

CENT'ANNI DI RELATIVITA'



Albert Einstein, un uomo di sani principi scientifici

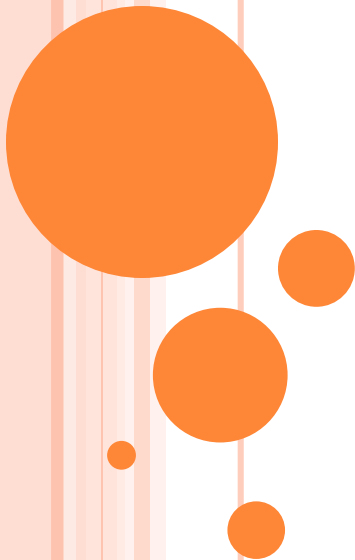


CENTENARIO DELLA RELATIVITÀ

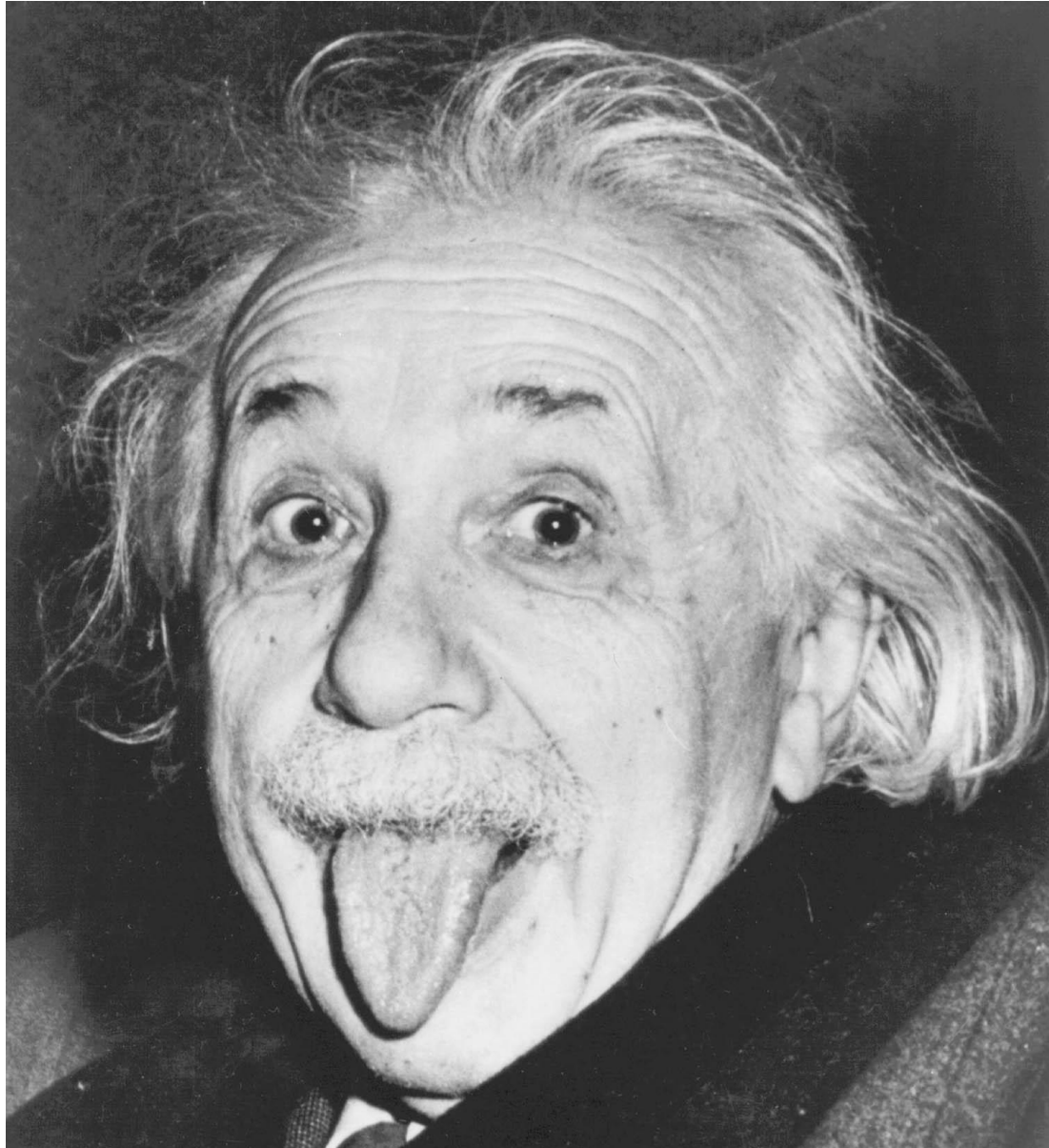
EINSTEIN

“UN UOMO DI SANI PRINCIPI SCIENTIFICI”

1905 – 1915. Dieci anni che sconvolsero il mondo.



EINSTEIN – UN GRANDE ICONA MEDIATICA

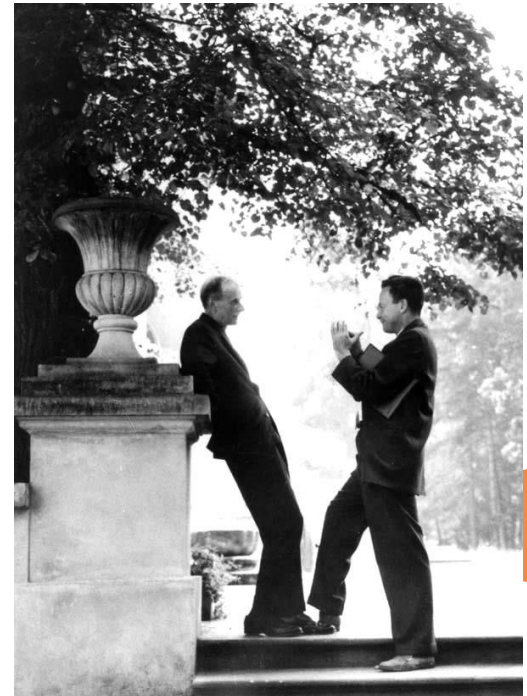
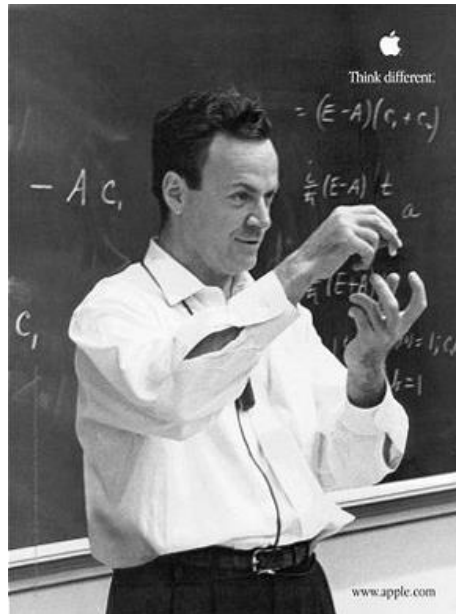
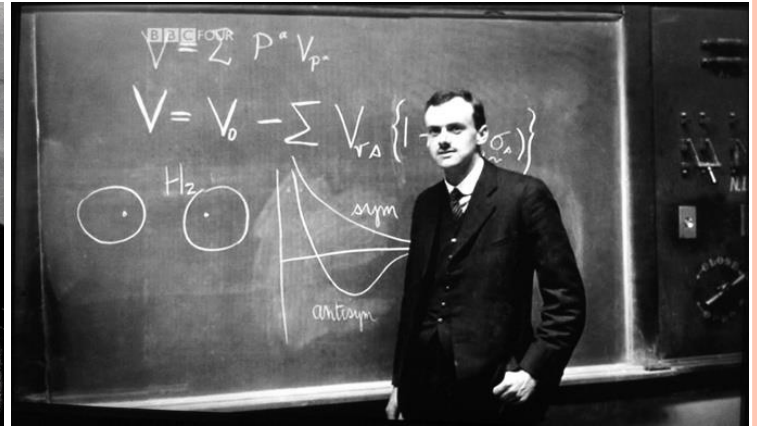
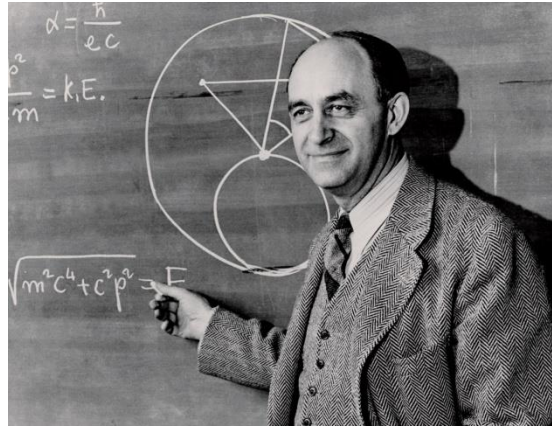
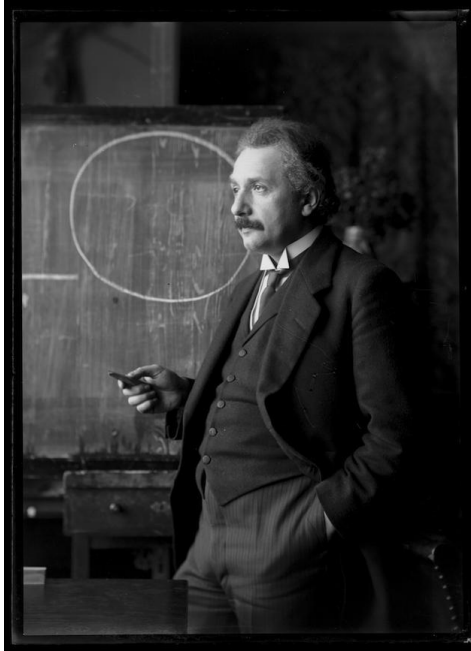


I PRINCIPI, LE IDEE, LE CREAZIONI

- Il principio di relatività
- Il principio della velocità massima
- La simultaneità è relativa
- Il tempo è relativo
- Massa e Energia
- Il principio di Equivalenza
- La gravità e la curvatura
- La caduta libera
- La curvatura dello spazio e del tempo
- La causa della curvatura
- Le equazioni di Einstein



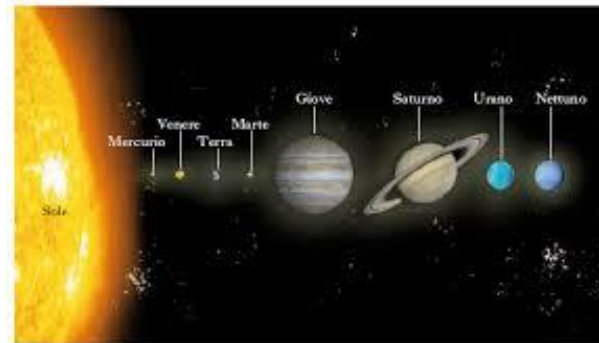
GLI STILI NELLA COMUNICAZIONE



BEVIAMO UN BICCHIERE D'ACQUA



Italia circa 1.100 km/h
Intorno all'asse terrestre



Terra circa 108.000 km/h
Intorno al Sole



Sole circa 828.000 km/h
Intorno al centro della Galassia



IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ

Beviamo un bicchiere d'acqua qui. In macchina in autostrada ...

Qui... sulla Terra in fuga nello spazio

- *Noi ci muoviamo a circa 1.100 km/ora. La Terra gira su se stessa!*
- *La Terra gira intorno al sole a circa 100.000 km/h* (giro – 365,25.. giorni)
- *Il Sole si muove nella Via Lattea a circa 800.000 km/h* (giro - 250 milioni di anni)
- *La galassia si muove*

Ma è come se stessimo fermi (*quasi*)

- *La Terra , nell'orbita intorno al Sole, ogni giorno curva di solo un grado circa!*
- *La Terra girando intorno a se stessa in 24 ore, gira di 15 gradi all'ora, (1/4 di grado al minuto)*
- *Andando a 120 km/h facciamo 2 km al minuto. 1/4 di grado corrisponde a circa 8 metri in 2 km, 4 metri ogni 1.000! Diciamo una curva molto dolce*

*Le leggi della natura sono le stesse in tutti i sistemi
che si muovono tra di loro a velocità costante*

Principio di invarianza dei sistemi inerziali

Ma non l'avevano già detto Galilei e Newton? No!



FACCIAMO UNA GARA DI VELOCITÀ



Formula 1 300 km/h



Aereo 900 km/h



Suono nell'aria 1.200 km/h



Aereo supersonico 2 – 3 mach



Razzi – Space Shuttle 28.000 km/h

Terra intorno al Sole 108.000 km/h - Sole nella Galassia 828.000 km/h

LUCE NELVUOTO 300.000 km/s (299 792,458 km/sec)

LA LUCE VELOCE, MA NON TANTO!

La luce e il telefonino

Un esercizio alla lavagna

$$300.000 \text{ km/sec} = 300.000.000 \text{ m/sec}$$

Tempo	Distanza
1 sec	300.000.000 metri
1 ms (<i>un millesimo</i>)	300.000 metri
1micro sec (<i>un milionesimo</i>)	300 metri
1 nano sec (<i>un miliardesimo</i>)	0,300 metri

LUCE NELVUOTO 300.000 km/s (299 792,458 km/sec)



IL PRINCIPIO DELLA VELOCITÀ MASSIMA

- Niente può andare a velocità infinita *(è il vero principio)*
- Esiste una velocità massima
- Se ce ne fosse una maggiore?
 - Diventerebbe quella massima
- Comunque la si misuri non può essere maggiore
- Quindi deve essere uguale per tutti
- La luce va *sempre* a questa velocità massima nel vuoto
 - Ma anche nell'aria è praticamente la stessa
 - In acqua no!

Esiste una velocità limite di propagazione delle interazioni ed essa è uguale in tutti i sistemi.

È una costante della natura c



L'OROLOGIO DI BERNA



Einstein va al lavoro presso l'ufficio brevetti di Berna

Le lancette, il quadrante e il tempo

Noi misuriamo il tempo attraverso la posizione della lancetta sul quadrante, ovvero la *coincidenza* tra lancetta e tacca.

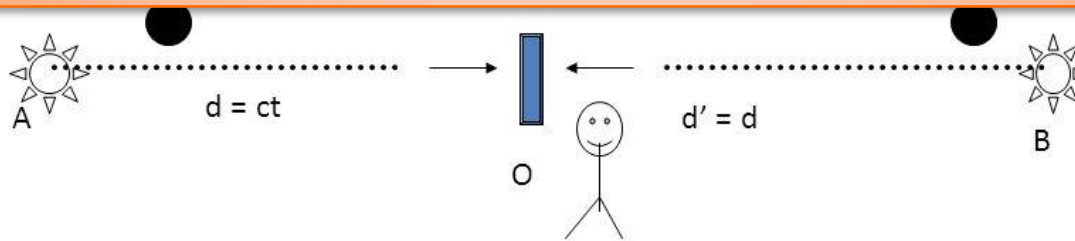


PASSA IL TRENO DI EINSTEIN E NOI SPARIAMO DUE RAGGI DI LUCE

Un viaggio sul treno di Einstein



Gli esperimenti mentali di Einstein.
Forse non ha mai toccato uno
strumento fisico nella sua vita



Per O', B è **prima** di A, perché va incontro al raggio corrispondente, mentre per O gli eventi sono per definizione simultanei se li vede insieme: **la simultaneità è relativa a sistemi di riferimento diversi!**

La simultaneità è relativa al moto degli osservatori

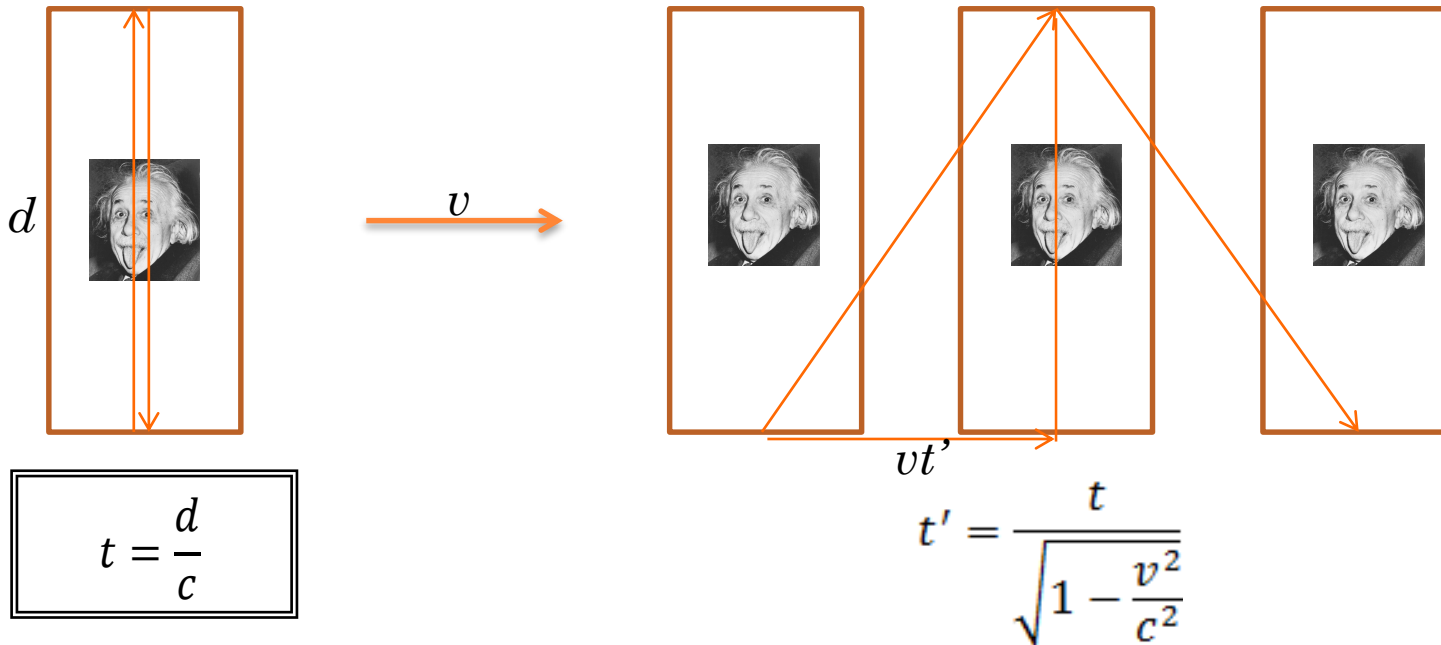
La velocità della luce è sempre c. Ricordiamocelo!



RIPASSA EINSTEIN SUL TRENO E NOI RIMANIAMO A TERRA

Il ticchettio dell'orologio di luce
Ovvero: viva il teorema di Pitagora!

$$(ct')^2 = (ct)^2 + (vt')^2$$



*Il tempo è relativo a ogni osservatore. Dipende dal sistema di riferimento.
Il tempo scorre più lentamente per chi va più veloce. Visto da chi sta fermo!
Per la luce non esiste il tempo! (Secondo noi)*

Bisogna sempre specificare rispetto a chi. I due osservatori!

L'OROLOGIO A LUCE DI EINSTEIN

A CIASCUNO IL SUO TEMPO (E IL SUO METRO)

○ Giovanotto Uno *“Quell’antipatico di Einstein”*

- Prendo il treno
- Sparo un raggio di luce contro uno specchio distante d
- Ricevo il raggio dopo un tempo (x 2)

$$t = \frac{d}{c}$$

○ Giovanotto Due *“Io, comune mortale”*

- Ho perso il treno
- Guardo i due raggi di luce sparati da Uno
- Il raggio ritorna dopo un tempo più lungo (x 2)

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

○ Il tempo è relativo *(e le lunghezze pure, contrazione!)*

- È una conseguenza della costanza della velocità della luce
- Per me che sono fermo il tempo scorre più velocemente rispetto a chi sta in movimento. *Dilatazione del tempo! (Secondo me!)*
- Per restare giovani bisogna correre!

Era il 30 giugno 1905 (aveva 26 anni)

L'UOVO DI EINSTEIN (UNA MIA STORIELLA)

Tutto era lì sul tavolo

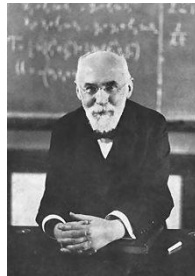
Grandi matematici e fisici avevano scritto tutte le equazioni
Funzionavano, ma non ne capivano il motivo, il significato

Arriva Einstein.....

“scusate basta prendere il treno sparare due raggi di luce”

Un poco di matematica di scuola media

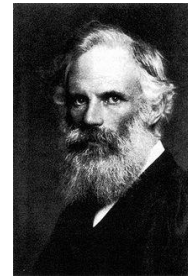
E l'uovo sta in piedi!



Lorentz



Poincaré



Fitzgerald

Erano cinquantenni,
famosi e bravissimi



Era ventiseienne, sconosciuto e poco esperto
Un poco montato e tanto cocciuto
Con una mente libera da pregiudizi
Grande capacità di immaginazione,
astrazione e concentrazione

E pensava da “fisico”!



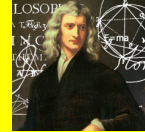
EINSTEIN + MAXWELL + NEWTON

- Einstein (+ Maxwell)
 - *La velocità della luce nel vuoto è costante*
 - *La simultaneità è relativa. Il tempo è relativo*
- Einstein applica le nuove formule alle leggi di Newton
 - *La massa aumenta con la velocità! (Giugno 1905)*
- Einstein in estate aggiunge tre paginette
(Settembre 1905)

Maxwell chi?



Newton



$$E = mc^2$$

Energia e Massa sono la stessa cosa!

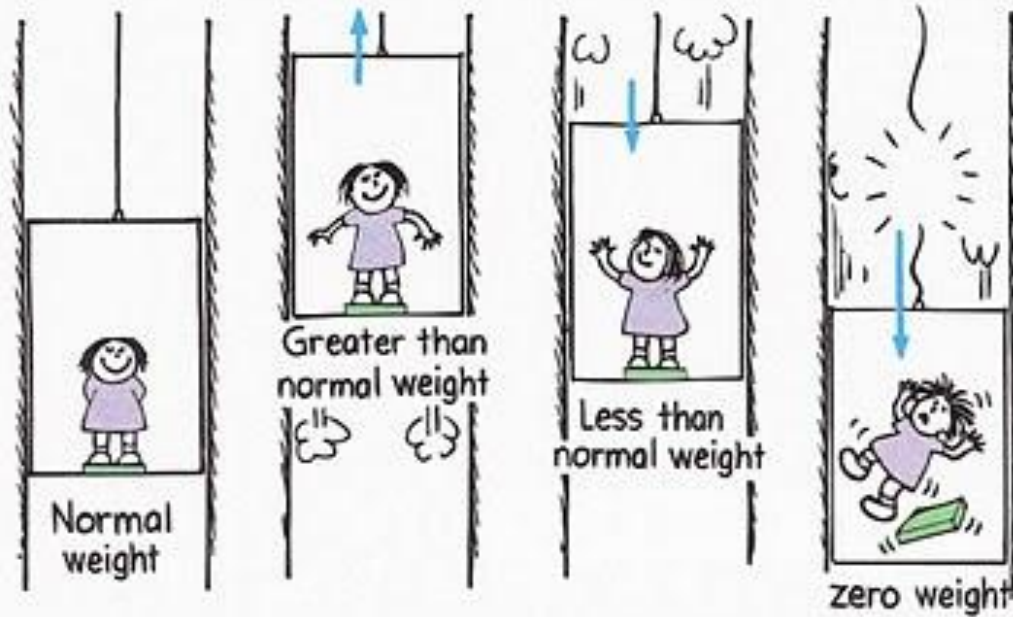
La formula più famosa di Einstein? Sì!

La formula più importante di Einstein? No!

Era il 27 settembre 1905



PRENDIAMO L'ASCENSORE DI EINSTEIN ACCELERAZIONE E GRAVITÀ



Come misuriamo il nostro peso?
Con una bilancia!
Acceleriamo la bilancia. Pesa?



E lo smartphone?

Principio di Equivalenza:

A livello locale non si può distinguere tra accelerazione e gravità

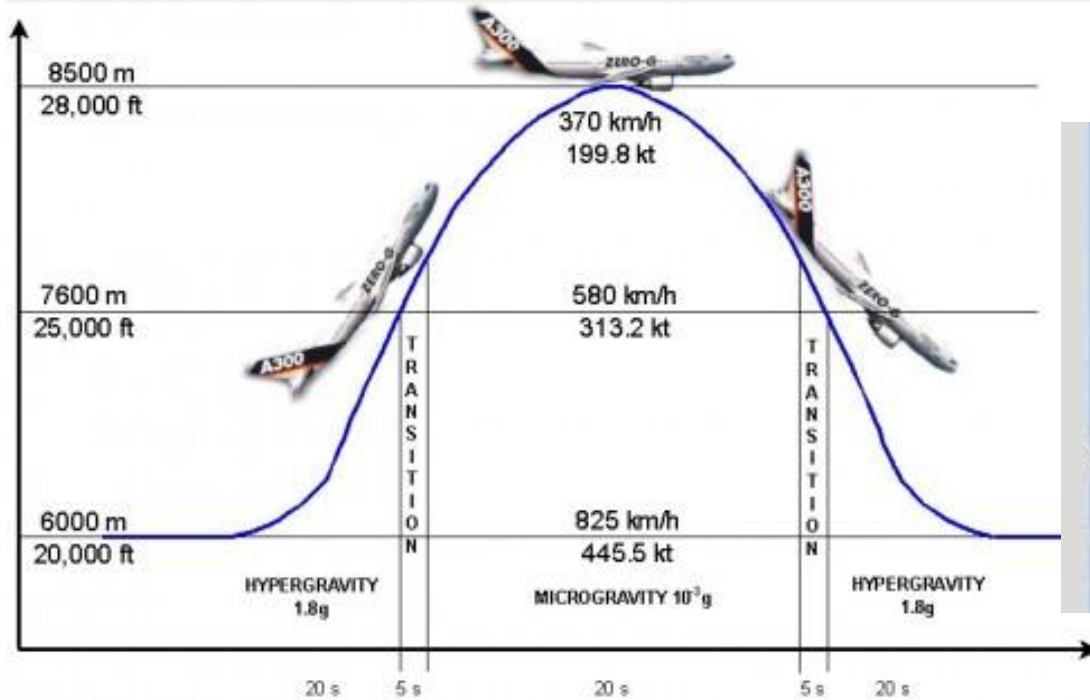
Se una persona è in caduta libera, non avverte il suo peso.

“Il pensiero più felice della mia vita”. A. Einstein

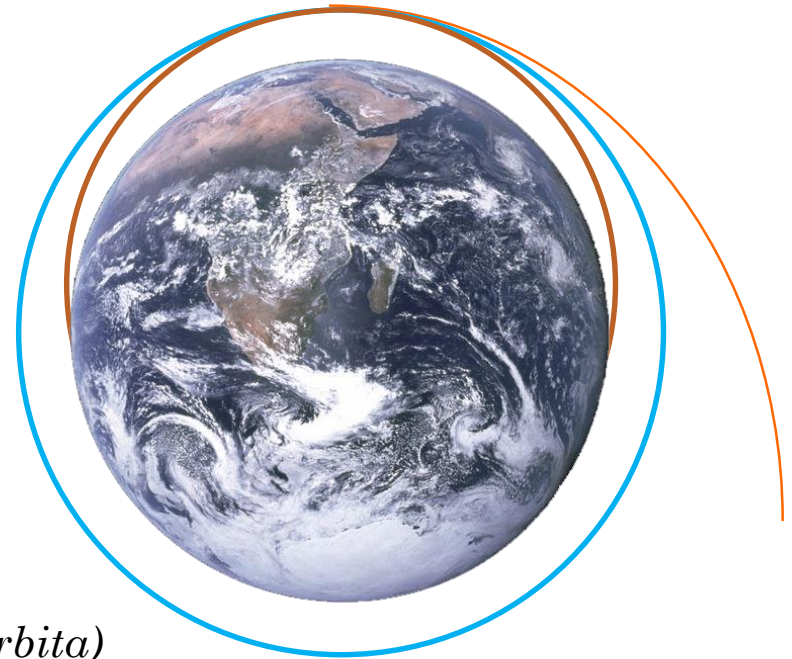
Era novembre 1907

*Tutti i corpi...
Galilei!*

SE UNA PERSONA È IN CADUTA LIBERA NON AVVERTE IL SUO PESO. (A. EINSTEIN)



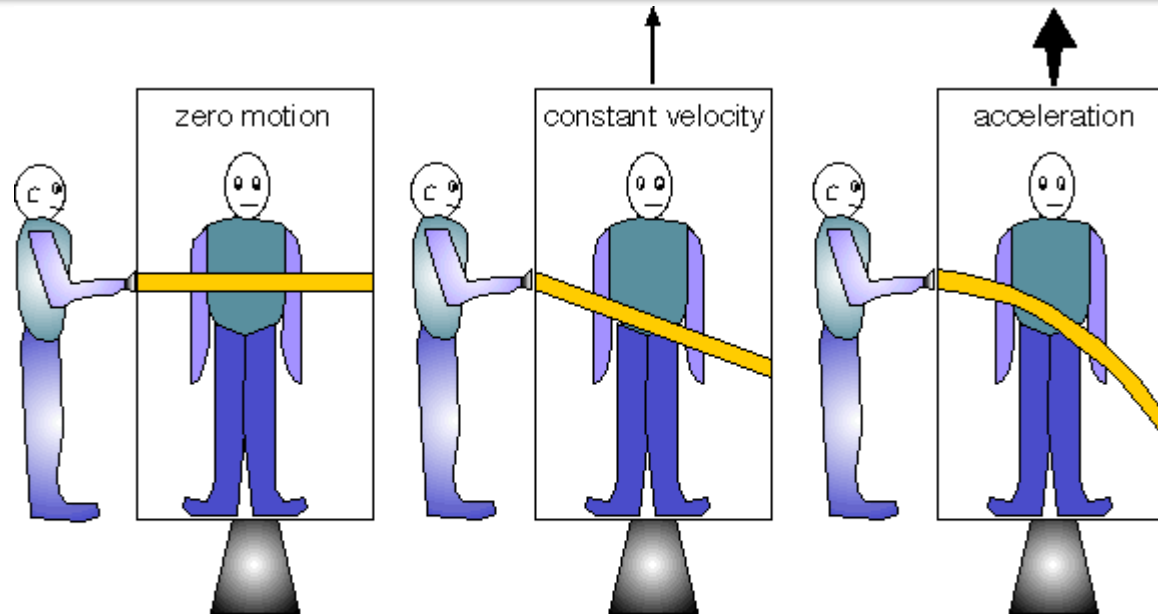
SE UNA PERSONA È IN CADUTA LIBERA NON AVVERTE IL SUO PESO. (A. EINSTEIN)



- Paolo cade insieme alla stazione spaziale intorno alla Terra *(in orbita)*
- La Luna cade intorno alla Terra *(in orbita)*
- La Terra cade intorno al Sole *(in orbita)*
- Il Sole cade intorno alla Via Lattea ----
- Tutti cadono continuamente.



LA LUCE SI INCURVA LEGGERMENTE IN UNA ASCENSORE ACCELERATO



Essendo accelerazione e gravità equivalenti →

- La luce va dritta per la sua strada
- La sua strada è incurvata dalla gravità
- La luce si incurva passando vicino alla Terra o al Sole
- La gravità deforma lo spazio. Lo spazio diventa curvo

La Gravità e la Curvatura dello Spazio
Gravità uguale Curvatura (Parola di A. Einstein)



LA GRAVITÀ NON ESISTE?

Il punto di vista di Einstein

- Non c'è una forza
- C'è uno spazio deformato.
- Noi cadiamo “in caduta libera”
- Togliamo il tavolo, la sedia, il pavimento, la Terra
- Immaginazione e fantasia
- Seguiamo la via più “dritta”, più breve: *La Geodetica*
- La Terra che gira intorno al Sole, va più dritta che può

- Strano? No!!!!
- Esempio. La Terra non è piatta. E siamo abituati ad andare dritti “curvando”

Ogni corpo (anche noi) cade “in caduta libera” nello spazio incurvato dalla gravità

Attenzione
stiamo
cascando!



LA TERRA NON È PIATTA.

UN FILO SUL MAPPAMONDO. LA ROTTA AEREA

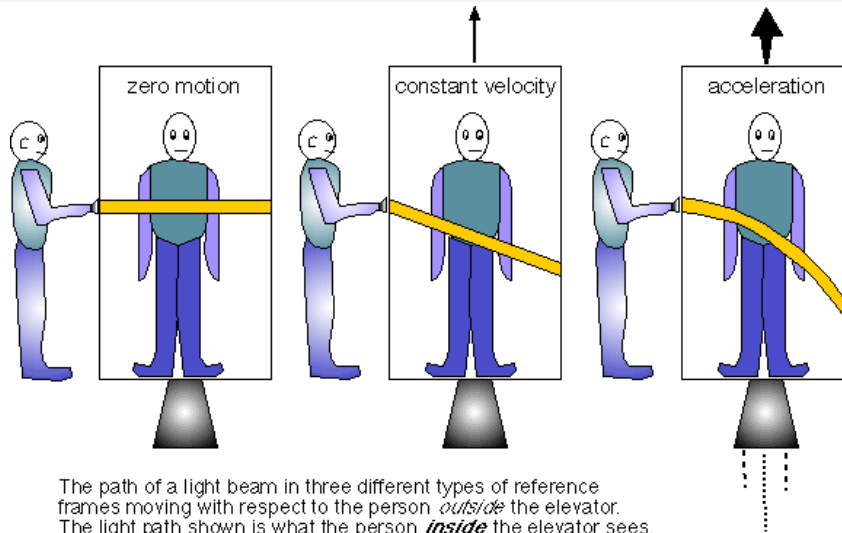


1. QF 7 Sydney - Dallas (Qantas)
2. DL 201 Johannesburg - Atlanta (Delta Air Lines)
3. EK 215 Dubai - Los Angeles (Emirates)
4. QF 8 Dallas - Brisbane (Qantas)
5. EK 211 Dubai - Houston (Emirates)

6. EK 225 Dubai - San Francisco (Emirates)
7. CX 831 New York - Hong Kong (Cathay Pacific)
8. UA 117 Newark - Hong Kong (United Airlines)
9. QR 77 Doha - Houston (Qatar Airways)
10. EK 221 Dubai - Dallas (Emirates)



LO SPAZIO SI INCURVA E IL TEMPO? RALLENTA!



The path of a light beam in three different types of reference frames moving with respect to the person *outside* the elevator. The light path shown is what the person *inside* the elevator sees. Under large acceleration, the beam of light will curve downward. It should also do that in a region of strong gravity.

Se c'è accelerazione, la luce:

- Deve percorrere più spazio
- Sempre alla stessa velocità
- Ci vuole più tempo
- Il ticchettio del suo orologio rallenta
- Per lui il Tempo Rallenta
- *Rispetto a me!*
- Ma ci vuole ben altra matematica

Poiché accelerazione e gravità hanno gli stessi effetti, per noi che stiamo al mare il tempo scorre più lentamente del nostro cugino che abita in montagna (ma di molto poco). (*Attenzione a tutti i dettagli!*)

*La Gravità e la Curvatura dello Spazio e del Tempo
Gravità uguale Curvatura dello Spaziotempo. Il Campo!*

08/1913 Einstein afferrò il braccio di Marie Curie: “*Capisce, io ho bisogno di saper cosa succede alle persone chiuse in un ascensore quando casca nel vuoto*”.

L'OROLOGIO SUL TAVOLO, L'OROLOGIO PER TERRA, L'OROLOGIO NELLA PALLA



Con gli orologi atomici
(non con quelli in figura)
bastano pochi minuti per vedere
che i due orologi
non segnano più lo stesso tempo



La palla segue la traiettoria ottimale
per impiegare il tempo minore!

“Basta un poco di Matematica Universitaria,
ma a partire dalla formulazione di Einstein ”



QUALE LA CAUSA E QUALE L'EFFETTO? IL CAMPO GRAVITAZIONALE

- Chi genera la “forza di gravità”?
 - La massa della Terra, del Sole, delle Stelle,
- Chi genera la curvatura dello spazio?
 - La massa della Terra, del Sole, delle Stelle,
- Chi rallenta gli orologi?
 - La massa della Terra, del Sole, delle Stelle,

“Le masse *dicono* allo spazio come curvarsi e al tempo come rallentare”
“Lo spazio curvo e il tempo rallentato *dicono* alle masse come muoversi”

John Archibald Wheeler (1911-2008)



**Come in una
danza!**

**Il gioco della
tenda**

MA COME? DI QUANTO?

L'Equazione più importante di Einstein

Curvatura = Massa/Energia

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Otto anni di intenso lavoro, pensiero, studio per passare dal “pensiero felice” del 1907 alla formulazione di questa equazione. Otto anni di errori, insuccessi ma di grande determinazione e fiducia di arrivare in fondo.

L'espansione dell'Universo, i buchi neri, il moto delle galassie e delle stelle, derivano soprattutto da questa formula. Anche il GPS!

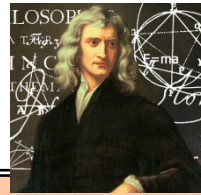
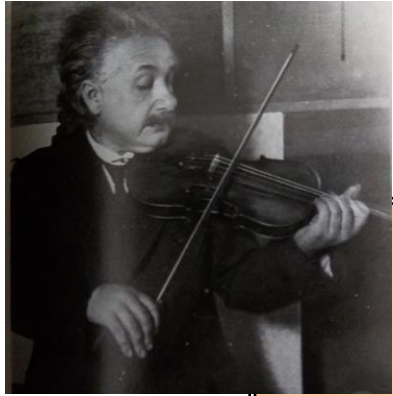
Era novembre 1915 (aveva 36 anni)

Attenzione al segno

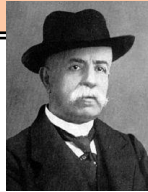


UNA GRANDE SINTESI.

L'Equazione più importante di Einstein



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



La sintesi degli studi di grandi scienziati e matematici

La Relatività “parla Italiano”

Le equazioni del Campo Gravitazionale

IN SINTESI.

Il Campo Gravitazionale e lo SpazioTempo sono la stessa cosa!

Sono sinonimi

Lo SpazioTempo è una realtà dinamica.
Non uno scenario dove si svolgono i fenomeni,
ma parte attiva nei fenomeni fisici.

L'EQUAZIONE DI EINSTEIN ANCHE SUI TRENI!



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

UN NOVEMBRE (1915) AL CARDIOPALMA

Einstein tiene quattro letture sulla Teoria della Relatività.
4, 11, 18 e 25 Novembre all' Accademia di Prussia di Berlino

- 4-11 Einstein presenta le equazioni del campo in forma non-covariante
 - *non ha ancora la soluzione corretta (cosiddetta covariante)*
- 11-11 Einstein modifica le equazioni del campo per renderle covarianti, con l'ipotesi che "the trace of the energy-momentum"
 - *ma non sono ancora corrette*
- 18-11 Einstein presenta il calcolo della precessione del perielio di Mercurio
 - *calcolo corretto, ma non ha ancora la forma corretta delle equazioni di campo*
- 25-11 Einstein presenta le equazioni di campo corrette!

Le leggi della Natura sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento
Principio di covarianza delle leggi della Natura. (se scritte in modo covariante)



I BUCHI NERI

Le Equazioni di Einstein sono impossibili da risolvere (parola di Enstein!)
Ma a Gennaio 1916, due mesi dopo la pubblicazione, Karl Schwarzschild trova la soluzione esatta per un corpo sferico (e del prototipo di un buco nero!)



Creiamo un buco nero

Buttiamo un orologio in un buco nero

Buttiamoci in un buco nero

Giriamo (alla larga) intorno a un buco nero



LENTI GRAVITAZIONALI! *CURVE, LENTI..*

Immagine (seria) di una galassia che sta dietro



Gravitational Lens in Abell 2218

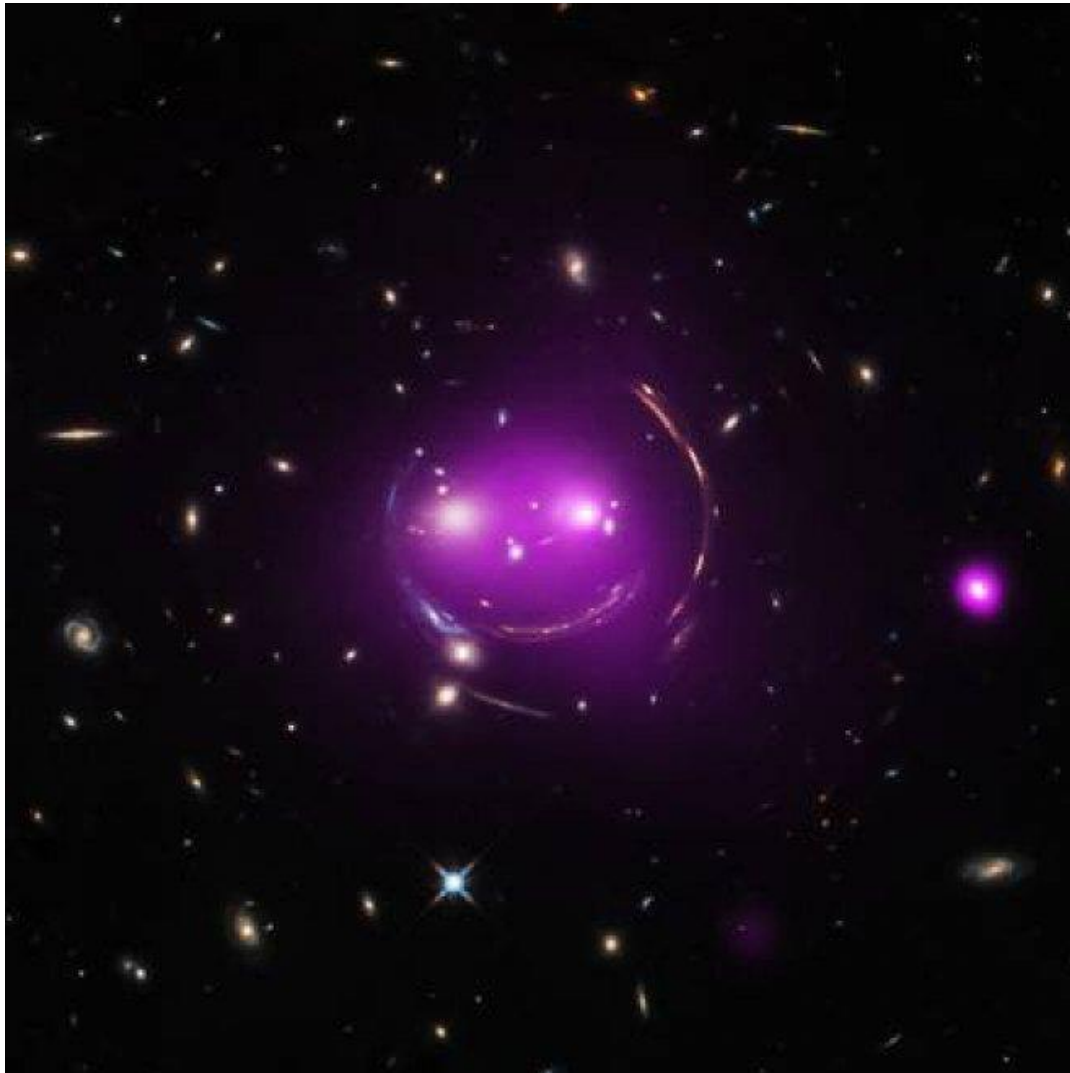
HST · WFPC2

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



LENTI GRAVITAZIONALI! *CURVE, LENTI..*

Immagine (divertente, ma vera!) di una galassia che sta dietro



Il Gatto
Cosmico!



ONDE GRAVITAZIONALI

Le Equazioni di Einstein sono impossibili da risolvere (parola di Einstein!)

Ma.... ***il 22 giugno 2016 predice le onde gravitazionali***

- Nei casi usuali la deformazione dello spazio è piccola. Le curvature sono molto leggere. La via (geodetica) è praticamente dritta
 - (ricordate la Terra intorno al Sole, il Sole intorno alla Galassia..)
- Con queste condizioni, le equazioni di Einstein si semplificano e descrivono un'onda (anzi 10).
 - ***Le onde gravitazionali!***
- ***Domandine***
 - *Come fa la Terra a seguire il Sole che gira intorno al centro della Galassia (gira intorno al Sole tipo elica)?*
 - *Qual è la velocità di queste onde?*
 - *Su cosa si propaga?*
 - *Cosa vibra?*
 - *Come le osservo (e misuro)?*



VIRGO – CASCINA (PISA)

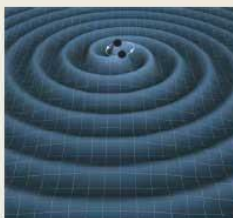
UN ESPERIMENTO SOPRAFFINO

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.

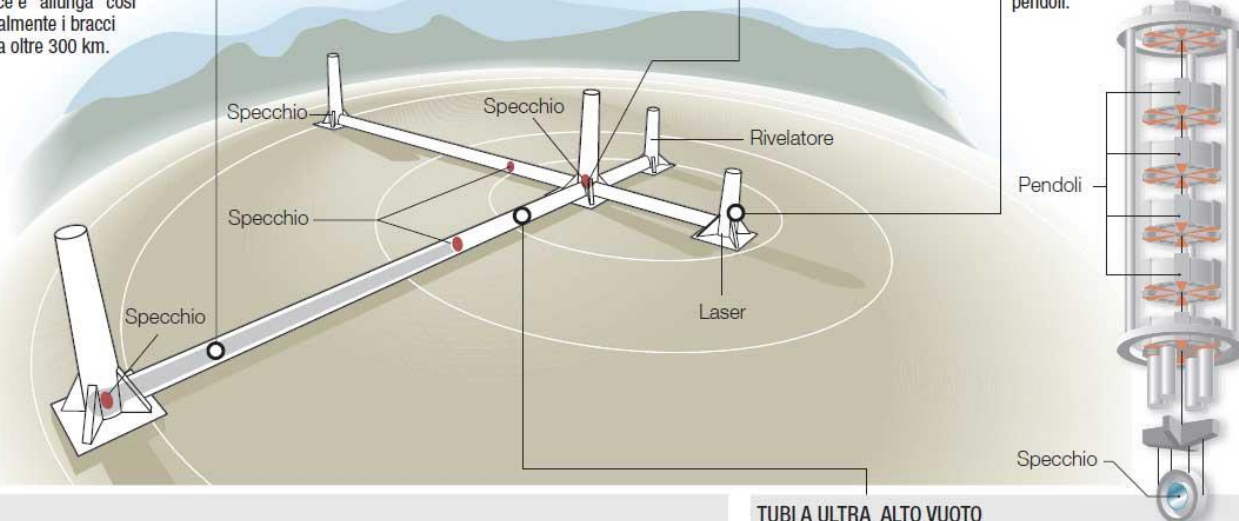
Serve ad amplificare l'effetto del passaggio dell'onda gravitazionale.

SPECCHIO SEMITRASPARENTE

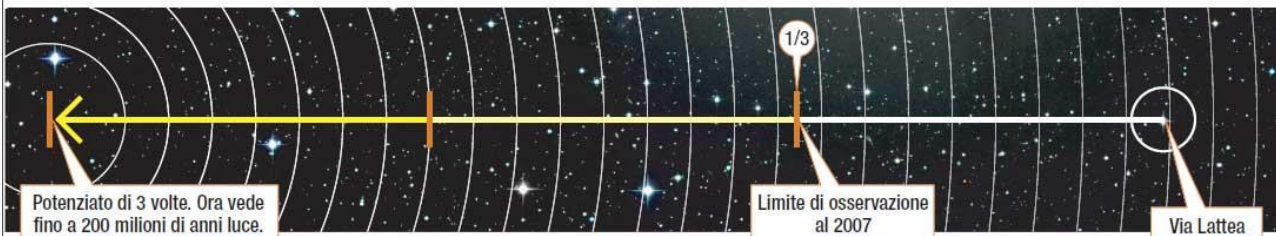
Divide il fascio laser incidente in due componenti uguali mandate nei due bracci dell'interferometro.

LE TORRI

Proteggono al loro interno gli specchi. Ogni specchio è sospeso a 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. Cioè in ultra alto vuoto.



ELISA ESA

UN ESPERIMENTO INCREDIBILE

eLISA: Astrophysics and cosmology in the millihertz regime

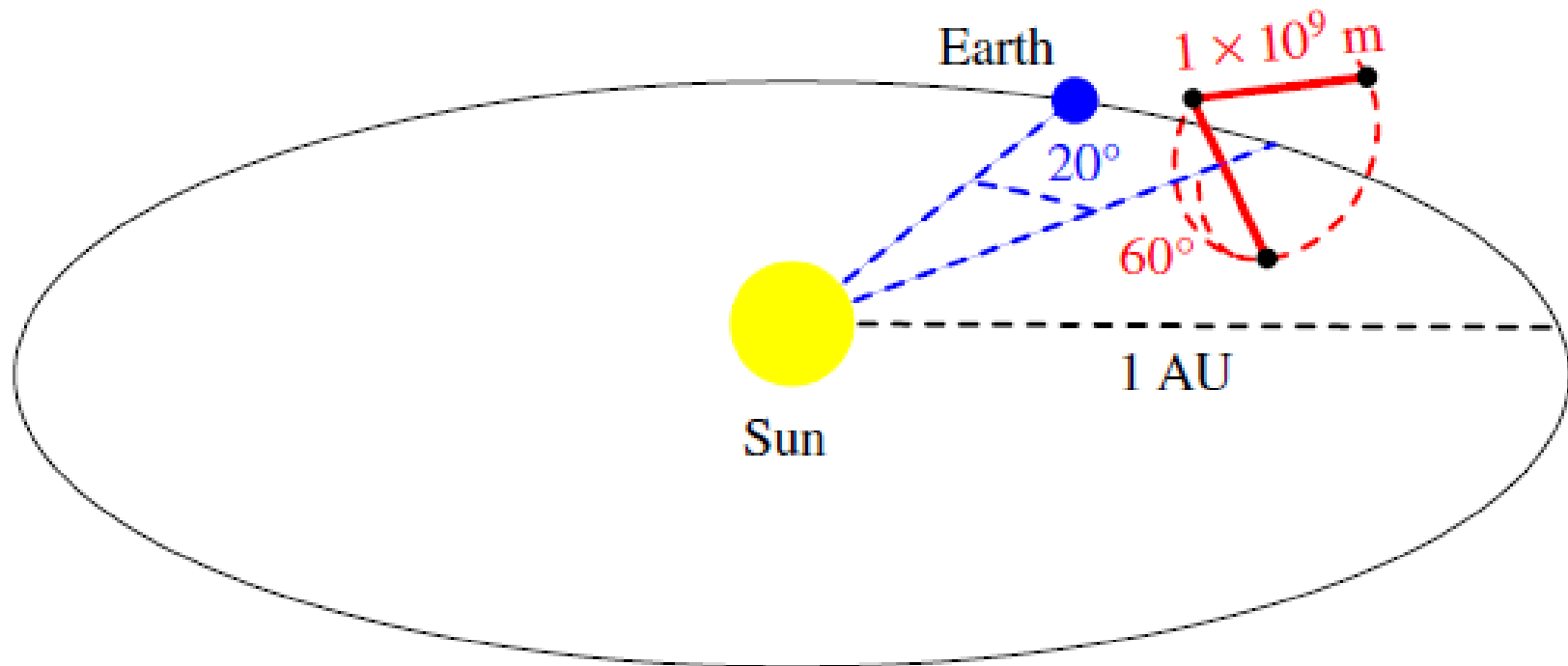
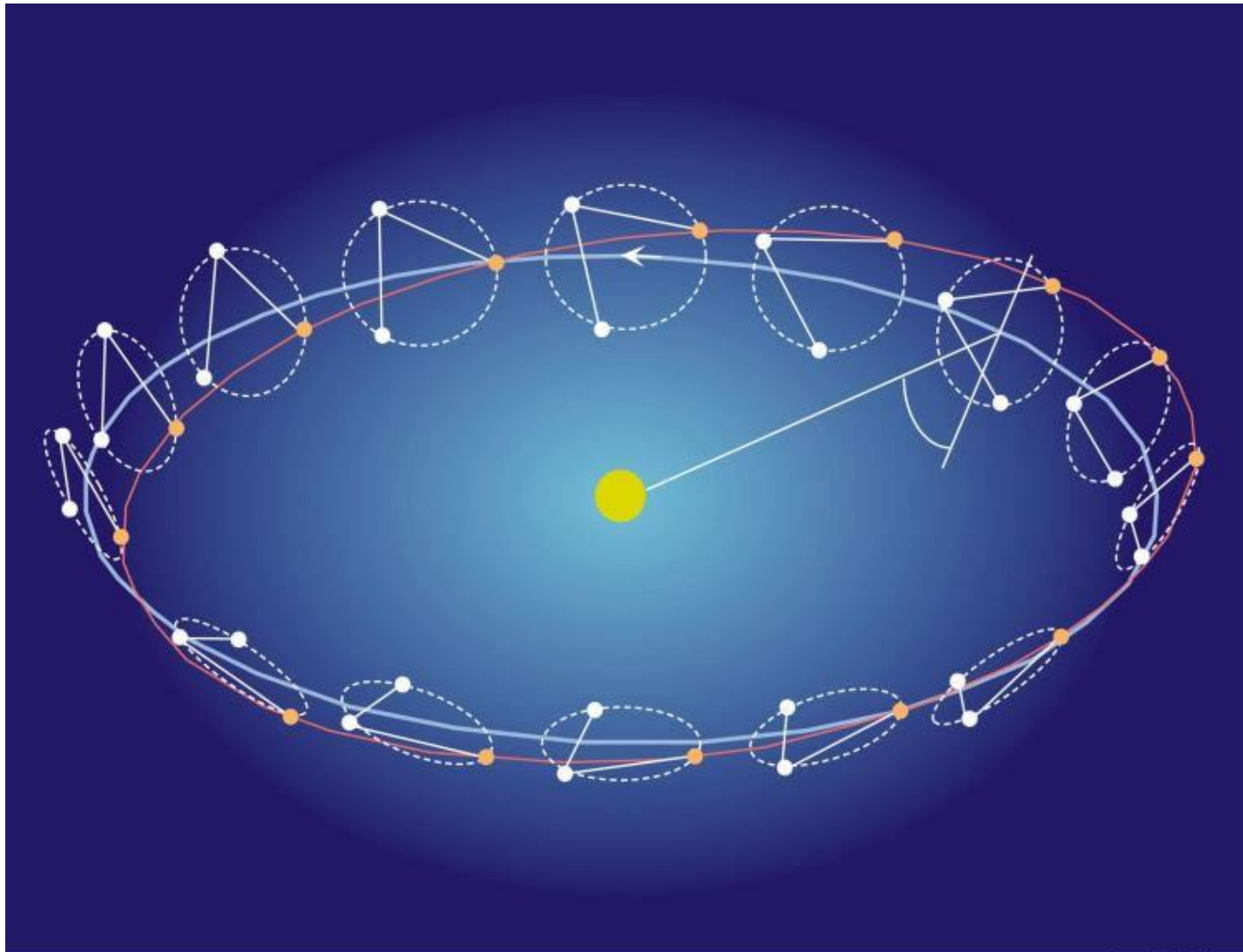


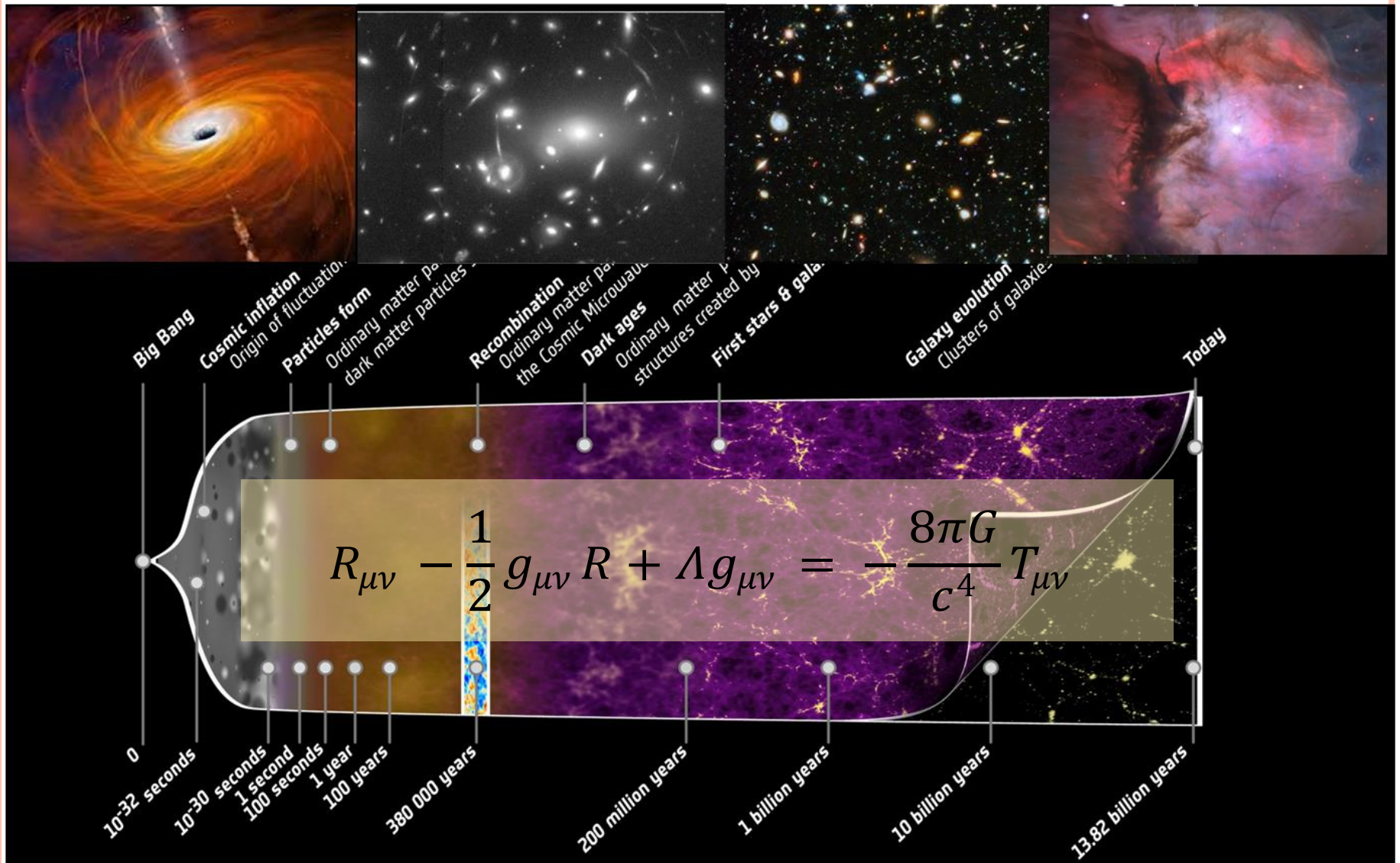
Figure 1: The eLISA orbits: The constellation is shown trailing the Earth by about 20 degrees (or $5 \times 10^{10} \text{ km}$) and is inclined by 60 degrees with respect to the ecliptic. The trailing angle will vary over the course of the mission duration from 10 degrees to 25 degrees. The separation between the spacecraft is $L = 1 \times 10^9 \text{ m}$.

ELISA ESA

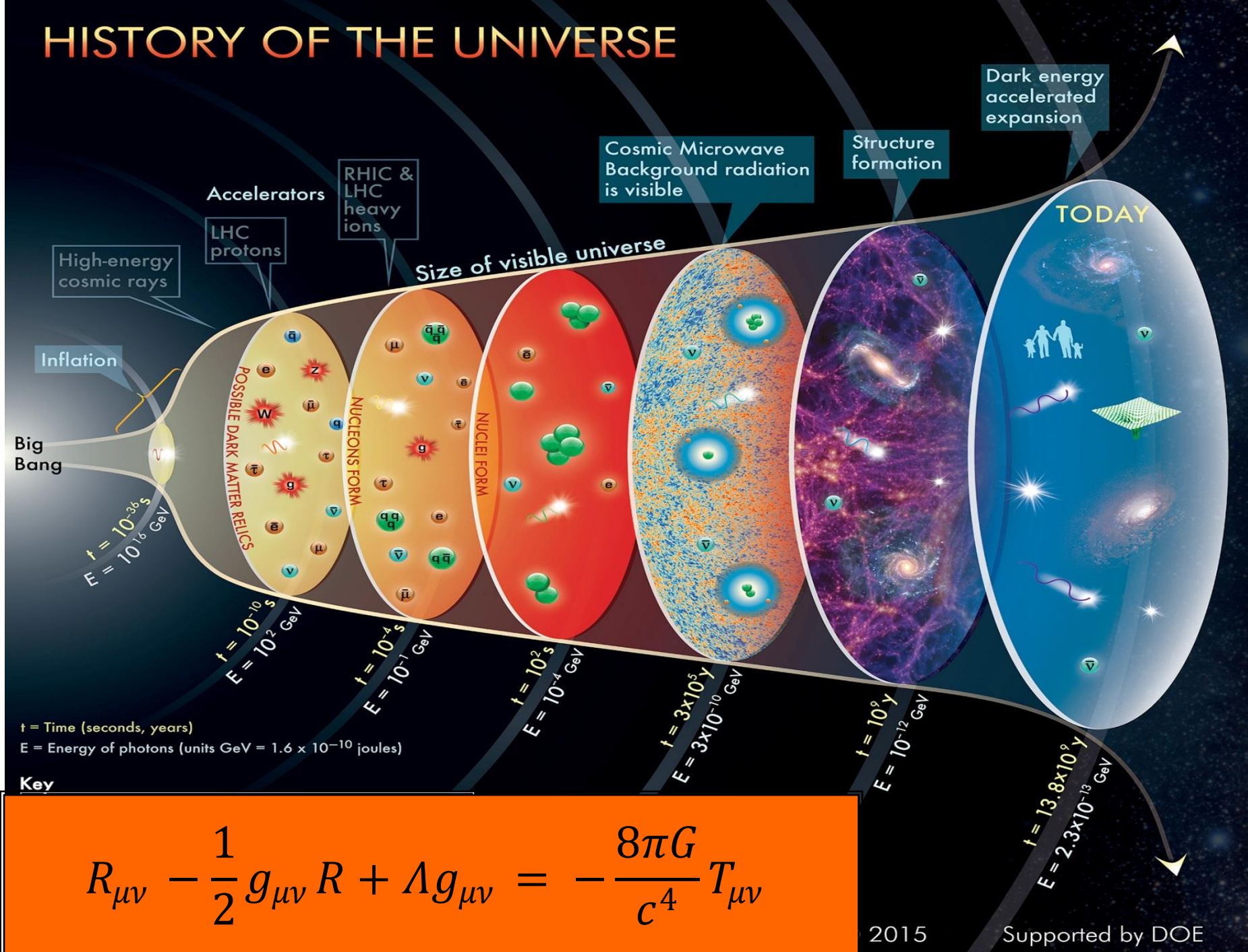
UN TELESCOPIO A ONDE GRAVITAZIONALI!



L'UNIVERSO



HISTORY OF THE UNIVERSE



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

IMMAGINAZIONE, CREATIVITÀ, CORAGGIO

Ancora oggi Le Equazioni del Campo di Einstein sono oggetto di studi, ricerche e previsioni

Le Equazioni del Campo superavano di gran lunga la capacità di immaginazione, creatività e coraggio dello stesso Einstein!

Ma Non sono esatte!

Tutte le teorie fisiche hanno un campo di validità e un livello di approssimazione
La frontiera della ricerca fisica fondamentale cerca di conciliare le due grandi teorie:
• la Meccanica Quantistica e la Relatività Generale

Teoria delle Stringhe e Gravità Quantistica a Loop sono due delle linee di ricerca
La struttura fondamentale dello spazio e del tempo sono l'oggetto della ricerca
Filosofi e Fisici sono in campo ancora una volta insieme
(es. Rovelli, Dorato)

Salvatore Aglieri Rinella
s.aglieri@gmail.com

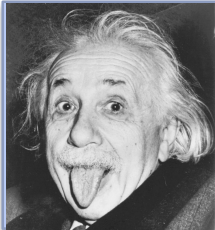
CENTENARIO DELLA RELATIVITÀ

EINSTEIN

“UN UOMO DI SANI PRINCIPI SCIENTIFICI”

1915 – 2015. Cento anni di Relatività

THE END



ALBERT EINSTEIN

1879, ULMA - 1955, PRINCETON

“LUCE, SPAZIO, TEMPO, GRAVITÀ,”

Il Padre della Fisica Moderna a cavallo di un raggio di luce..



12/1894 Fugge dalla Germania per venire in Italia

03/1905 Ipotezza i “Quanti di Luce”. In seguito Fotoni!

05/1905 Dimostra l'esistenza degli atomi

06/1905 Relatività Ristretta: Spazio, Tempo e Luce

09/1905 La sua formula più famosa

$$E = mc^2$$

11/1907 “Il pensiero più felice della mia vita”

08/1913 Einstein afferrò il braccio di Marie Curie:

“Capisco, io ho bisogno di sapere cosa succede alle persone che in un ascensore quando casca nel vuoto”.

11/1915 Einstein presenta la teoria della Relatività

1917 Scopre l'espansione dell'Universo, ma “non ci crede”

1917 Scopre le leggi del futuro Laser (gli A. E. di Einstein)

1918 Scopre l'energia oscura ma lo considererà il suo più grave errore

UN TIPO PARTICOLARE
UNA BIO IN BREVE
DEI SUOI PRIMI 40 ANNI

2015 L'ANNO DELLA LUCE

Il secondo è definito come la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini, da $(F=4, MF=0)$ a $(F=3, MF=0)$, dello stato fondamentale dell'atomo di Cesio 133

Il metro è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un tempo di $1/299\,792\,458$ di secondo

