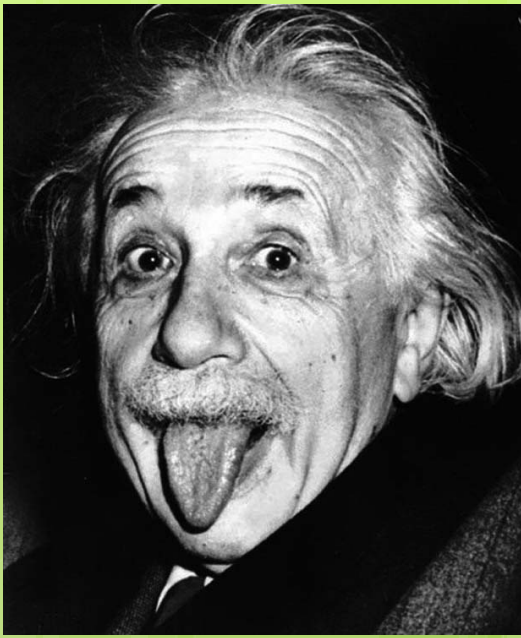




Tutto è relativo. Prendi un
ultracentenario che rompe
uno specchio: sarà ben lieto
di sapere che ha ancora
sette anni di disgrazie.

Liceo Scientifico "F. Severi"
Salerno

20 dicembre 2016

Einstein: 1916-2016

100 anni di
Relatività Generale

Teoria della relatività ristretta

I postulati che Einstein assunse come base per la sua *Teoria della relatività speciale o ristretta (1905)*, valida nel caso di sistemi in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro, sono i seguenti:

PRIMO POSTULATO

Principio di relatività ristretta

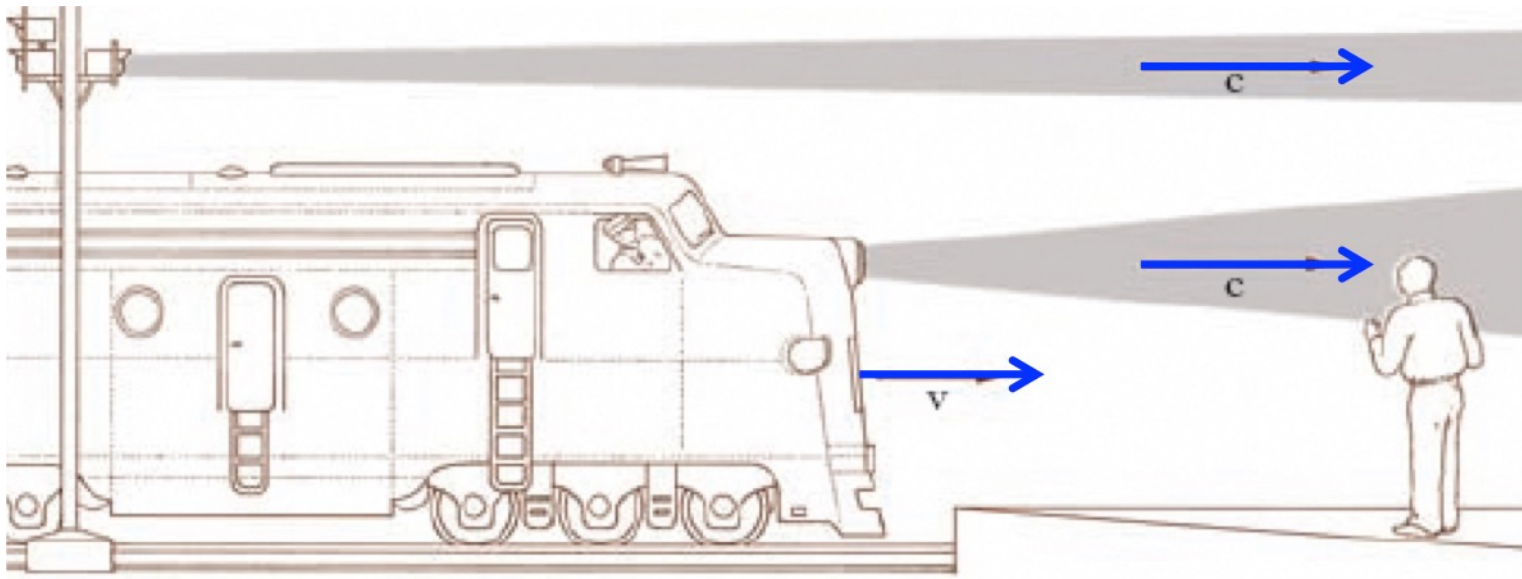
Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

SECONDO POSTULATO

Principio di invarianza della velocità della luce

La velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali, indipendentemente dal moto del sistema stesso o della sorgente, da cui è emessa la luce, rispetto all'osservatore.

Però, il postulato dell'invarianza della velocità della luce sembrava incompatibile con il principio di relatività: *cosa misura l'osservatore per la velocità c della luce emessa dal treno?*



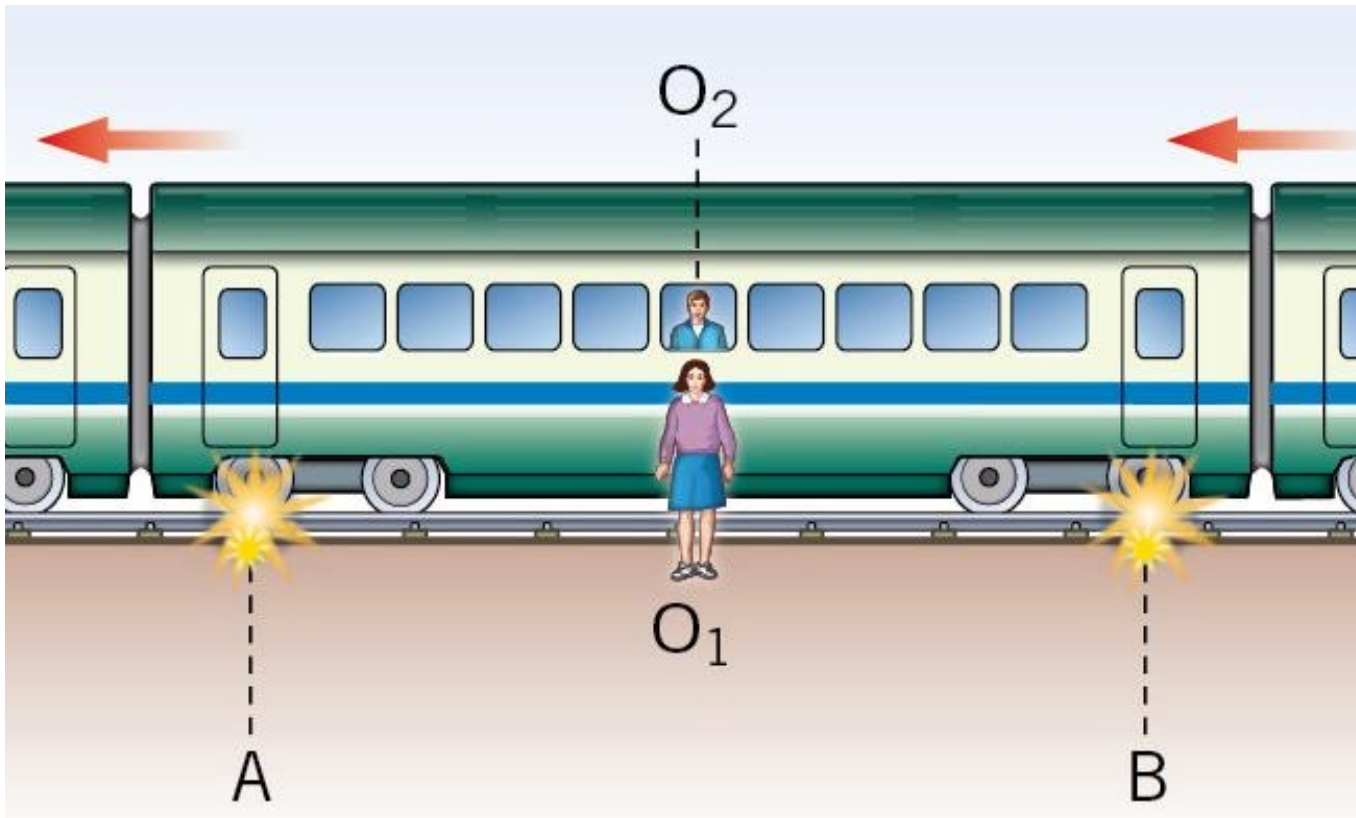
Come superare l'apparente incompatibilità?

Einstein, attraverso uno dei più eleganti ed audaci balzi d'immaginazione della storia della fisica e della scienza in generale, si accorse che bisognava modificare drasticamente le idee sullo spazio e sul tempo che da secoli erano considerati due enti del tutto indipendenti e che, nei suoi *Principia*, Newton così scriveva:

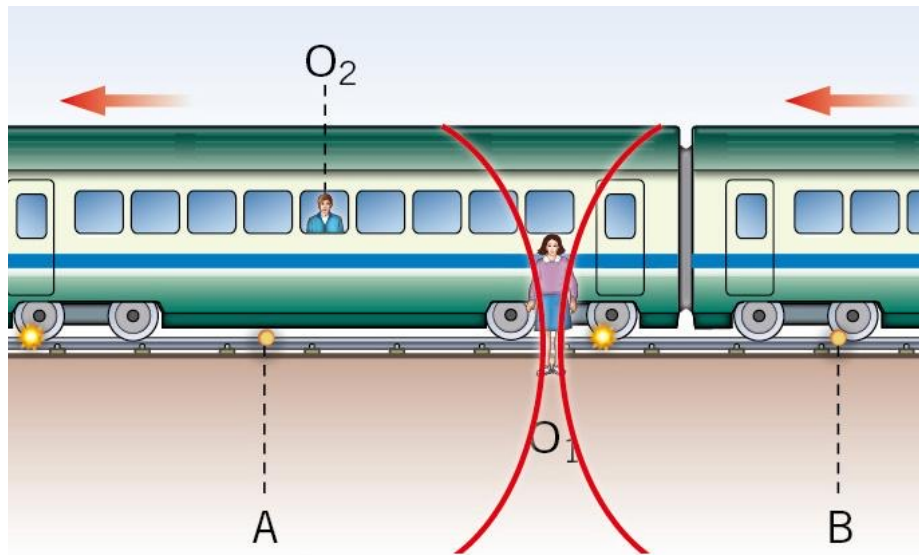
- *Lo spazio assoluto, per sua natura, resta sempre tale e invariabile senza alcuna relazione con l'esterno;*
- *Il tempo assoluto, vero e matematico, per sua natura scorre allo stesso modo, senza alcuna relazione con l'esterno.*

La teoria della relatività ristretta fece crollare non solo l'esistenza di uno spazio e di un tempo assoluti, ma anche il loro carattere di enti indipendenti.

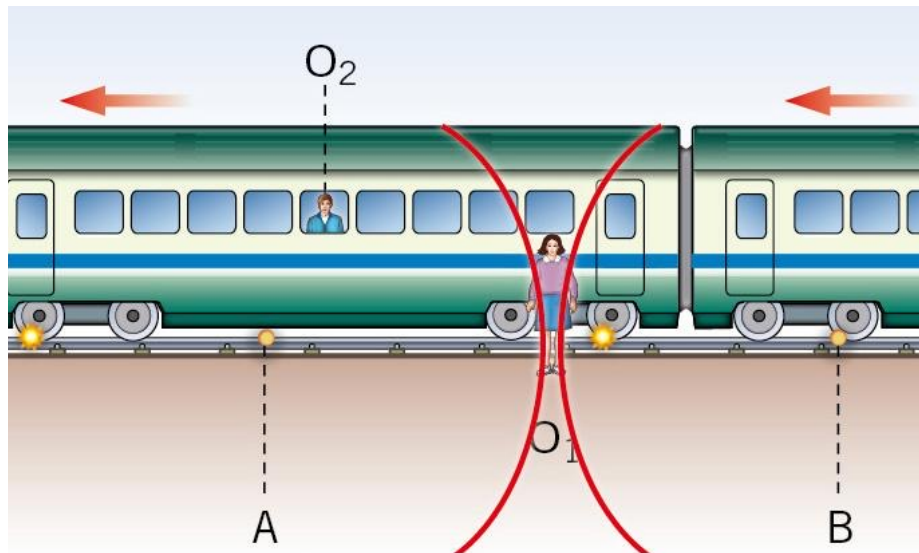
L'intuizione decisiva fu che due eventi i quali sembrano essere simultanei a un osservatore non appariranno tali a un altro osservatore che si muove rapidamente rispetto al primo.



Quando vengono emessi i due lampi in A e B, i due osservatori O_1 e O_2 si trovano a metà strada tra A e B.



Per O_1 i due eventi
sono simultanei.



Per O_2 i due eventi
non sono
simultanei.

In maniera del tutto simmetrica, due eventi che sono simultanei per O_2 non lo sono per O_1 .

Non c'è nessun sistema di riferimento speciale che possa stabilire la simultaneità assoluta tra due eventi.

Il concetto di simultaneità di due eventi è relativo, cioè dipende da chi osserva gli eventi.

La relatività della simultaneità è un'idea geniale foriera di profondi sconvolgimenti concettuali non solo scientifici ma anche filosofici.

Significa che non esiste un tempo assoluto.
Tutti i sistemi di riferimento in moto hanno un proprio tempo relativo.

DILATAZIONE DEL TEMPO

Gli orologi in moto battono il tempo più lentamente:

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

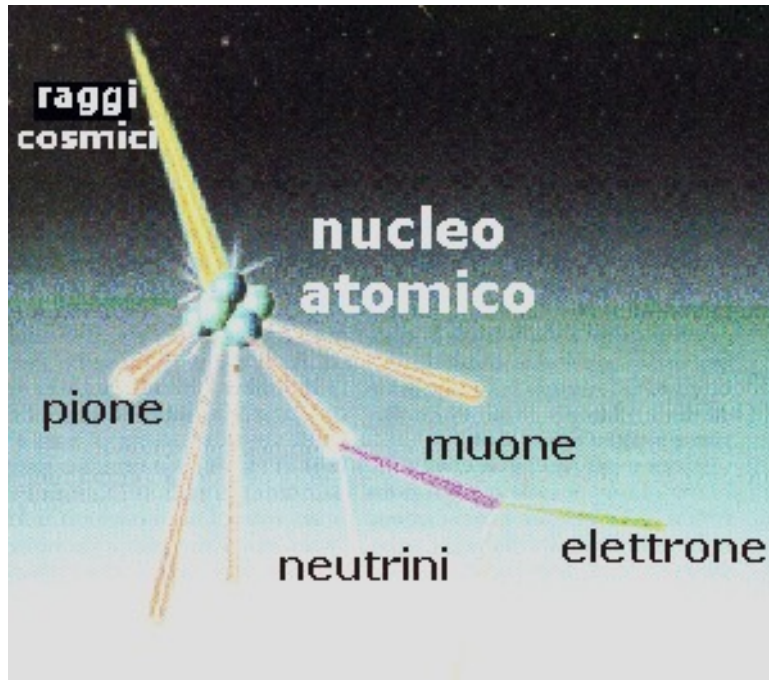
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \xrightarrow{\beta = \frac{v}{c}} \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

fattore di Lorentz o
coefficiente di dilatazione

Δt e $\Delta t'$, misurati in due sistemi di riferimento diversi per la durata dello stesso fenomeno, sono differenti.

paradosso dei gemelli





I **muoni**, originati dall'interazione dei raggi cosmici con gli atomi dell'atmosfera, hanno una vita media pari a $2,2 \cdot 10^{-6}$ s.

Durante questa “vita”, al massimo possono percorrere 660 m, per cui non riuscirebbero ad arrivare sulla Terra. Invece gli strumenti sulla Terra li rilevano in gran numero.

La ragione è che queste particelle
“vivono” nel sistema di riferimento della
Terra, un tempo più lungo di $2,2 \cdot 10^{-6}$ s.

L'orologio dei muoni scorre più lentamente
per tutti gli osservatori terrestri che vedono
le particelle in movimento.

Conseguentemente queste possono
percorrere distanze maggiori, tanto da
attraversare tutto lo spessore dell'atmosfera.

La presa d'atto di un tempo relativo comportava il rovesciamento anche dell'altro concetto newtoniano, ossia quello di spazio assoluto: se il tempo è relativo, lo è anche lo spazio.

CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

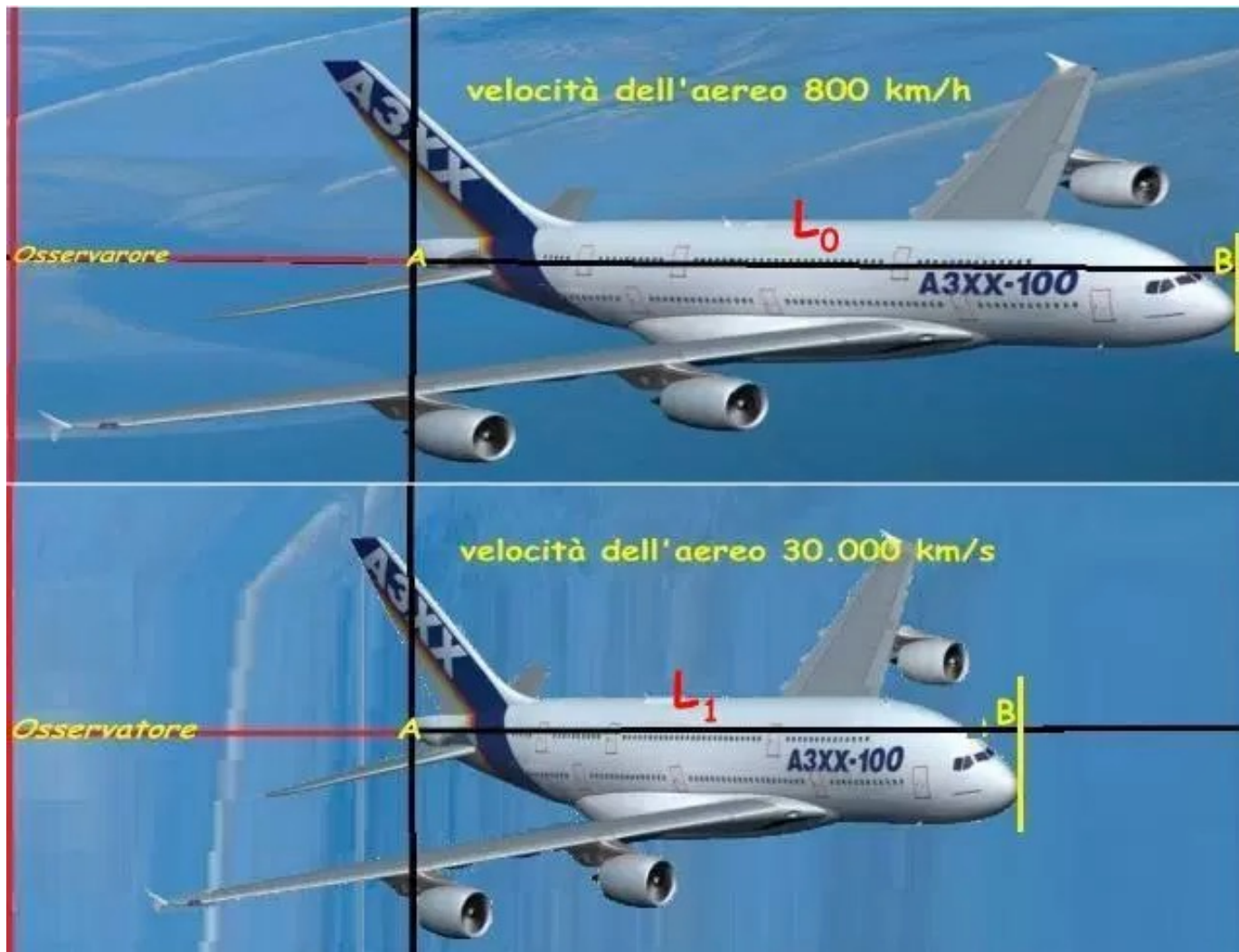
Un oggetto in moto diventa più corto:

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \xrightarrow{\beta = \frac{v}{c}} \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

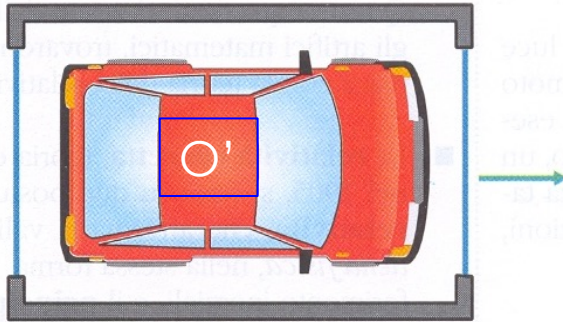
fattore di Lorentz o
coefficiente di contrazione

Contrazione delle lunghezze



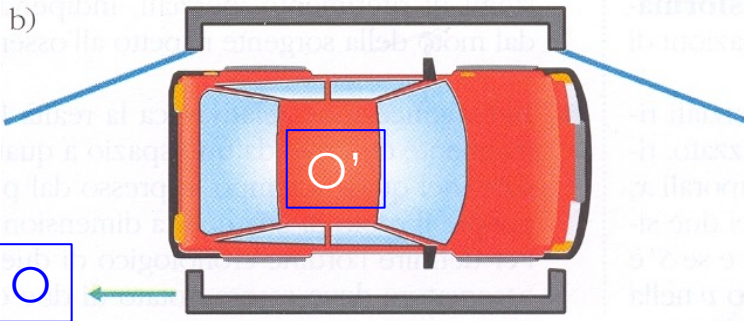
paradosso del garage

a)



○

b)



○

Si abbia un'auto lunga 3 m e un garage lungo anch'esso 3 m.

Chi ha ragione?

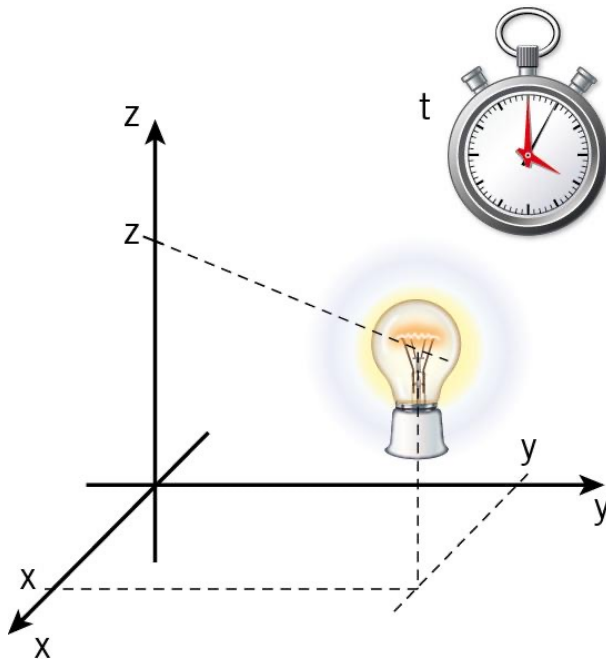
L'aspetto straordinario di questo paradosso è che entrambi gli osservatori hanno ragione.

Secondo la teoria della relatività ristretta, tutti i sistemi di riferimento inerziali sono ugualmente validi. Tutto quanto sappiamo è che osservatori in differenti stati di moto otterranno misure diverse delle grandezze (tempo, spazio, simultaneità).

Nella teoria della relatività non si può parlare dello spazio senza parlare del tempo e viceversa.

L'unificazione dello spazio e del tempo genera una nuova grandezza invariante, un continuo quadridimensionale, il cosiddetto **spaziotempo**.

Nello spaziotempo per descrivere un fenomeno, occorre sapere che è avvenuto a un dato istante e in un certo punto dello spazio.



La quaterna
ordinata (t, x, y, z)
prende il nome di
evento.

In questo modo il tempo non è
distinto dalle coordinate spaziali, ma
è una delle quattro coordinate dello
spaziotempo.

Come la *lunghezza* e il *tempo* sono grandezze relative, anche la terza grandezza fondamentale della meccanica, la **massa**, presenta la stessa proprietà, ossia **il valore non è costante ma dipende dal sistema di riferimento rispetto al quale è misurato.**

Massa relativistica

Se m_0 è la massa a riposo (è la massa di un corpo misurata da un osservatore rispetto al quale il corpo è fermo), la massa dello stesso corpo, per un secondo osservatore in moto rettilineo uniforme rispetto al primo con velocità v , è:

$$m = \gamma m_0$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ fattore di Lorentz}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \xrightarrow{v=c} m \rightarrow \infty$$

Questo andamento è coerente con l'affermazione che la velocità c della luce nel vuoto è un limite superiore cui ogni oggetto dotato di massa può avvicinare ma non raggiungere.

*“Mi è venuta in mente anche un’ulteriore conseguenza dell’articolo sull’elettrodinamica. E cioè che il principio di relatività, insieme alle equazioni di Maxwell, richiede che **la massa sia una misura diretta dell’energia contenuta in un corpo.** La luce trasferisce massa”.*

Con queste parole, Einstein sviluppa una nuova e meravigliosa idea:

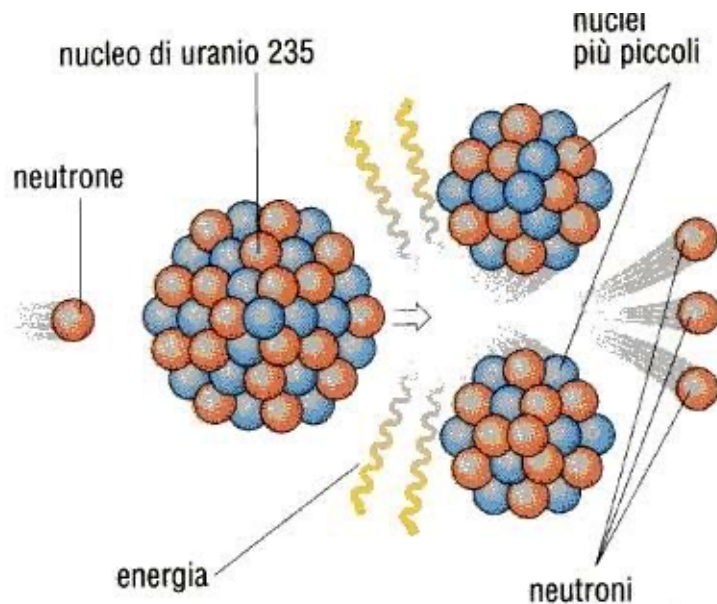
la massa non è altro che una forma di energia

$$E = mc^2 = \gamma m_0 c$$

La massa scompare, secondo la precedente relazione, quando compare l'energia e viceversa.

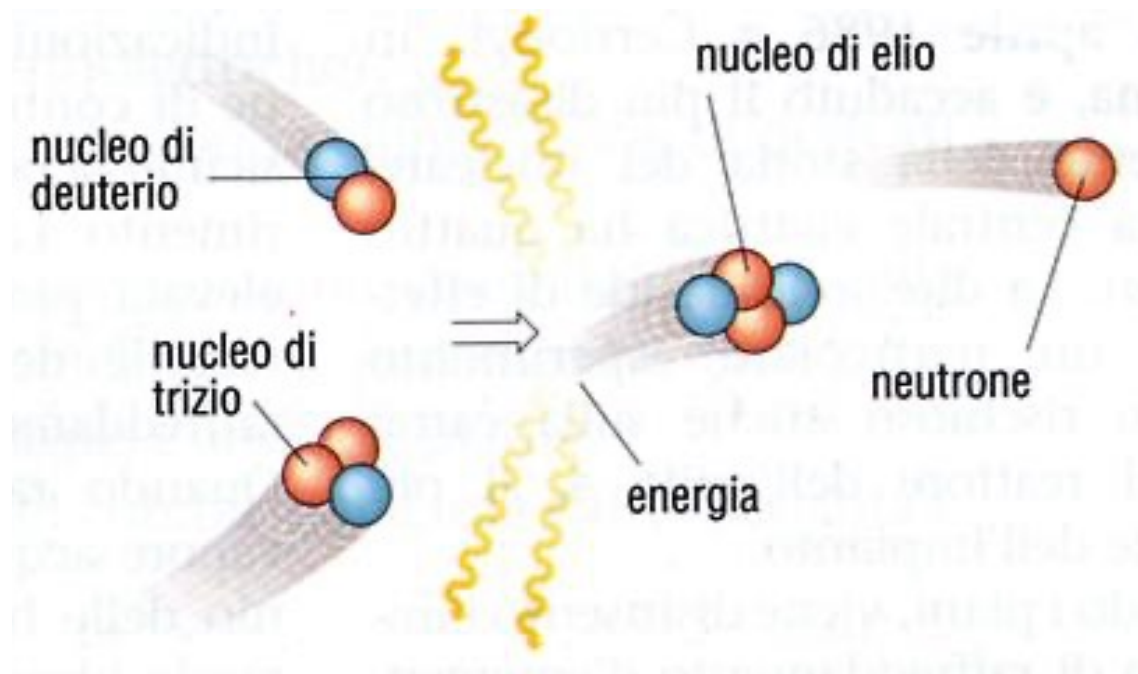
L'equivalenza massa-energia è un'elegante conclusione: *massa ed energia sono manifestazioni diverse della medesima entità*, come lo spazio e il tempo (spaziotempo) o il campo elettrico e il campo magnetico (campo elettromagnetico). C'è una fondamentale intercambiabilità tra esse.

L'energia termica possiede una massa ponderabile per cui un litro d'acqua alla temperatura di 100 °C pesa di più (di circa 10^{-20} grammi) della stessa quantità di acqua fredda.



Nella **fissione** di un nucleo di uranio la massa totale dei frammenti è minore della massa del nucleo di partenza.

L'energia corrispondente alla perdita di massa è esattamente uguale all'energia cinetica totale dei frammenti.



La reazione di **fusione** deuterio-trizio produce un atomo di elio più leggero dei reagenti e la mancanza di massa la ritroviamo sotto forma di eccesso di energia.

Poiché massa ed energia sono intercambiabili, i due principi classici di conservazione di queste due grandezze (conservazione della massa e dell'energia), non valgono più separatamente.

PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA MASSA-ENERGIA

La somma complessiva di tutte le energie e di tutte le masse dell'universo deve rimanere inalterata nel tempo.

La teoria della relatività ha avuto una profonda influenza sulla nostra idea di materia, obbligandoci a modificare in modo sostanziale il concetto di particella.

Nella fisica classica, la massa di un corpo era sempre stata associata a una sostanza materiale indistruttibile della quale si pensava fossero fatte tutte le cose.

La teoria della relatività ha mostrato
che la massa non ha nulla a che
fare con una qualsiasi sostanza, ma
è una forma di energia.

Conclusioni

All'aumentare della velocità, il tempo scorre più lentamente e le lunghezze si contraggono.

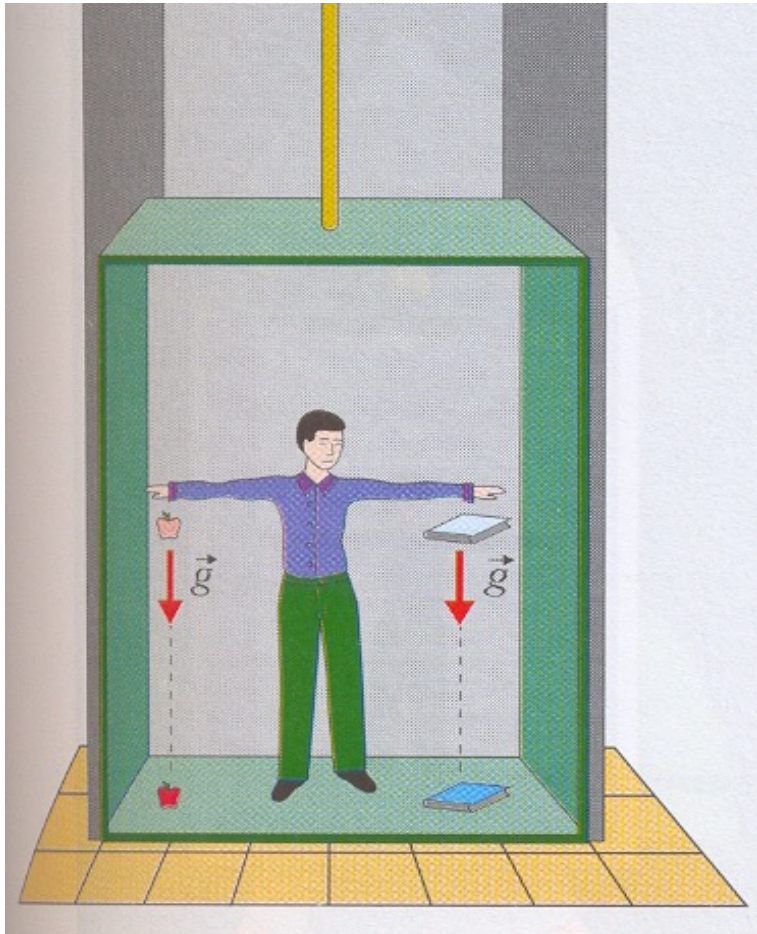
Spazio e tempo, unificati, costituiscono le quattro coordinate dello spaziotempo.

La massa varia con la velocità.

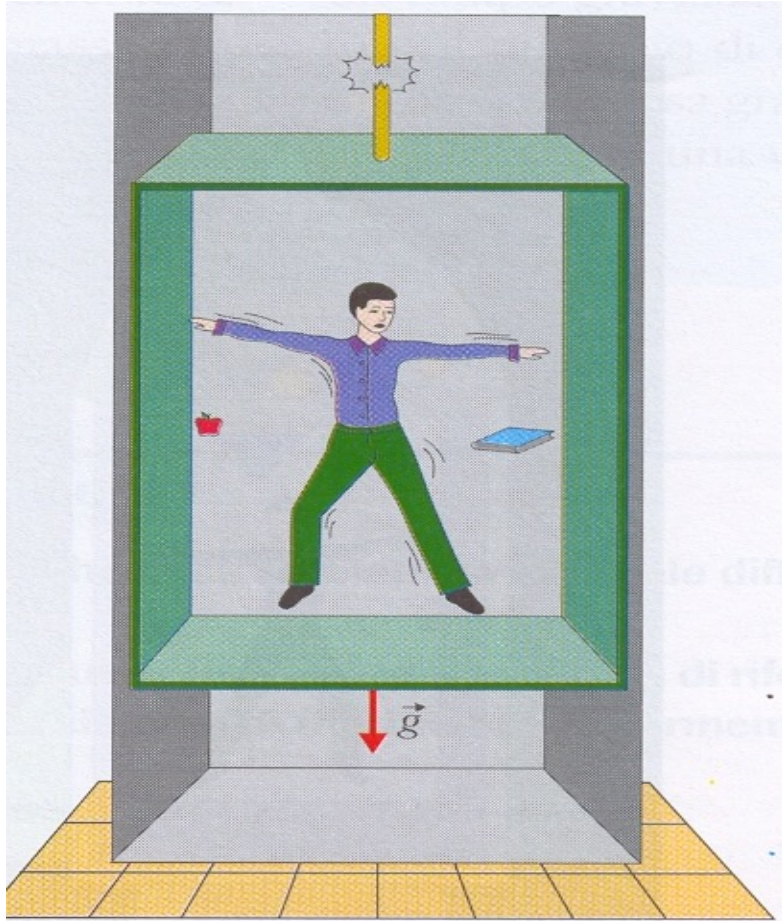
Massa ed energia sono equivalenti.

Teoria della relatività generale

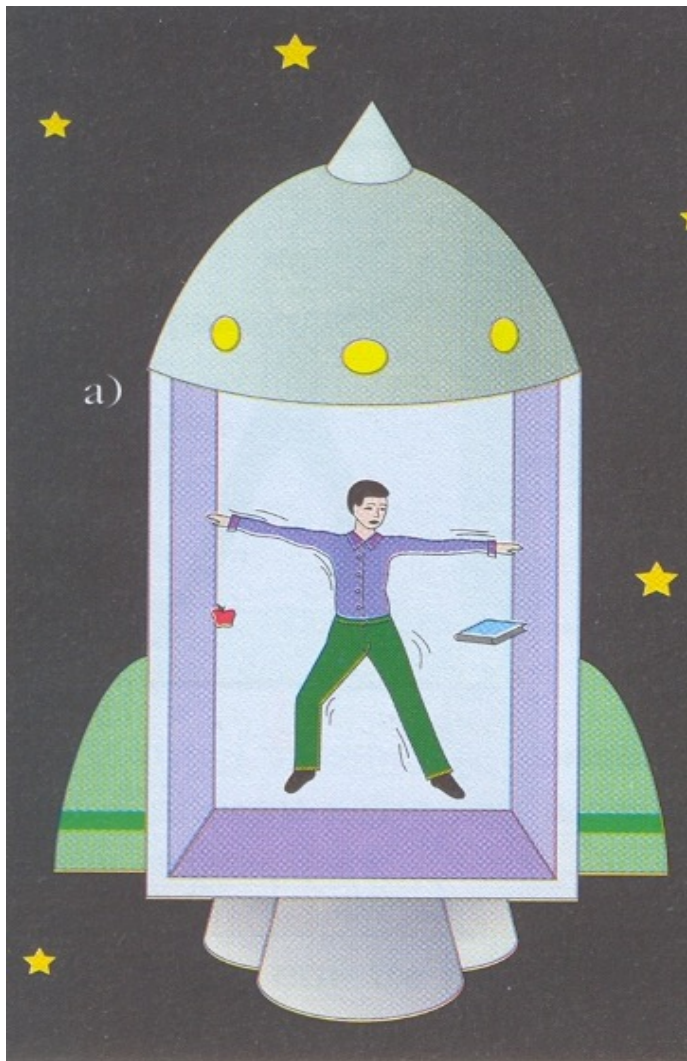
La relatività generale, presentata nella sua forma definitiva il 4 novembre 1915 all'Accademia Prussiana (il 20 marzo 1916 furono pubblicati i dettagli sulla rivista Annalen der Physik), generalizza le teorie di Einstein, nel senso che *estende le leggi della relatività ristretta, valide solo per i sistemi in moto relativo rettilineo uniforme, anche ai sistemi non inerziali.*



L'osservatore è dentro un ascensore fermo rispetto alla Terra. Ogni corpo è soggetto alla stessa accelerazione di gravità g .



Supponiamo che
l'ascensore precipiti
in caduta libera. Tutti
i corpi, e
l'osservatore stesso,
galleggiano privi di
peso.



Immaginiamo
l'ascensore nello
spazio. Anche in questo
caso lo sperimentatore
non avverte il peso
degli oggetti.

L'osservatore non riesce a distinguere le due situazioni (dentro ascensore, dentro l'astronave) nel senso che **nessuna esperienza fatta all'interno dell'ascensore gli permette di capire se sarà destinato a precipitare al suolo o a galleggiare eternamente nello spazio.**

Possiamo dunque affermare che:

- con un opportuno riferimento accelerato, è possibile eliminare o simulare un campo gravitazionale reale.
- gli effetti locali della gravità e dell'accelerazione sono equivalenti.

Dall'analisi di questo esperimento ideale (*gedankenexperiment*) discende il seguente principio fondamentale della teoria della relatività generale:

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

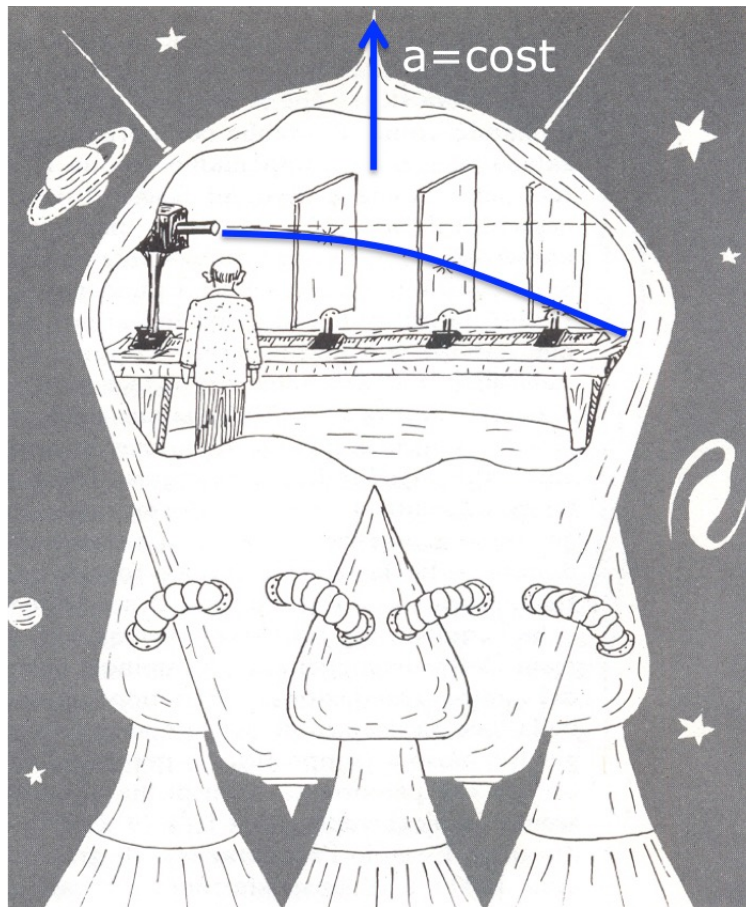
Un campo gravitazione omogeneo è completamente equivalente ad un sistema di riferimento uniformemente accelerato.

Questo principio divenne la base del suo tentativo di generalizzare la teoria della relatività in modo che includesse anche i moti in sistemi non inerziali, cioè accelerati.

Ma questa *analogia* tra i fenomeni meccanici che si registrano all'interno di una nave spaziale accelerata e nel campo gravitazionale prodotto dalla massa della Terra (o di qualsiasi altro corpo) è puramente casuale o ha una più profonda *connessione con la natura delle forze gravitazionali?*

Einstein era sicuro che si trattasse della seconda ipotesi e si domandò *come si sarebbe comportato un raggio di luce entro una cabina accelerata.*

Ossia, la gravità deve esercitare sulla radiazione (la luce) lo stesso effetto che esercita sulla massa. *Ciò significa che la luce segue una traiettoria curva in presenza di gravità.*



Se l'equivalenza tra l'accelerazione e la gravità si estende ai fenomeni elettromagnetici i raggi luminosi devono essere deviati dal campo gravitazionale.

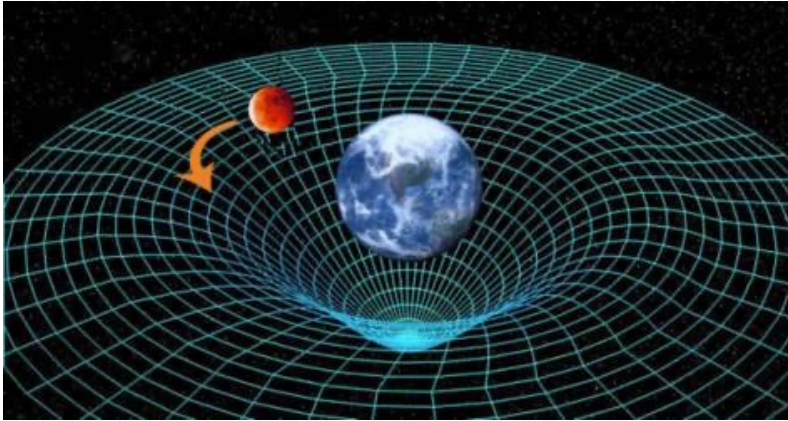
Se il principio di equivalenza riguarda tutti i fenomeni fisici, allora il primo principio della relatività ristretta (valido solo nei sistemi inerziali) può essere esteso a tutti i sistemi, compresi quelli non inerziali, per cui:

PRINCIPIO DI RELATIVITA' GENERALE

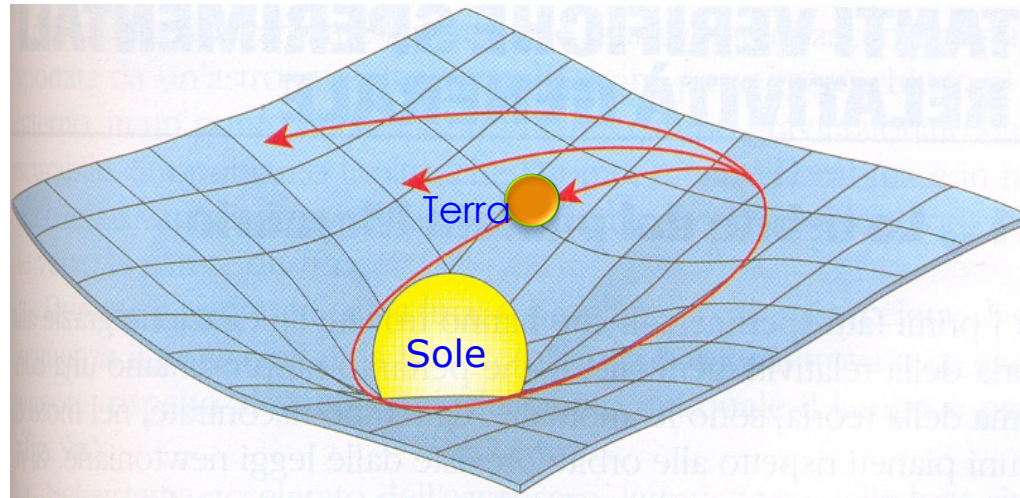
Le leggi della fisica hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento.

Il principio di equivalenza ha una conseguenza straordinaria: nella logica relativistica non c'è più bisogno di una forza gravitazionale.

La gravità diventa una proprietà geometrica dello spaziotempo.



- ❑ La presenza di una massa o energia (essendo equivalenti) modifica le proprietà geometriche dello spaziotempo, ossia viene incurvato.
- ❑ Una curvatura dello spaziotempo indica la presenza di un campo la cui sorgente è la massa o l'energia.



La superficie deformata del telo è una rappresentazione degli effetti gravitazionali.

Secondo la relatività generale l'avvicinamento reciproco delle masse non è dovuto ad una forza di tipo newtoniano ma all'effetto della geometria dello spaziotempo in cui essi si muovono.

Come ha affermato **Wheeler** (1911-2008),
grande esperto delle teorie relativistiche:

*La materia dice allo spazio come
incurvarsi e lo spazio dice alla materia
come muoversi.*

Poiché l'intera struttura dello spaziotempo dipende dalla distribuzione di materia e energia nell'universo, ciò significa che il tempo, inseparabile dallo spazio, scorre con ritmi differenti in punti diversi dell'universo, e che il concetto di spazio vuoto perde di significato.

In conclusione: mentre l'elettromagnetismo o i fenomeni nucleari sono dovuti a forze che agiscono nello spaziotempo, la gravità è connessa alla stessa struttura geometrica dello spaziotempo:

Se la gravità deriva dalla curvatura dello spaziotempo, allora la gravità è geometria.

Se la presenza di massa o energia modifica lo spaziotempo, allora è necessaria una nuova forma di geometria, la cosiddetta geometria non euclidea (che si basa su postulati diversi da quelli di Euclide).

La geometria giusta per descrivere lo spaziotempo di Einstein e le sue proprietà è la geometria ellittica di Riemann (1826-1866).

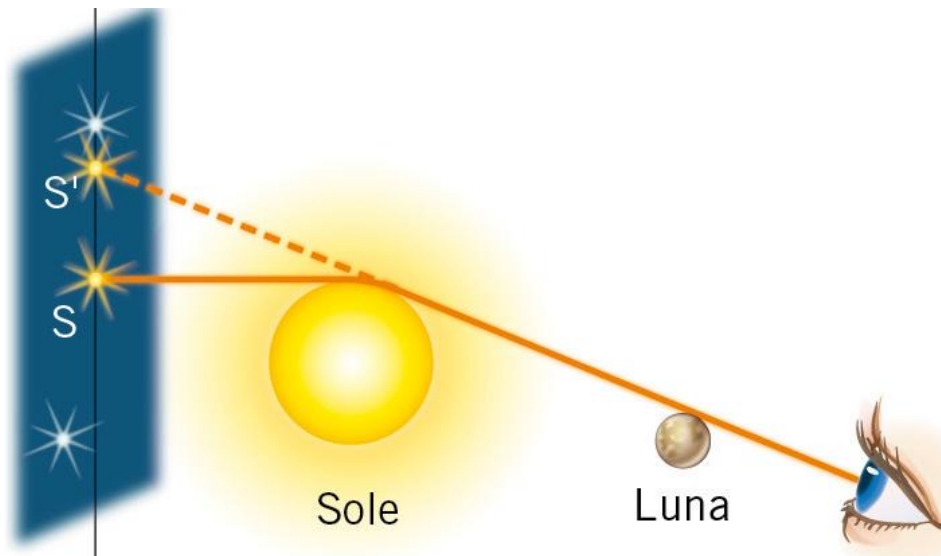
EQUAZIONI DI CAMPO DELLA GRAVITAZIONE

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

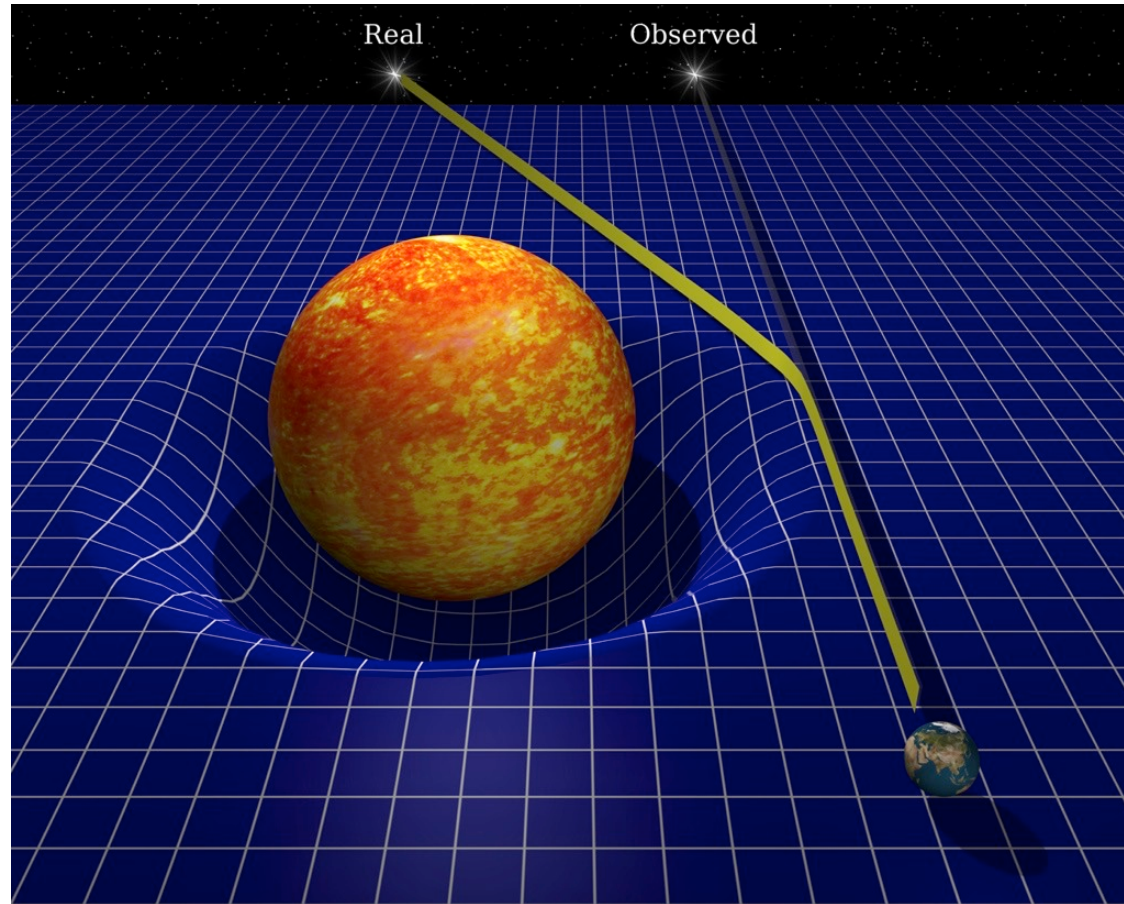
- Il primo membro dell'equazione condensa in sé tutta l'informazione sul modo in cui la geometria dello spaziotempo è deformata e incurvata dalla massa e dall'energia;
- Il secondo membro descrive il movimento della materia (massa ed energia) nel campo gravitazionale.

“Spazio e tempo diventano attori nell'evoluzione del cosmo, e assumono per così dire vita propria. La materia presente qui causa una distorsione dello spazio lì, la quale a sua volta muove la materia laggiù, il che provoca un'ulteriore distorsione dello spazio, e così via. La relatività generale è, in sostanza, la coreografia della danza cosmica che vede quali protagonisti spazio, tempo, materia ed energia”.

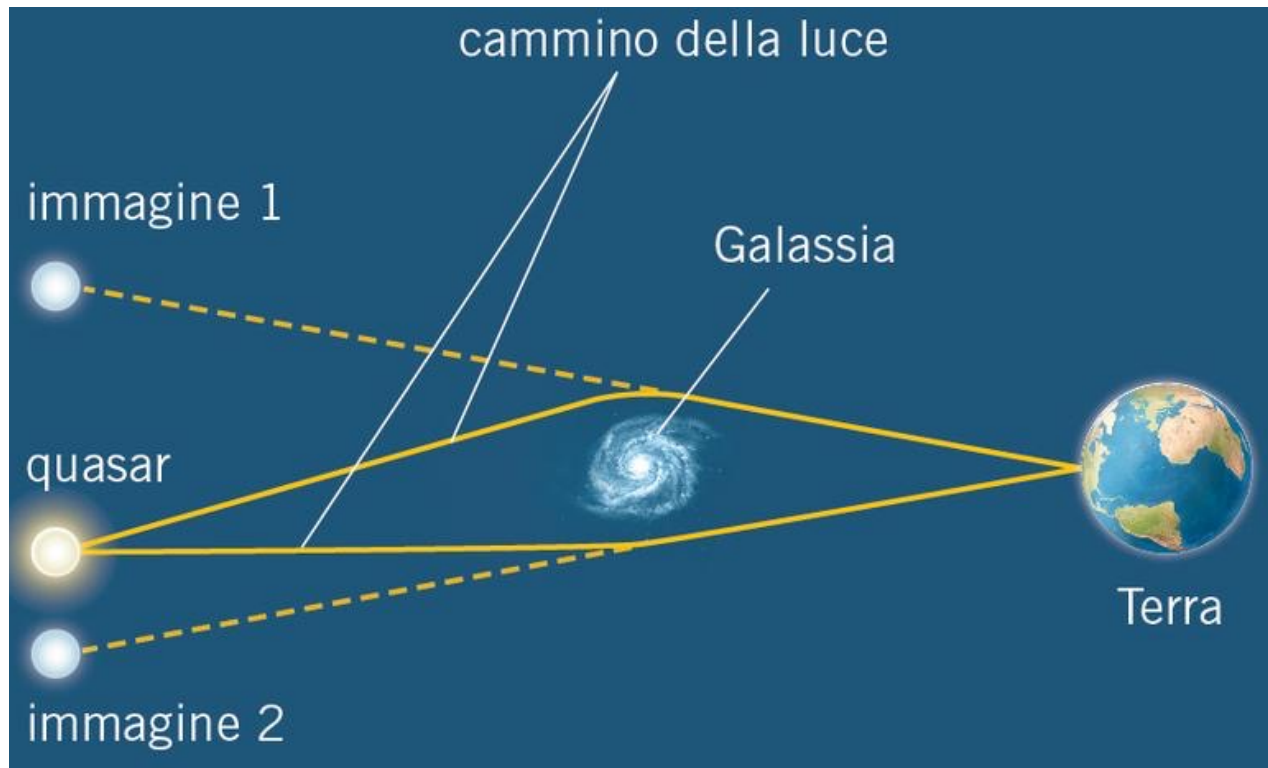
❑ LA DEFLESSIONE DEI RAGGI LUMINOSI PER EFFETTO GRAVITAZIONALE



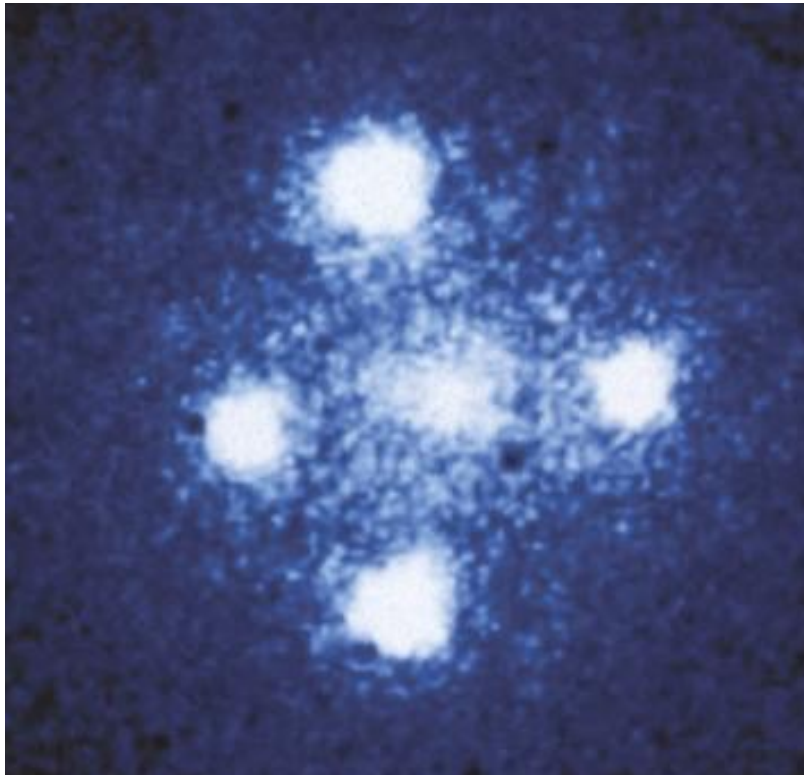
La teoria della relatività generale prevede una deviazione angolare pari a 1,75 secondi d'arco (una deviazione molto piccola).



La verifica sperimentale fu condotta nel 1919 dall'astrofisico **Eddington** (1882-1944),



Un'altra conferma della deflessione della luce è rappresentata dalla scoperta delle cosiddette **lenti gravitazionali**.



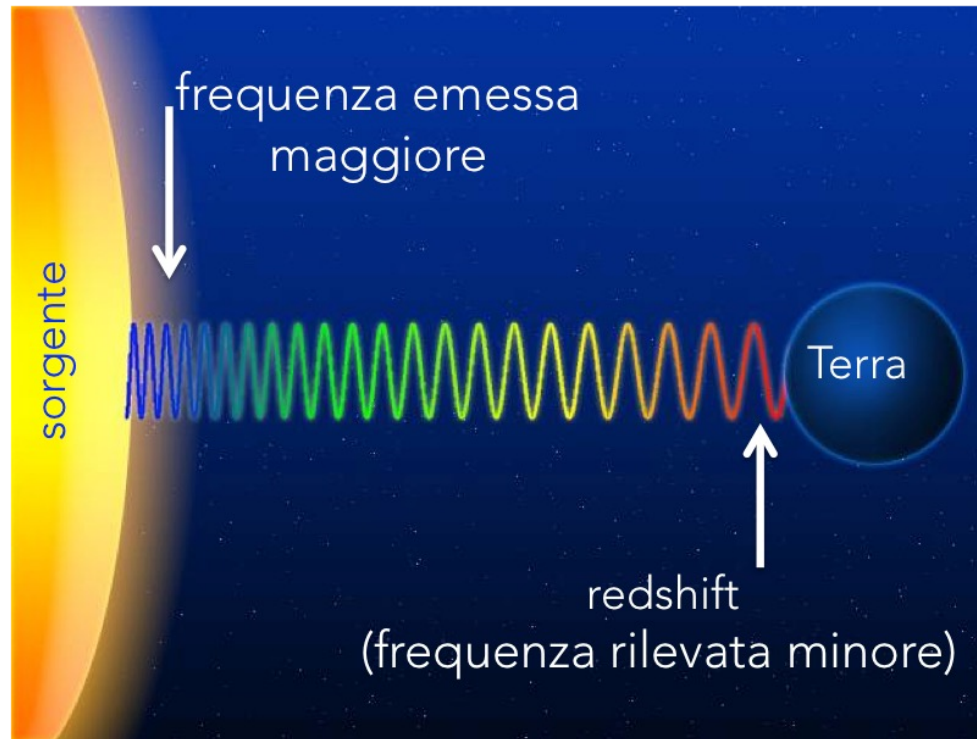
Nella cosiddetta **croce di Einstein**, si vedono quattro immagini dello stesso quasar, con al centro la galassia che, deviando la luce, si comporta come una lente.

☐ REDSHIFT GRAVITAZIONALE

In base alle teorie relativistiche, quando una radiazione elettromagnetica, per esempio la luce, si allontana da un campo gravitazionale, specie se questo è sufficientemente intenso, consuma parte della sua energia.

Poiché la radiazione deve continuare a muoversi alla velocità c , la sua perdita di energia $E=hf$ si manifesta attraverso una diminuzione di frequenza (o aumento della lunghezza d'onda).

Questo fenomeno si chiama **redshift gravitazionale** (spostamento verso il rosso) delle righe spettrali della radiazione quando si allontana dalla sorgente gravitazionale che la emette.



redshift gravitazionale: *la luce proveniente da una stella è rilevata sulla Terra con una frequenza minore di quella con cui era stata emessa.*

□ DILATAZIONE GRAVITAZIONALE DEI TEMPI



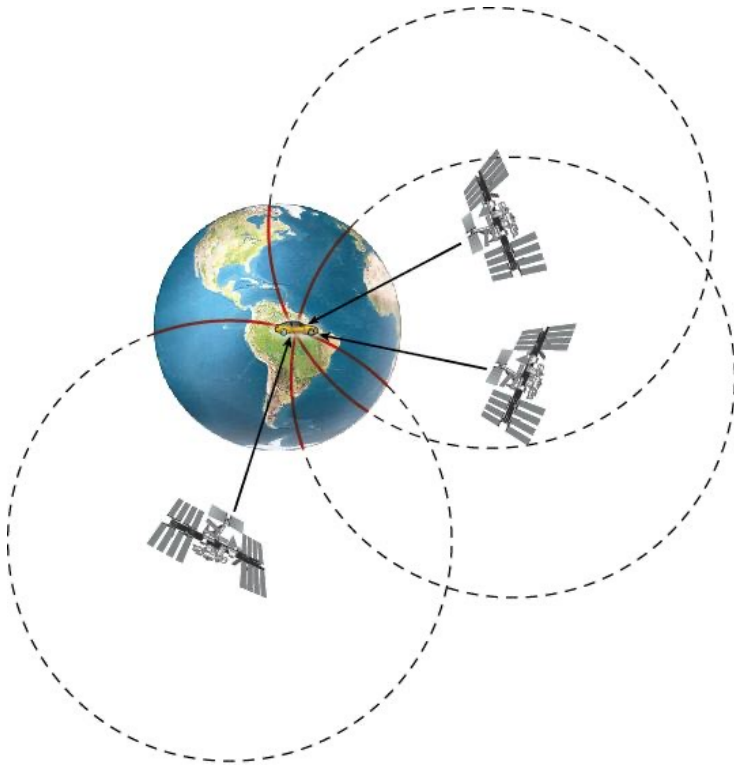
Poiché l'intera struttura dello spaziotempo dipende dalla distribuzione di materia e energia nell'universo, ciò significa che il tempo, inseparabile dallo spazio, scorre con ritmi differenti in punti diversi dell'universo.

Gli orologi che si trovano in zone dello spaziotempo dove il campo gravitazionale è maggiore e, quindi, la curvatura più accentuata, battono più lentamente di quelli che si trovano in zone con minore curvatura.

La **dilatazione gravitazionale dei tempi** è stata confermata da un esperimento eseguito nel 1971: quattro orologi al cesio, di grande precisione, furono caricati a bordo di normali aerei di linea e percorsero due volte il giro della Terra, volando sia verso est, sia verso ovest.

Durante l'esperimento gli orologi in volo perdevano la sincronizzazione con gli orologi di controllo rimasti a terra a causa di due diversi effetti relativistici:

- la dilatazione dei tempi (prevista dalla relatività ristretta).
- La dilatazione dei tempi (prevista dalla relatività generale): gli orologi sull'aereo risentono di un campo gravitazionale meno intenso di quello in cui si trovano gli orologi a terra.



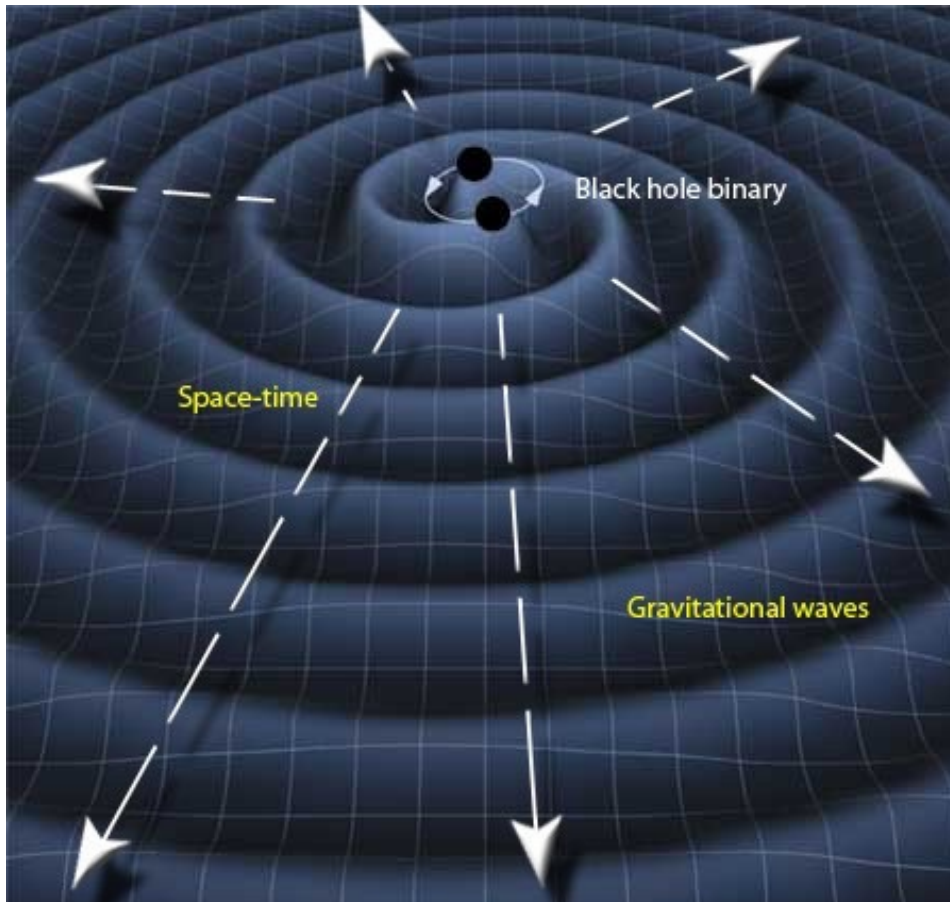
Se non si tenesse conto della dilatazione gravitazionale dei tempi, il sistema GPS accumulerebbe ogni giorno un errore di 10 km nella determinazione delle posizioni.

□ LE ONDE GRAVITAZIONALI

Se la geometria dello spaziotempo è determinata dalla distribuzione delle masse e dell'energia presenti, quando tale distribuzione viene modificata (esplosione supernova), allora la geometria dello spaziotempo cambia di conseguenza.



Tale variazione nella geometria non è istantanea in tutto l'Universo ma si propaga, a partire dal luogo dove ha avuto origine, alla velocità della luce c (per analogia si comporta come l'onda, originata da un sasso, che si propaga sulla superficie dell'acqua).



La propagazione
della variazione
della geometria
dello spazio-
tempo prende il
nome di **onda
gravitazionale**.

100 anni dopo la pubblicazione della teoria della relatività generale di Einstein, l'11 febbraio 2016 è stata confermata, in una conferenza congiunta con LIGO e VIRGO (antenne gravitazionali presenti in Italia, vicino Pisa, e negli USA), l'esistenza delle onde gravitazionali, grazie allo studio sulla fusione di due buchi neri distanti circa 1 miliardo e 300 milioni di anni luce.

Prima che Einstein avanzasse la sua teoria della relatività generale, l'universo era concepito come un'isola di materia fluttuante in uno spazio infinito. E lo spazio era solo un ente di ragione, ossia il non-essere (scientificamente parlando il nulla) considerato come possibilità di pervenire ad essere, se mai una qualche materia giungesse un giorno ad occuparlo.

Con la relatività generale i costituenti del cosmo, materia più energia, danno forma all'universo, per cui con le equazioni di campo Einstein getta le basi dello studio della natura dell'universo.

Nel 1917 Einstein pubblica una nuova idea sull'universo nell'articolo *Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale*, idea che a prima vista sembrava folle: lo spazio non ha bordi perché la gravità lo fa incurvare su sé stesso.

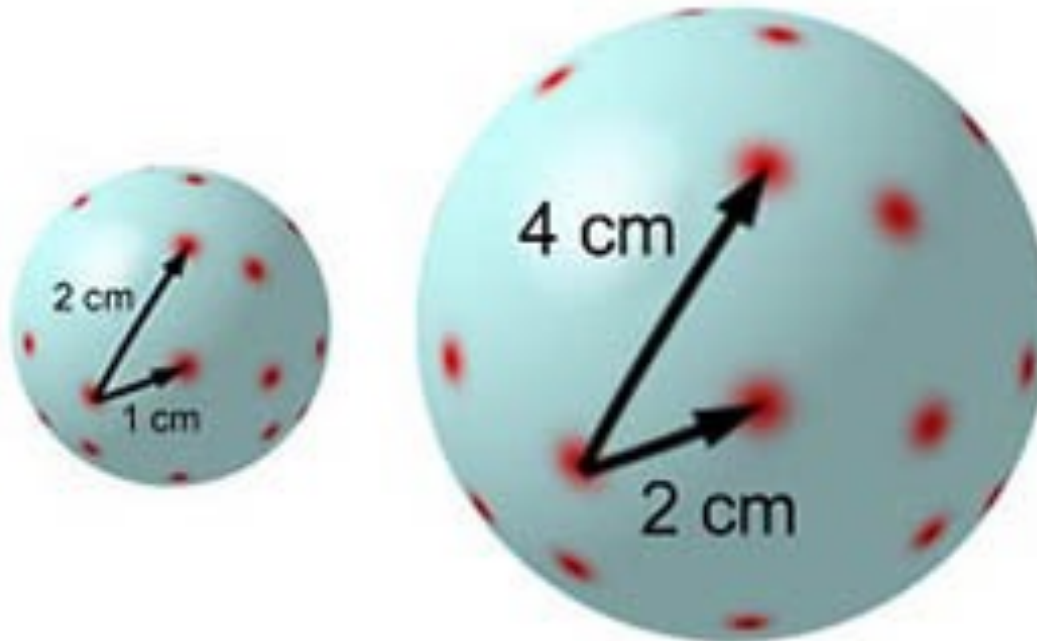
L'universo è finito ma privo di contorni.

Questa concezione del cosmo, dedotta dalle sue equazioni di campo, implicava un universo in espansione o in contrazione.

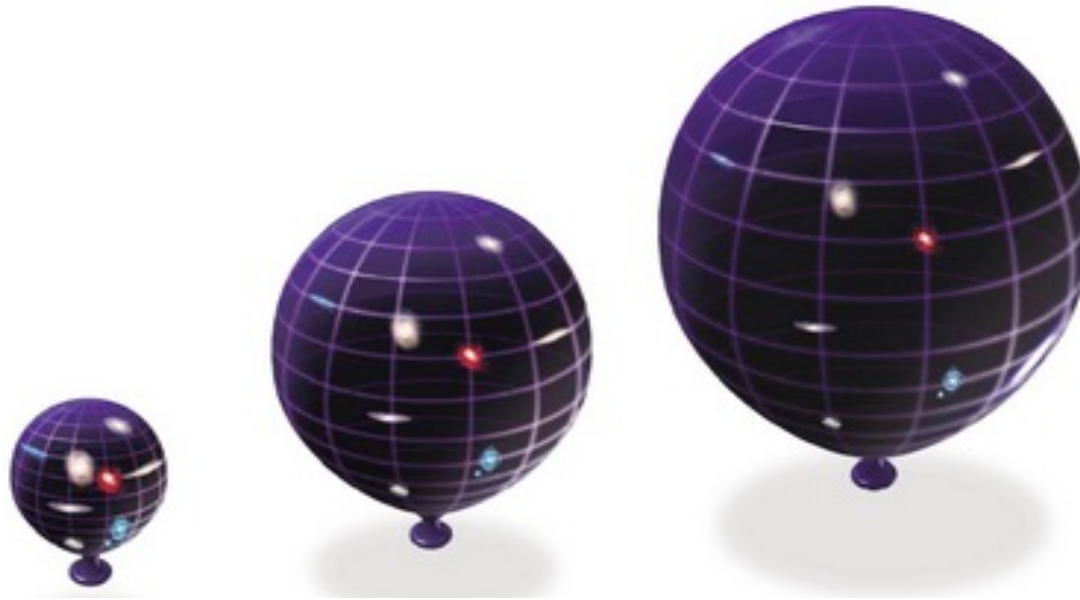
Einstein, credendo in un universo statico, apportò una modifica alla sua teoria. Per impedire alla materia dell'universo di implodere, introdusse una forza repulsiva, attraverso la cosiddetta “*costante cosmologica*”, tale da controbilanciare la gravità attrattiva.

Nel 1929 l'astronomo **Hubble** (1889-1953) scoprì che in realtà l'universo si stava espandendo, esattamente come previsto dalle equazioni originali di campo.

Ma come possiamo raffigurarci questa espansione alla luce della relatività generale?



Qualunque punto scegliamo sul palloncino gonfiato, noteremo che tutti gli altri punti si sono allontanati da esso.



La superficie del pallone rappresenta lo spaziotempo e i punti sono le galassie. Quindi, *non sono le galassie ad allontanarsi, ma lo spaziotempo a “gonfiarsi”*.

Il limite dell'analogia è che il pallone ha un dentro e un fuori, mentre per l'universo non esistono dentro e fuori, *lo spaziotempo, cioè la superficie del pallone, è tutto ciò che esiste.*

Le equazioni di campo di Einstein ci forniscono le modalità dell'espansione dello spaziotempo, specificando in che modo sia controllata dalla materia e dall'energia esistenti nello spaziotempo stesso.

I contenuti dell'universo che influenzano l'evoluzione dello spaziotempo, sono:

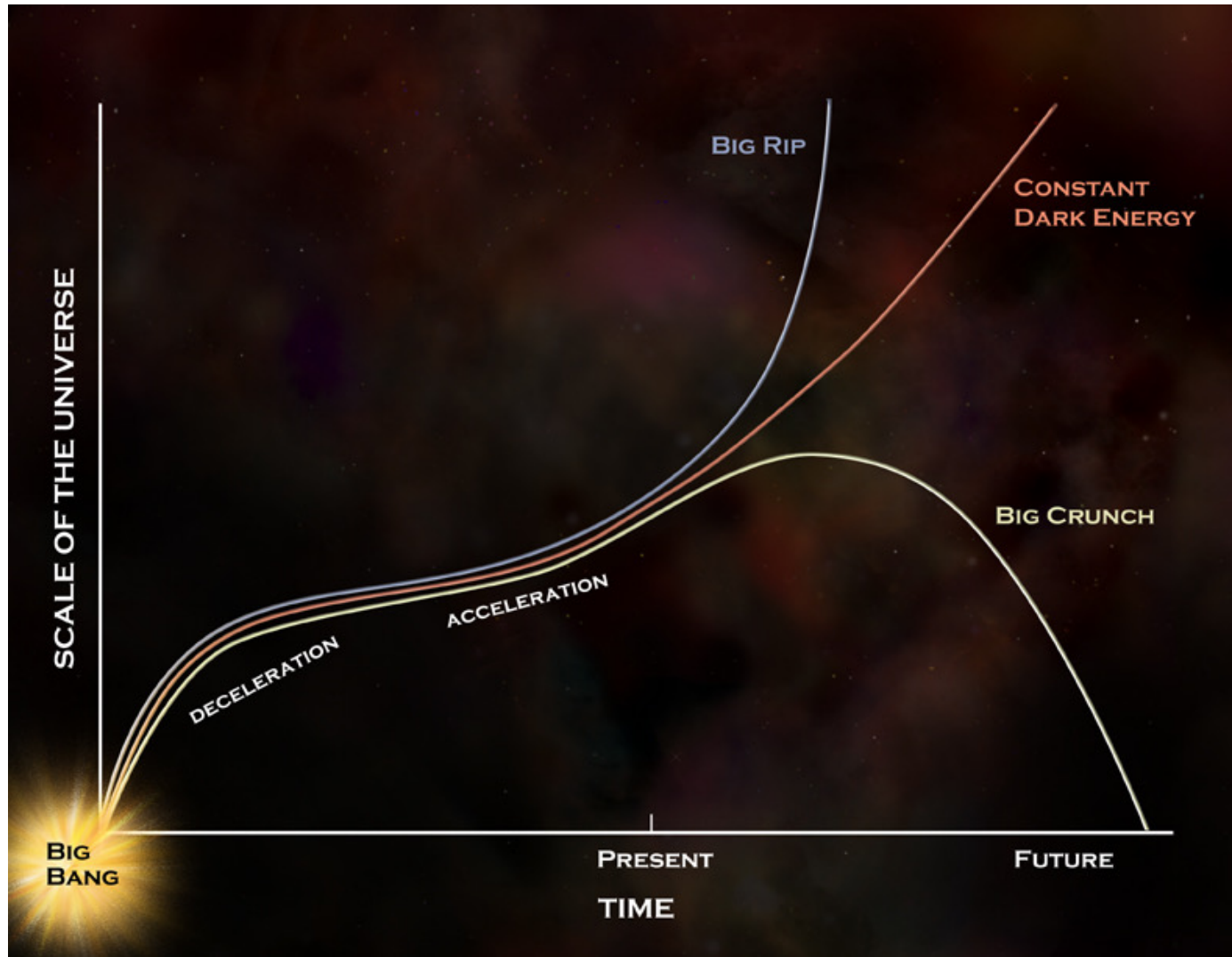
- **La materia ordinaria** (stelle, galassie, nubi interstellari, ecc.), che rappresenta circa il 5% del contenuto dell'universo.
- **La materia oscura**, circa il 25%, della quale non sappiamo ancora la natura, ma che si manifesta attraverso interazioni gravitazionali come la materia ordinaria.
- **L'energia oscura**, circa il 70%, una strana forma di energia sconosciuta ed invisibile all'osservazione.

Ognuno di questi tre costituenti ha un impatto differente sulla storia dell'espansione dell'universo (iniziata con il *Big Bang*?).

Sia la materia ordinaria che quella oscura contribuiscono a frenare l'espansione cosmica.

L'energia oscura, invece, contribuisce all'accelerazione dell'universo.

I possibili scenari sono tre:



Le più recenti misure sembrano indicare che l'universo attuale sta accelerando a testimoniare il fatto che l'universo non è dominato dalla materia, bensì da qualche sostanza di tipo esotico, che ci ricorda la quintessenza aristotelica, che potrebbe trovare spiegazione nell'energia oscura.

Cosa accade se tutta la massa di una stella (o di un qualsiasi corpo) viene compressa in una regione di spazio sufficientemente piccola?

velocità di fuga

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

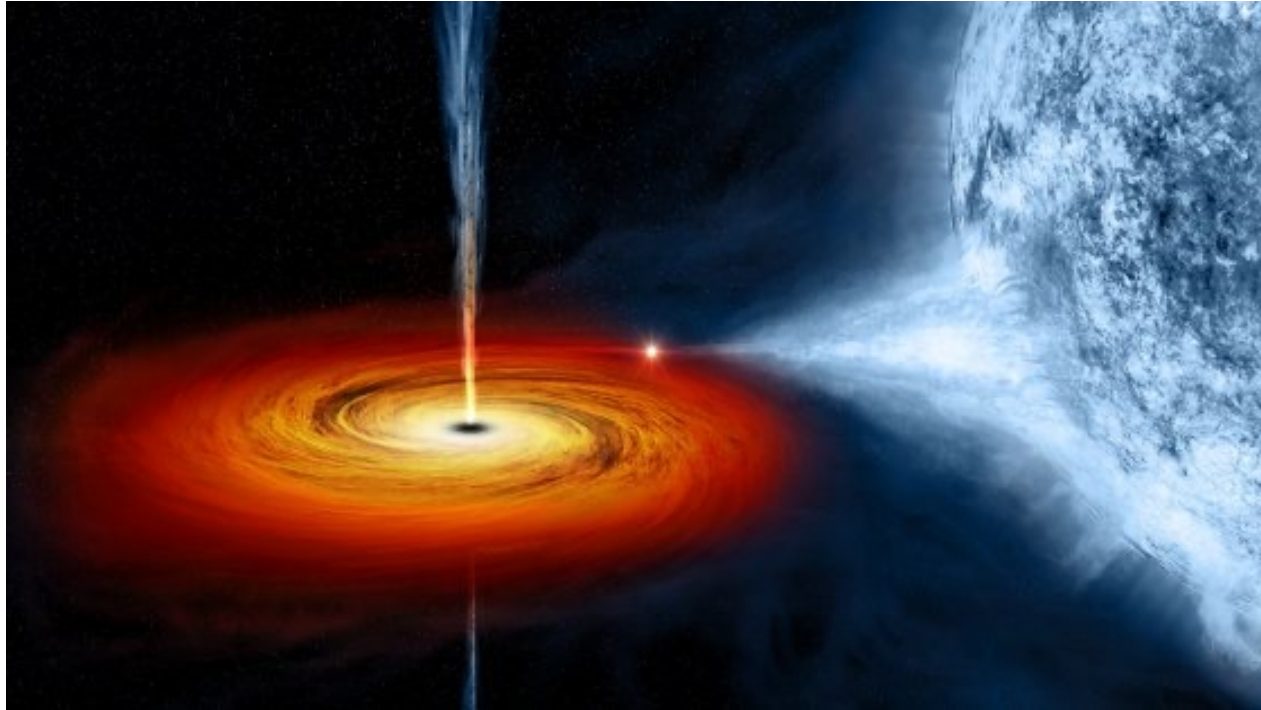


Se il raggio R continua a diminuire, la velocità di fuga può diventare superiore a quella della luce c , cosa impossibile.

Il corpo celeste si è trasformato
in un **buco nero**.



Il **buco nero** è un oggetto, una sorta di pozzo gravitazionale, la cui forza di gravità è talmente intensa che nulla può sfuggirgli, nemmeno la luce.



Ma i buchi neri, per loro natura, sono invisibili. Quindi, la loro presenza può essere dimostrata per gli effetti gravitazionali che esercitano sulla materia circostante.

Da Aristotele a Cartesio, cioè per due millenni, l'idea democritea di uno spazio come entità diversa, separata dalle cose, non era mai stata accettata come ragionevole. Per Aristotele, come per Cartesio, le cose sono estese, ma l'estensione è una proprietà delle cose: non esiste estensione senza una cosa estesa.

Se fra due cose non c'è nulla, ragionava Aristotele, come fa ad esserci lo spazio?

L'idea di uno spazio vuoto nel quale si muovono gli atomi, posto alla base dell'immagine del mondo di Democrito, in bilico tra “l'Essere” e il “Non Essere”, non brillava certo in chiarezza.

Newton era tornato all'idea di Democrito secondo cui i corpi si muovono nello spazio di moto rettilineo uniforme fino a quando le loro traiettorie non vengono curvate dall'azione di una forza. Solo l'efficacia straordinaria delle sue equazioni, la loro capacità di predizione, aveva finito per tacitare le critiche alla "riesumazione" dello spazio democriteo.

Ma di cosa è fatto questo spazio
contenitore del mondo? Che cos'è lo
spazio?

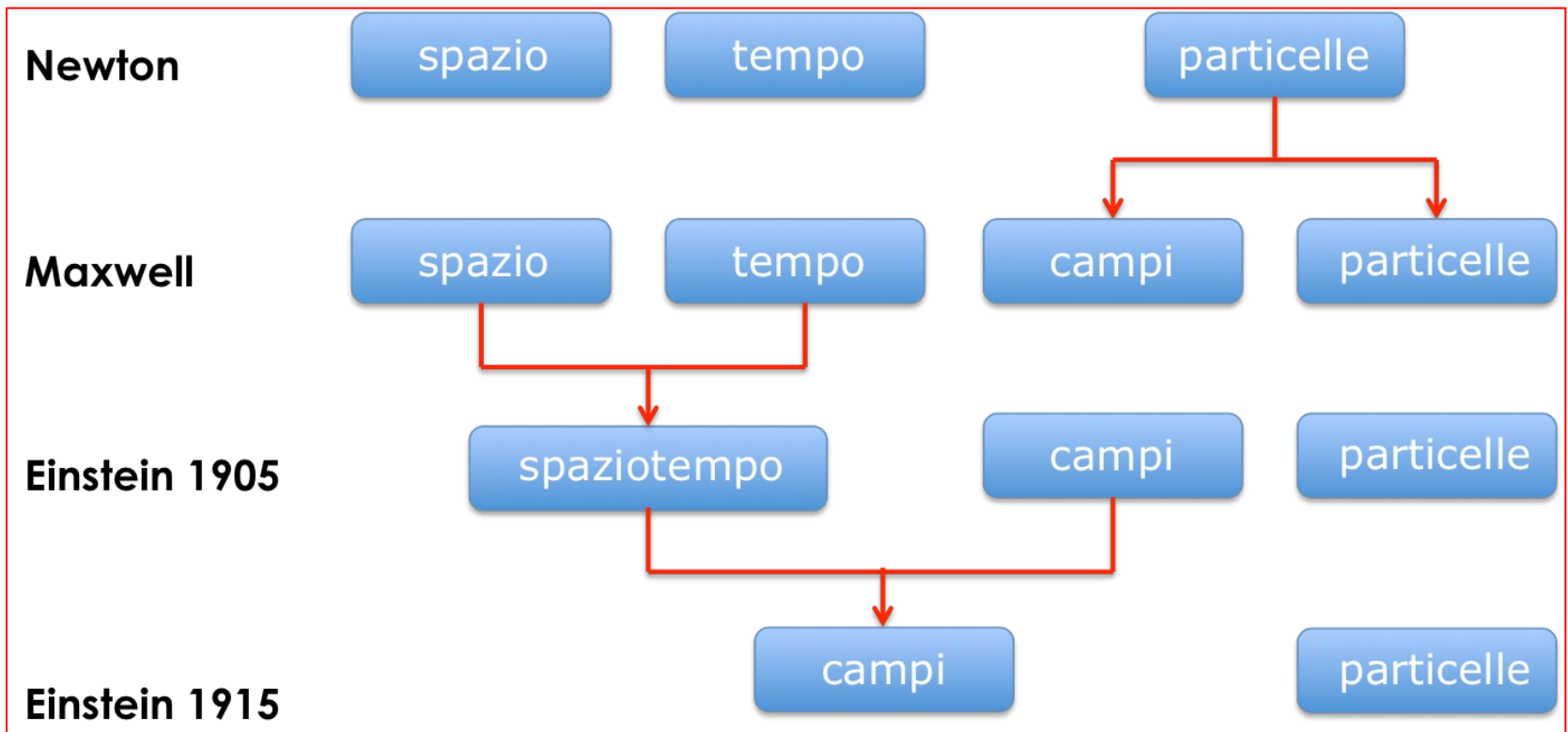
Per Newton lo spazio assoluto era il
sensorium dei, che agisce su tutti gli
oggetti materiali senza esserne influenzato
e che forma, assieme al tempo assoluto,
lo scenario metafisico di ogni evento
naturale.

Ma la spiegazione non sembrava per niente convincente, e i dubbi dei filosofi sulla ragionevolezza della nozione newtoniana di spazio persistevano, e Einstein, conoscitore della filosofia, ne era consapevole.

Einstein raccoglie dunque non uno, ma due problemi. Primo: come descrivere il campo gravitazionale? Secondo: che cos'è lo spazio di Newton? E le risposte sono:

- ❑ le equazioni del campo gravitazionale;
- ❑ lo spazio di Newton è il campo gravitazionale.

Quindi, *il mondo è fatto solo di particelle e campi*, e nient'altro.



A differenza dello spazio di Newton, che è piatto e fisso e non è influenzato dalla presenza dei corpi, il campo gravitazionale è incurvato dalla massa e dall'energia e, a sua volta, influenza il moto della materia (massa e energia). Lo spazio (o meglio lo spaziotempo), è una delle componenti “materiali” del mondo. È un'entità reale che ondula e s'incurva, e costringe i pianeti a ruotare intorno al Sole o al tempo di fermarsi in un buco nero.

Lo spaziotempo di Einstein non è curvo nel senso che si curva dentro un altro spazio più grande. E' curvo nel senso che la sua geometria intrinseca, cioè la rete delle distanze fra i suoi punti, non è la stessa di uno spazio piano. In sintesi è uno spazio in cui non vale il teorema di Pitagora.

Relatività e Arte

Berna, 1905. **Albert Einstein** (1879-1955), pubblica la **Teoria della Relatività Ristretta** che *manda definitivamente in frantumi la concezione classica del tempo e dello spazio.*

Parigi, anno 1906. **Pablo Picasso** (1881-1973), dà la prima pennellata a **Les Femmes d'Alger (O Version O)** che smonta il sistema percettivo spazio-temporale della rappresentazione prospettica della pittura.



Picasso - Les demoiselles d'Avignon 1907
MoMA di New York

- Le figure sono proposte in simultanea ma ciascuna vive in una sua dimensione spaziale (la donna in basso a destra mostra la schiena ma il volto è ritratto frontalmente).
- Viene rifiutata ogni illusorietà spaziale: ogni distinzione tra oggetto e spazio in cui esso è collocato viene a cadere. Lo spazio e l'oggetto si influenzano a vicenda.

- **Il tempo come quarta dimensione:** la rottura della convenzione dell'unicità del punto di vista, ossia la rappresentazione di ogni oggetto contemporaneamente da più punti di vista (visione simultanea), contiene in sé il tempo indispensabile al pittore per studiare e scomporre l'oggetto e alla nostra mente (il lettore) per ricostruirlo.

- L'idea di alterare l'unicità del punto di vista, cioè il principio basilare della prospettiva, collima con l'acquisizione della relatività scientificamente pronunciata da Einstein per cui il tempo dipendendo dallo stato e dal moto dell'osservatore, non può più essere sincronizzato da un unico punto di vista.

Il quadro inaugura la stagione del cubismo e manda definitivamente in frantumi la concezione classica dello spazio e del tempo.

Conclusione:

- ❑ Einstein, partendo dalla relatività della simultaneità, giunge alla conclusione che non esistono sistemi di riferimento assoluti. L'indagine su un fenomeno dipende dallo stato di moto dell'osservatore.

- ❑ Picasso, partendo dalla relatività della simultaneità (anche se riferita allo spazio invece che al tempo) giunge alla medesima conclusione: non esistono sistemi di riferimento privilegiati. Ciascuno ha una visione dei fenomeni che avvengono nello spazio che dipende dal punto di osservazione.