliti sono più veloci

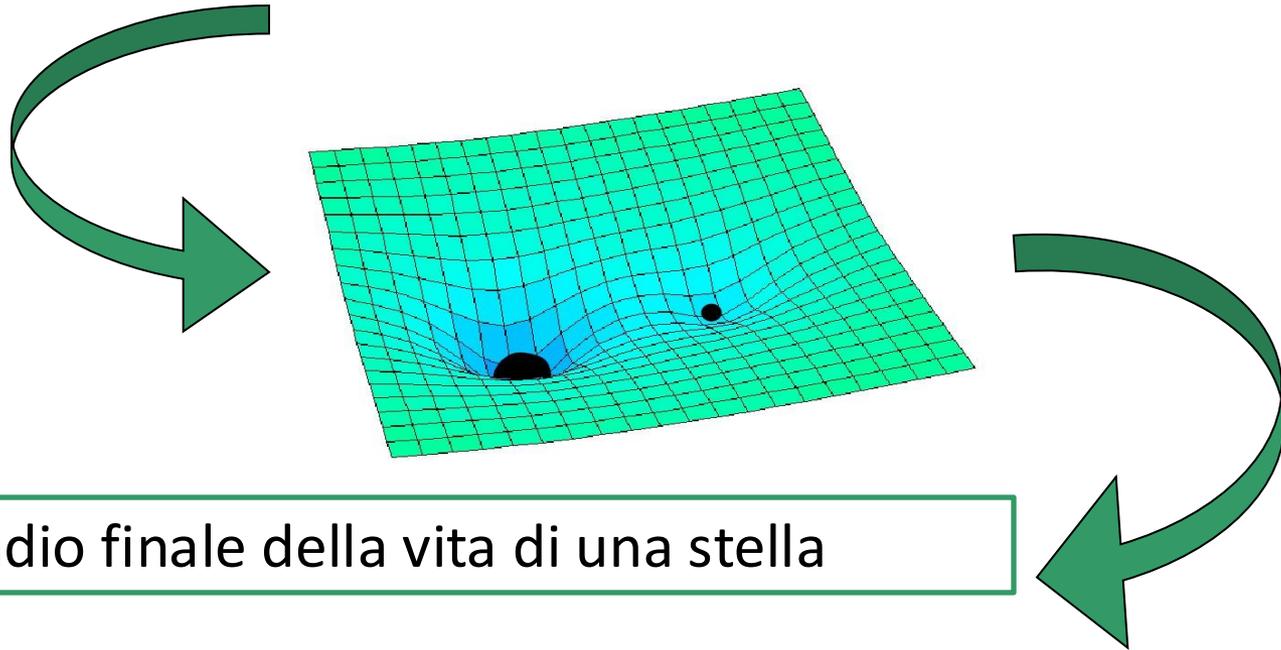


Anticipo di 45.6 ms al giorno per  
la differente gravità

**Errore di 10 Km al giorno se non si introducessero delle apposite  
correzioni!**

# Relatività Generale: I Buchi Neri

La curvatura dello spazio-tempo cambia a seconda della massa dell'oggetto



Stadio finale della vita di una stella

Se un oggetto è abbastanza massivo (almeno 3 volte la massa del Sole) può collassare fino a un punto  
**(singolarità matematica: la teoria non è completa?)**

# Relatività Generale: I Buchi Neri

I buchi neri sono previsti dalla Relatività Generale: regioni in cui la curvatura è così forte da intrappolare anche la luce

Nulla che vi si avvicini troppo  
(**orizzonte degli eventi** – linea invisibile)  
ne può fuggire



Osservatori esterni non possono vedere al di là di  
questa linea

# Relatività Generale: I Buchi Neri

I buchi neri sono previsti dalla Relatività Generale: regioni in cui la curvatura è così forte da intrappolare anche la luce



Osservatori esterni non possono vedere al di là di questa linea

# Relatività Generale e Buchi Neri

Osservazioni astronomiche implicano l'esistenza di buchi neri al centro di molte galassie

- ◆ Stelle che appaiono in orbita intorno ad un compagno invisibile
- ◆ Lenti gravitazionali
- ◆ Jet da galassie
- ◆ ...

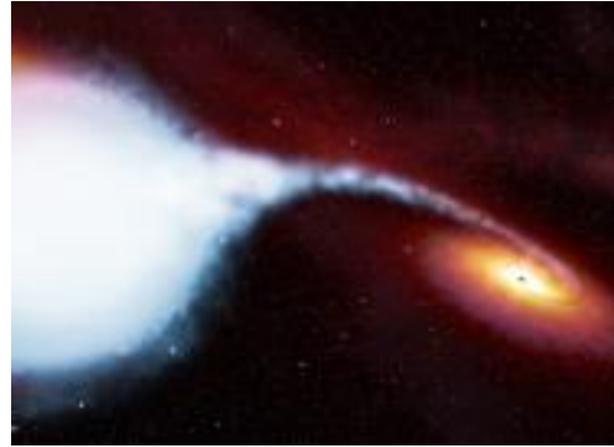
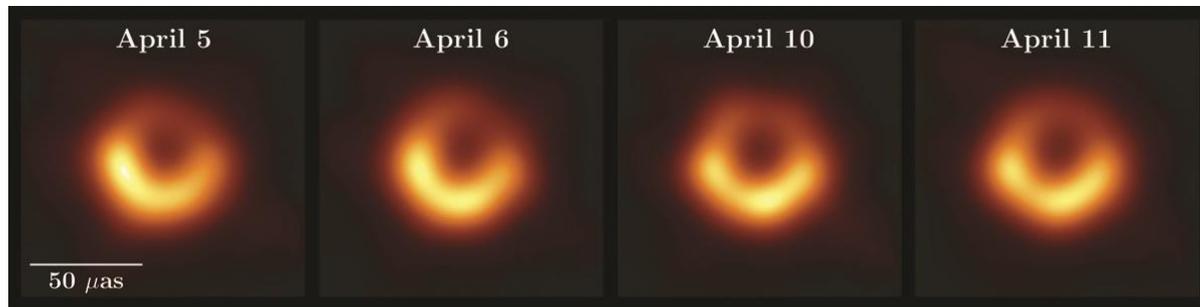


Immagine artistica di Cygnus X-1



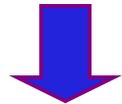
2019: prima "foto" di un buco nero (M87\*)

# Relatività Generale: il Tassello Mancante

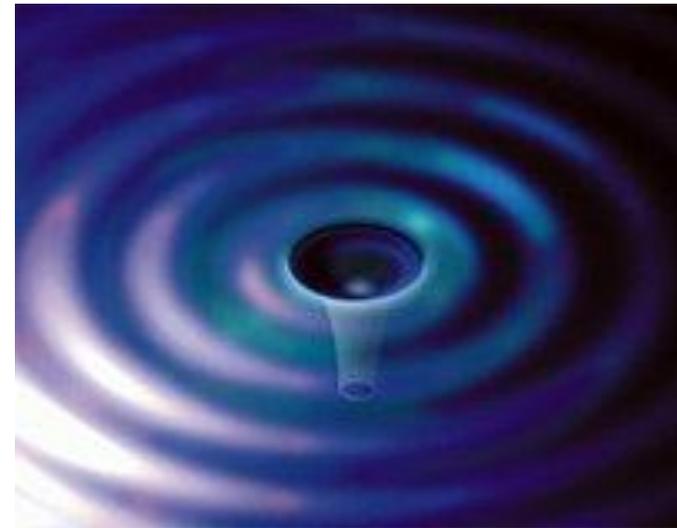
## Le “Onde Gravitazionali”

ultima predizione della Relatività Generale:

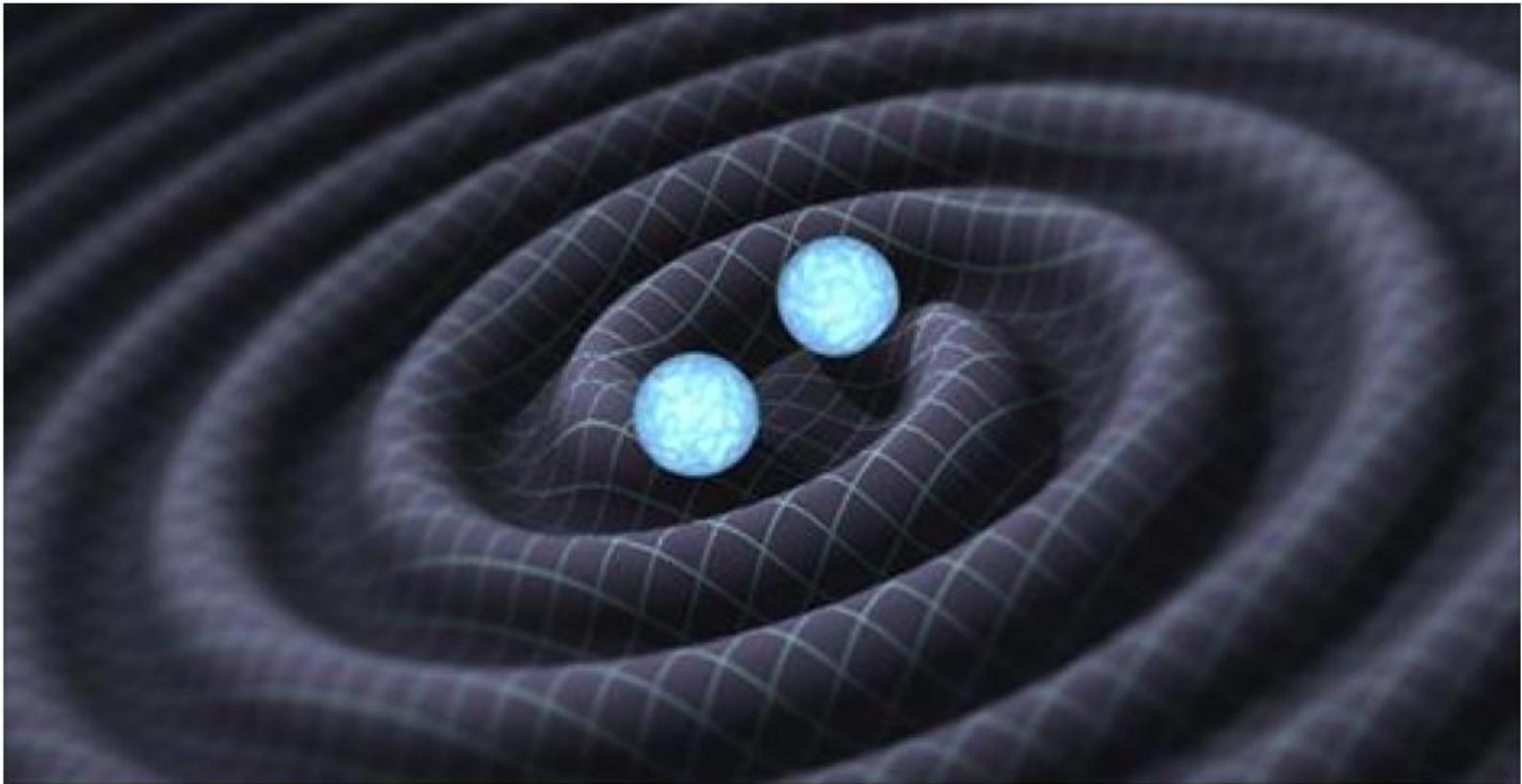
Oggetto massivo con una accelerazione  
*(ma senza simmetria sferica)*



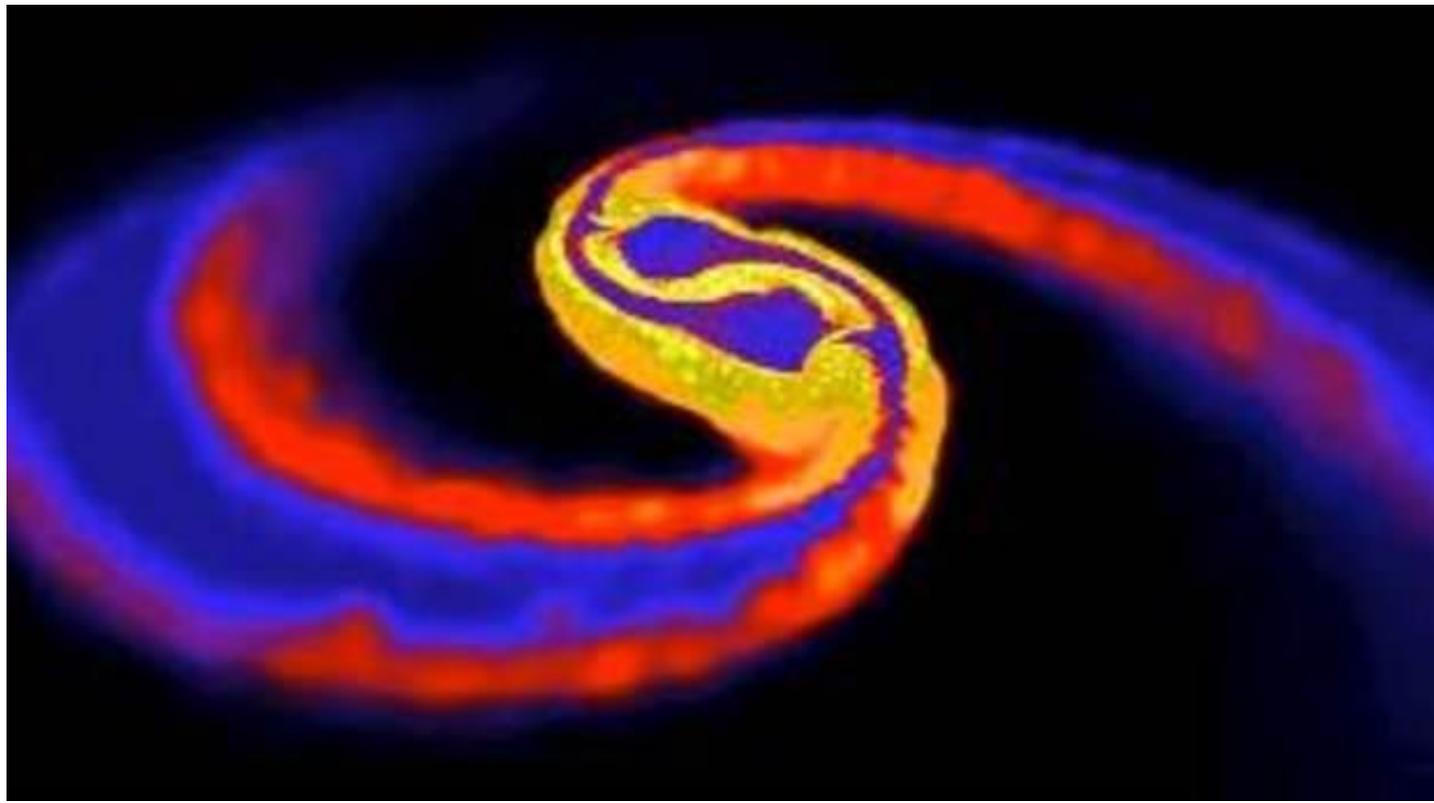
**Oscillazioni dello spazio-tempo**



**Un sistema stellare binario**, formato cioè da due stelle che orbitano intorno ad un comune centro di massa, dovrebbe produrre onde gravitazionali continue;

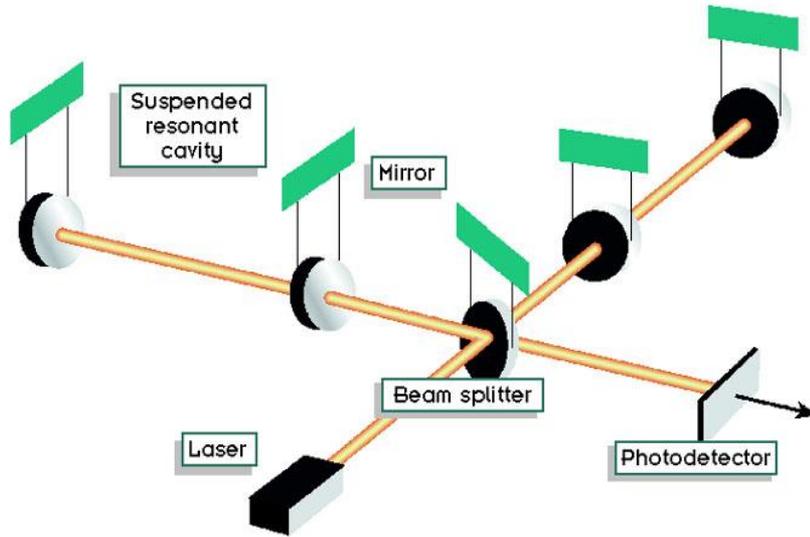


Quando un sistema binario muore, le stelle che lo compongono cadono rapidamente verso il centro seguendo una traiettoria a spirale, fino a che collidono o si disintegrano, emettendo onde gravitazionali. Nel caso che il sistema sia formato da due stelle di neutroni si dovrebbe produrre un impulso di onde gravitazionali molto più intenso, a causa del maggiore quantitativo di massa presente nel sistema.



# Relatività Generale: Le Onde Gravitazionali

## Interferometro laser

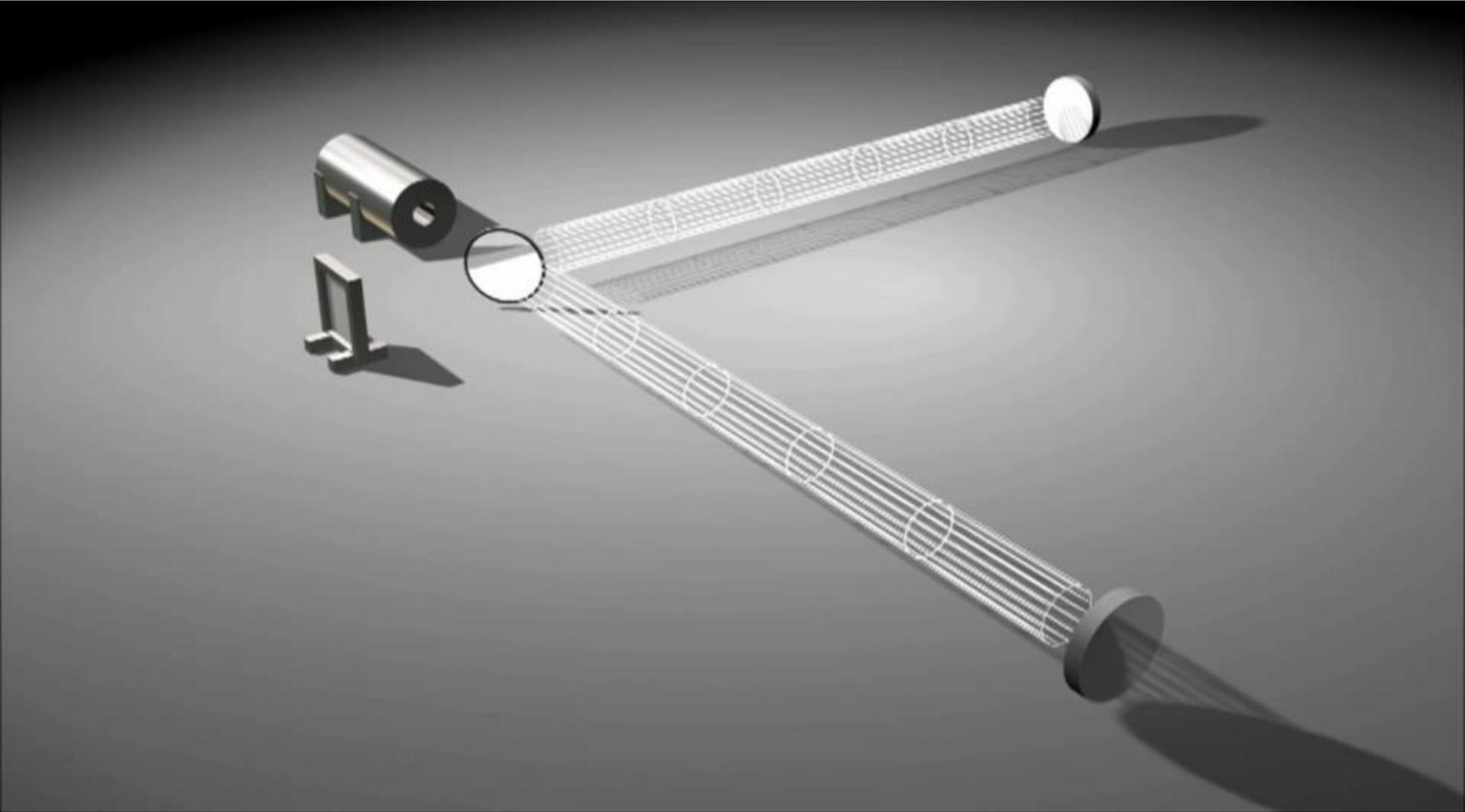


una grande “L” i cui bracci sono formati da tubi lunghi chilometri in una condizione di vuoto elevato.

Si fa brillare un potente laser proiettato lungo i bracci del rivelatore finchè il fascio si riflette su uno specchio semovente posizionato all’estremità finale dei tubi.

Quando passa un’onda gravitazionale, essa colpisce lo specchio spostando leggermente la posizione delle creste delle onde del fascio laser.

Confrontando i fasci di luce tra i due bracci, i ricercatori possono individuare l’effetto prodotto dal passaggio di un’onda gravitazionale



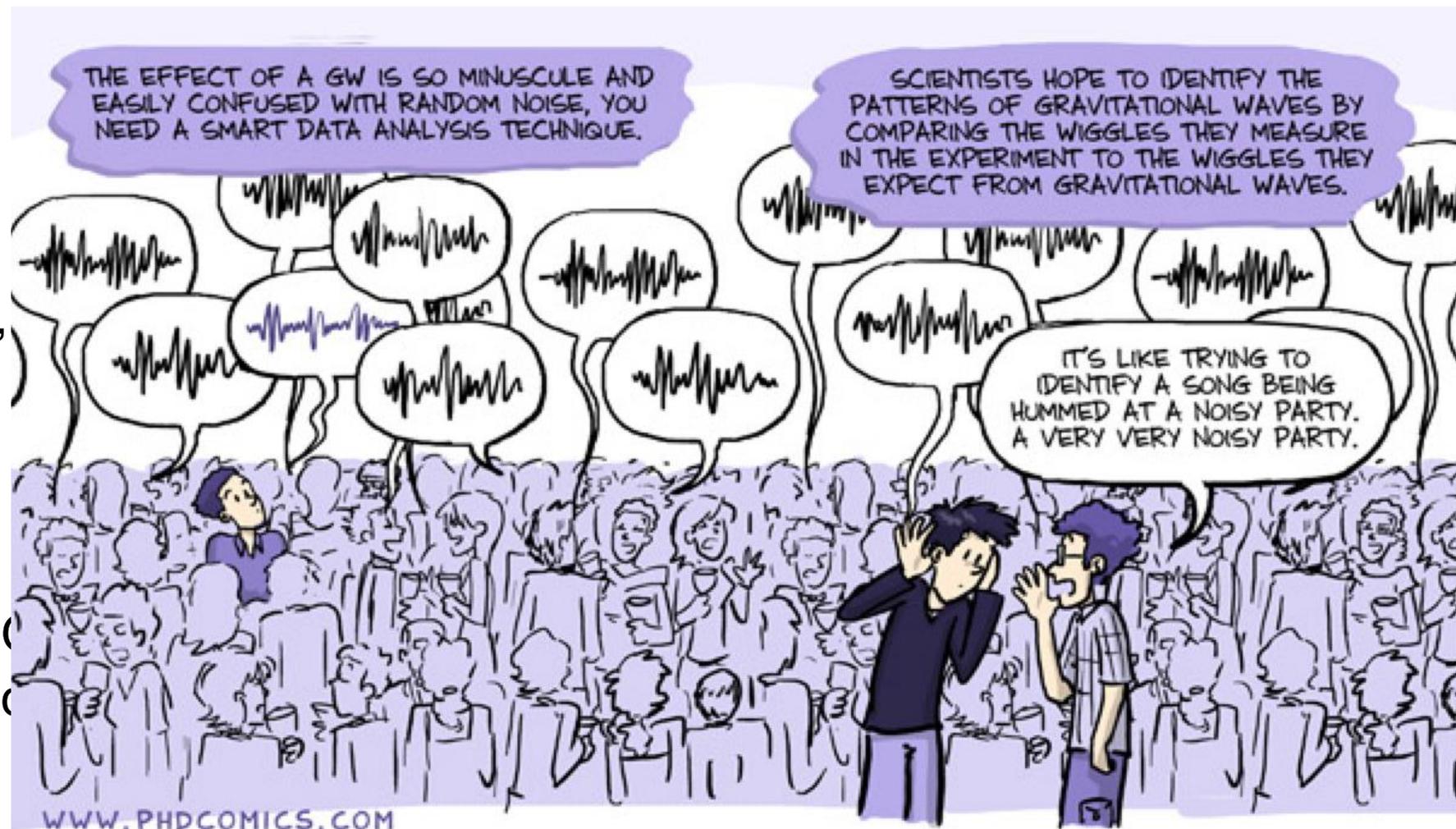
# Una ricerca difficilissima

**Le onde gravitazionali più forti cambiano la distanza fra le estremità dei bracci al massimo approssimativamente di solo  $10^{-18} - 10^{-20}$  m !!!!!**

E' come dire di essere capaci di misurare l'accorciamento di 5 mm di una stecca lunga 1.000.000.000.000.000.000.000 m

Occorre distinguere un segnale vero in mezzo a vibrazioni dovute a sismi, passaggio di mezzi, "rumore elettronico",...

# Una ricerca difficilissima

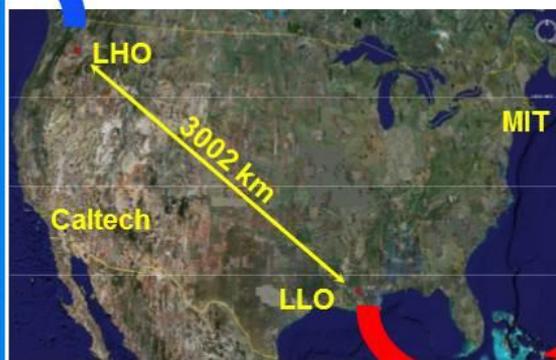


m

# Interferometro LIGO (USA)



LIGO è un sistema di due interferometri identici in due siti distanti fra di loro negli Stati Uniti. Lavorano all'unisono come un unico "osservatorio". La sensibilità raggiunta è più di 10 volte maggiore di quella del progetto originario.



4 km per ciascun braccio

- Laser da 200 W
- Interferometro capace di misurare spostamenti fino a  $10^{-19}$  m
- 10,000 m<sup>3</sup> sotto vuoto,
- pressione pari a 1 parte su  $10^{12}$  di quella dell'aria
- Volume di dati prodotti: ~ 1 Terabyte/giorno

# Interferometro Virgo



(collaborazione italo-francese)

Cascina (Pisa)

Interferometro laser con due bracci  
ad angolo retto



Lunghezza: 3 Km

Diametro: 1.2 m

tunnel ad alto  
vuoto

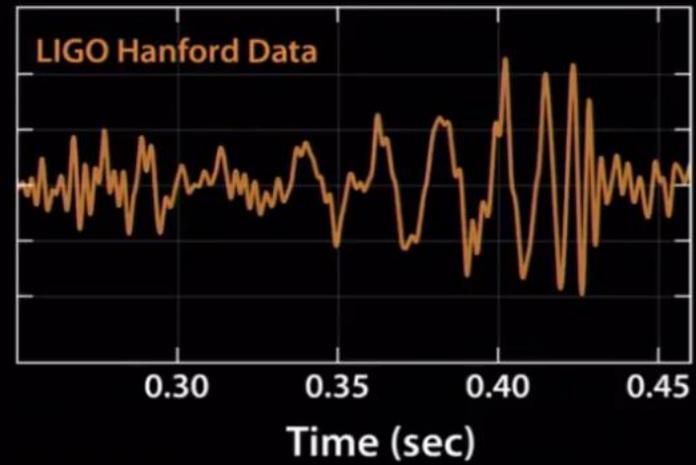
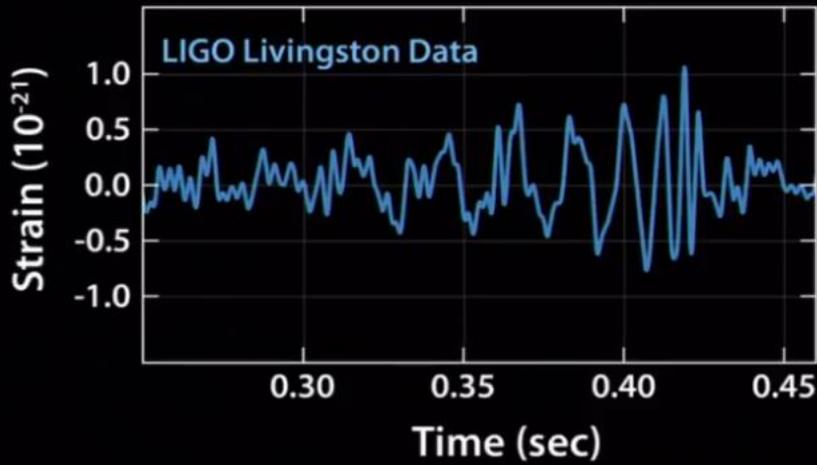


La luce fa avanti e indietro per 120 km

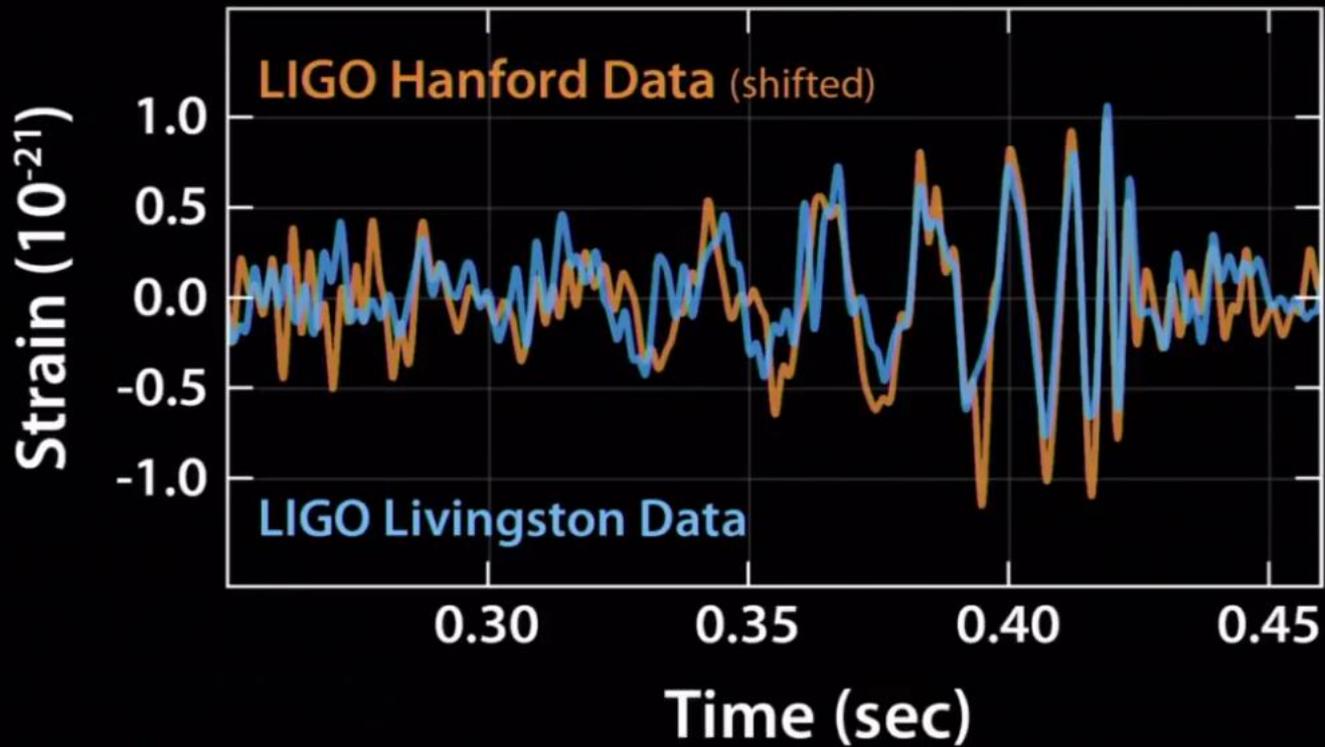




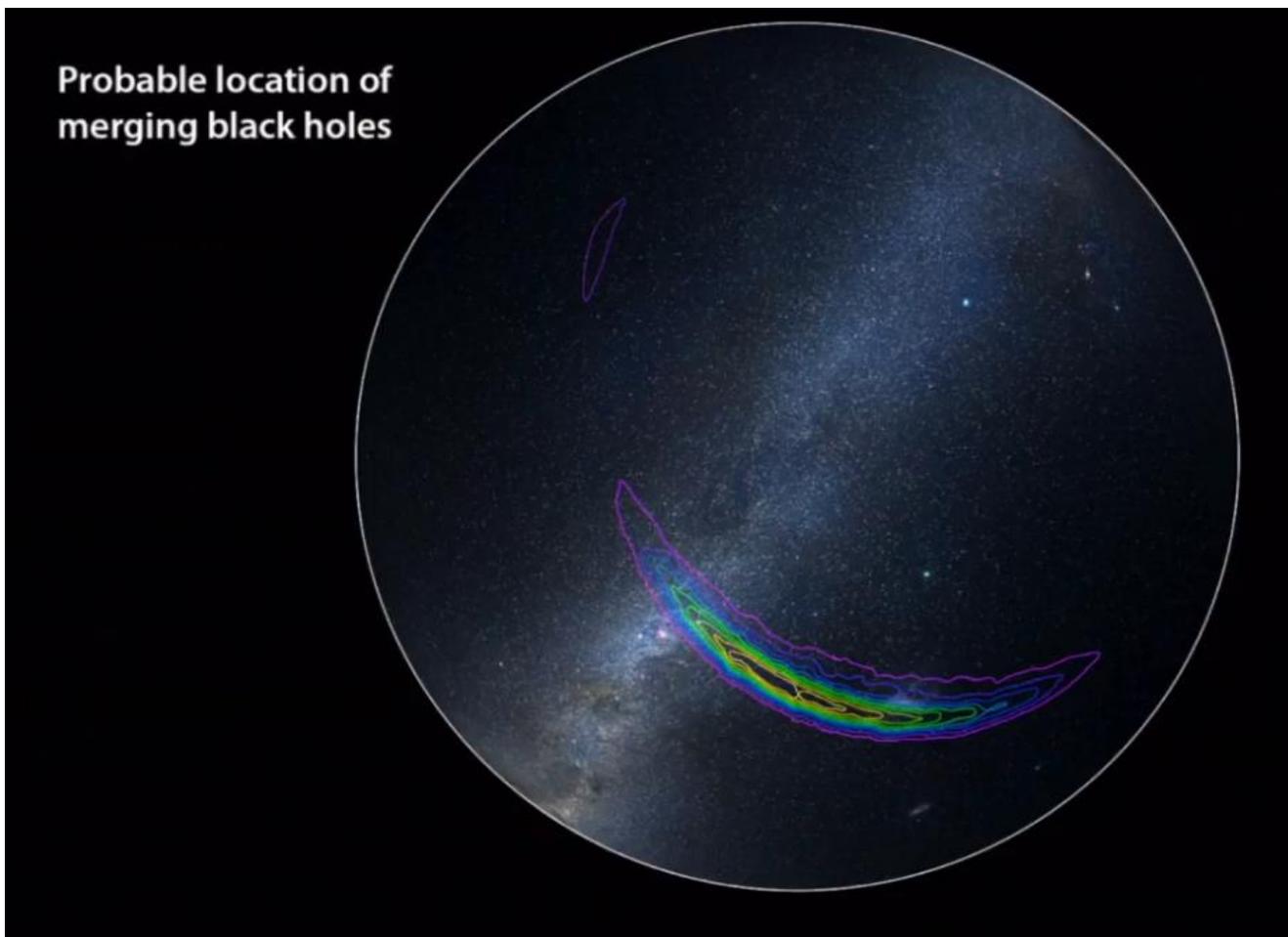




14 settembre 2015, alle 10:50:45 ora italiana



Probable location of  
merging black holes



Sistema di buchi neri che si fondono.

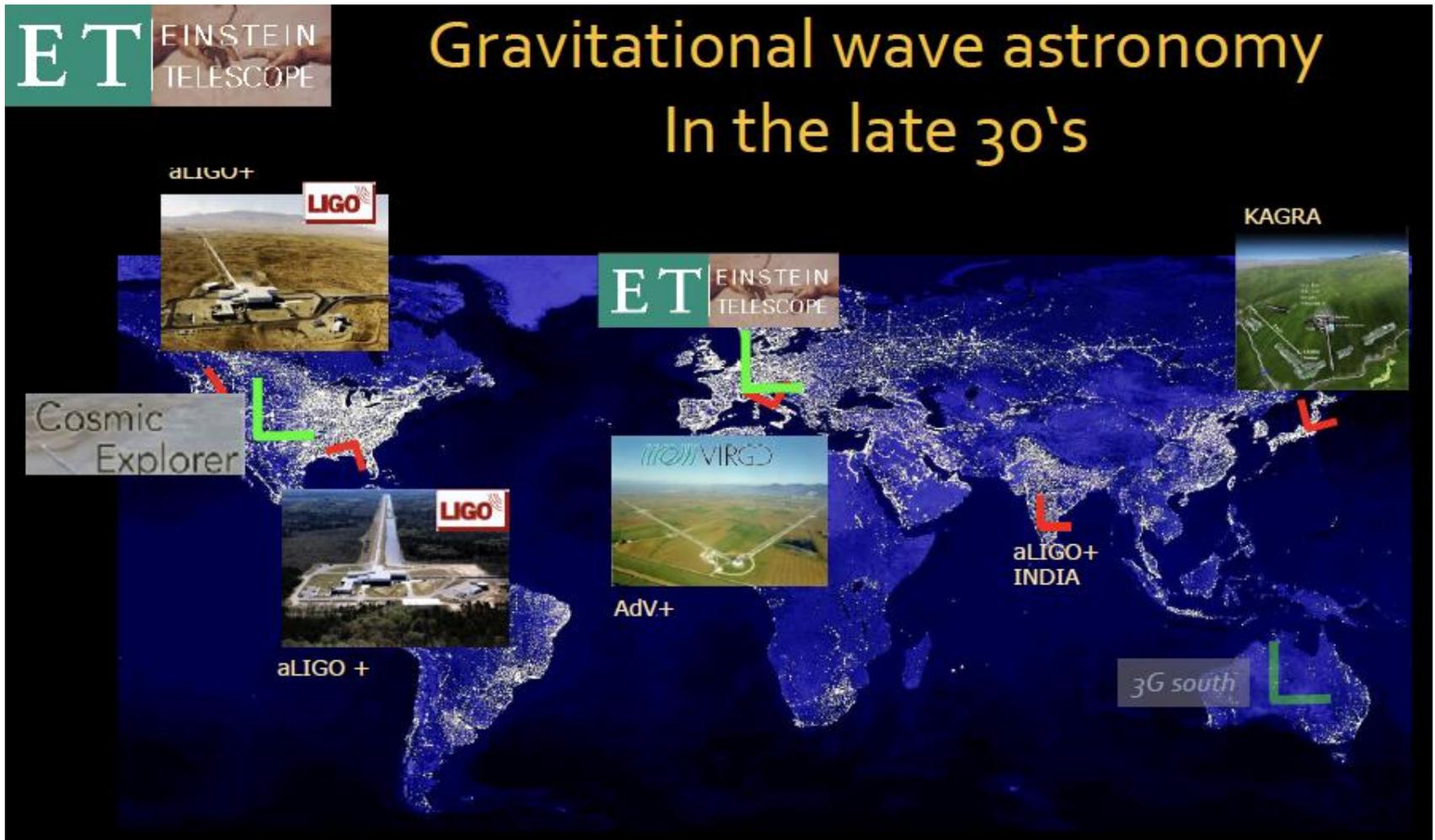
410 megaparsec lontano da noi ( $\sim 1$  miliardo di anni luce)

Evento che risale quindi a quasi un miliardo e mezzo di anni fa,

Massa  $\sim 29$ - $36$  Masse solari ciascuno.

Energia irradiata:  $\sim 3$  Masse solari

# Verso una maggiore sensibilità:



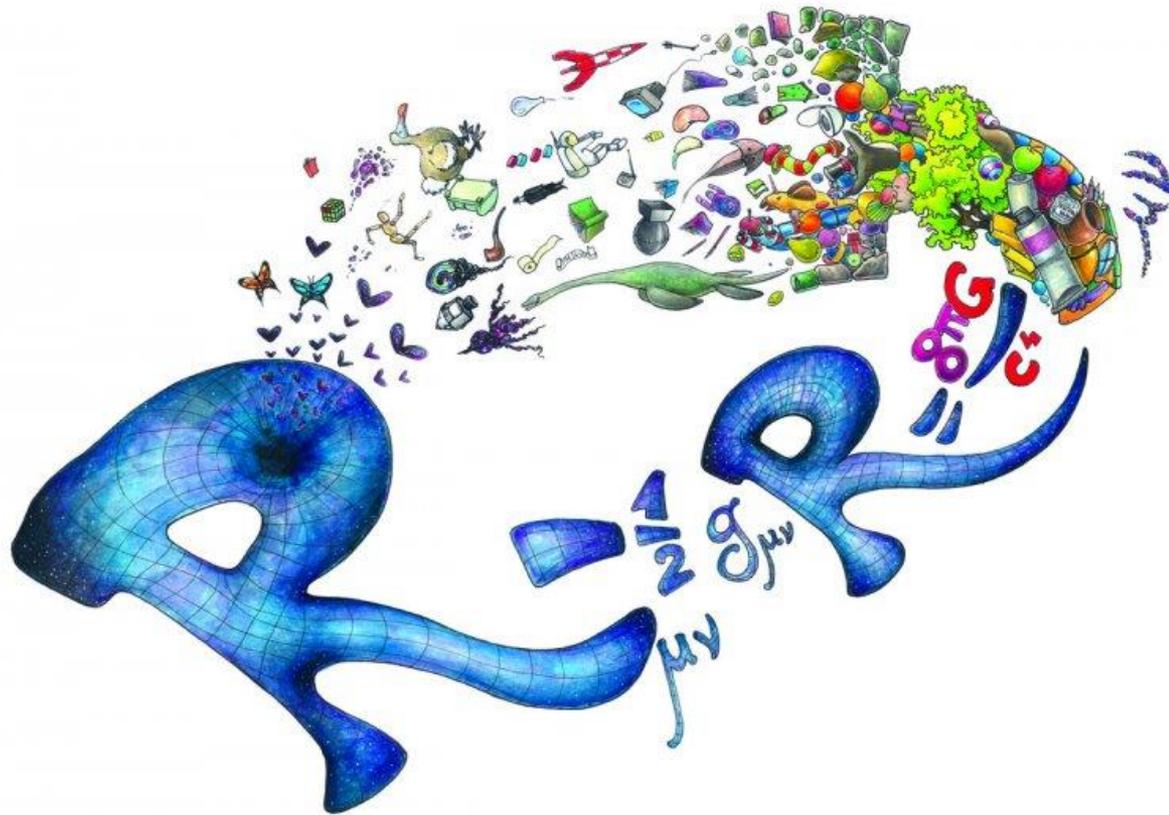
## Einstein Telescope

Siti candidati: Limburg (B-D-NL), Sardegna (IT)

# La più bella delle teorie della fisica

- Una rivoluzione del pensiero scientifico
- Bella, elegante nella sua formulazione
- Ha permesso di comprendere fenomeni della natura che vanno dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande
- Teoria robustissima: verificata sperimentalmente innumerevoli volte
- Nonostante il suo impatto ci sembri trascurabile per la nostra vita ha delle conseguenze anche per la tecnologia che usiamo tutti i giorni
- Come tutte le teorie fisiche, anch'essa non detto che sia l'ultima parola, e un giorno potrà essere superata da una teoria migliore, ma ancora non sappiamo se sarà necessario
- Problemi ancora aperti: per esempio mettere insieme relatività generale e meccanica quantistica...

# Una conclusione di Einstein



“Prima si pensava che se ogni cosa dovesse sparire improvvisamente dal nostro mondo, comunque sarebbero rimasti lo spazio e il tempo; dopo la relatività speciale e generale sono convinto che dovranno sparire insieme ad ogni cosa anche lo spazio e il tempo “

# Grazie per l'attenzione!



Associazione  
**UNIVERSITA'  
DEL TEMPO LIBERO  
DI CARAVAGGIO** *aps*

Piazza Morettini (Centro Sportivo)  
Tel 339 7091963  
[www.utlcaravaggio.org](http://www.utlcaravaggio.org)  
[utlcaravaggio@gmail.com](mailto:utlcaravaggio@gmail.com)

Per qualsiasi domanda sul tema:  
[giuseppe.battistoni@mi.infn.it](mailto:giuseppe.battistoni@mi.infn.it)