



Introduzione alla Fisica Moderna

Francesco Cirotto – Università degli studi di Napoli Federico II & INFN Napoli

Masterclass 2025

Avvertenze!

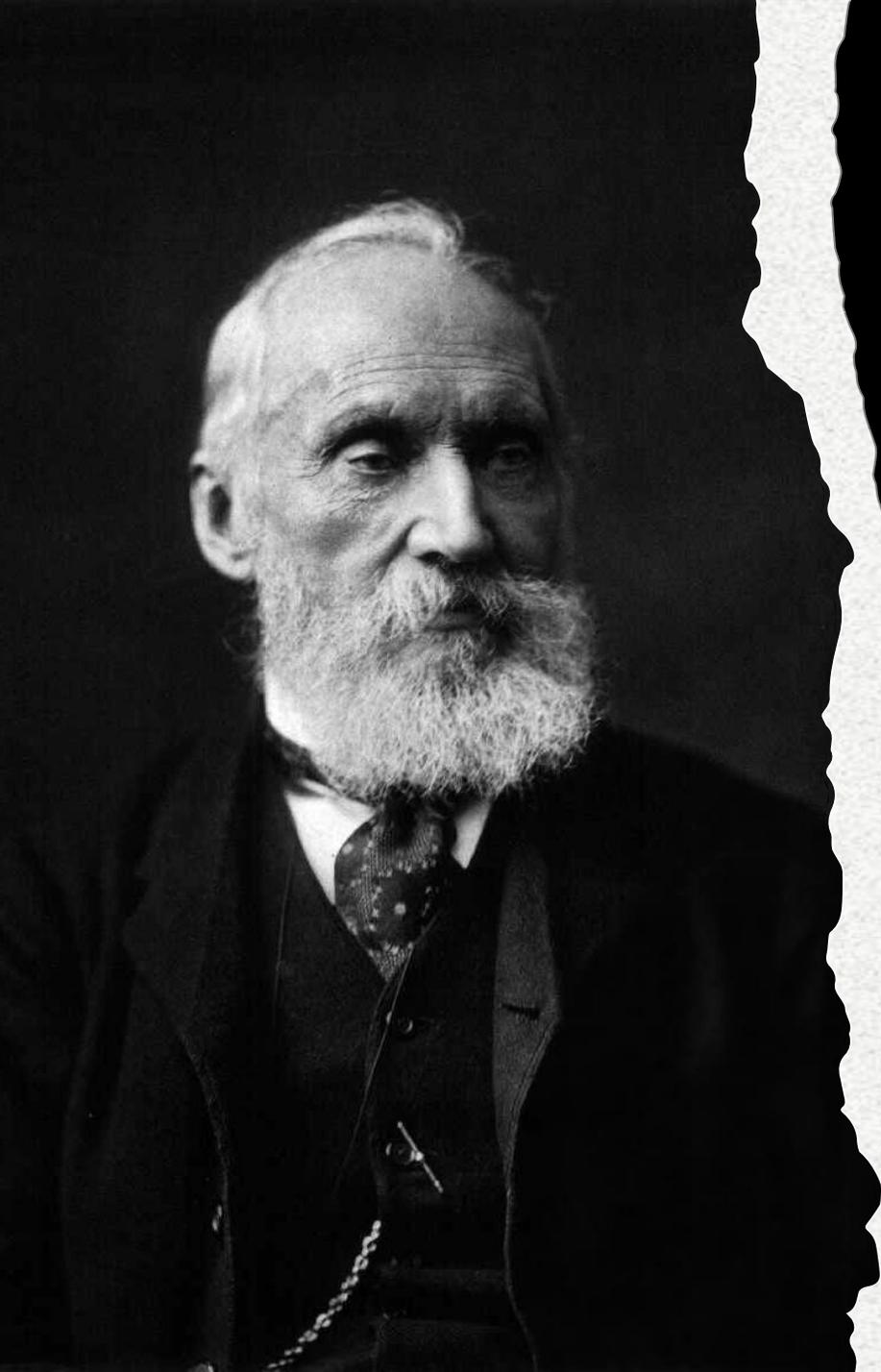
Proveremo a fare un viaggio ragionando come i padri della Fisica Moderna agli albori del 1900, trovandosi a mediare tra molti conflitti concettuali

- Energie infinite
- Osservazione sperimentale della costanza della velocità della luce
- Concetto di misura

Le (pochissime) formule che troverete servono per mettere in risalto la «semplicità» delle equazioni rispetto alla rivoluzione culturale che le nuove teoria hanno portato nel mondo scientifico (e non!)



Le formule non mordono!



...le ultime parole famose!

“There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.”

Lord Kelvin, 1900

Nei 30 anni successivi si svilupparono una serie di teorie che costituiranno le fondamenta della Fisica Moderna: Relatività e Meccanica Quantistica

Da quale cominciamo?



Perché studiare la relatività?

- Le particelle elementari si muovono a velocità prossime a quelle della luce: sono descrivibili solo tenendo conto della teoria della relatività.
- L'equivalenza massa-energia gioca un ruolo cruciale nella comprensione dei processi «virtuali» e nella descrizione dei mediatori delle interazioni fondamentali. Inoltre è alla base dello sfruttamento dell'energia nucleare.
-e poi...perché è una teoria potente, elegante, che ha una profonda influenza su come concepiamo lo spazio e il tempo !

The background is a vibrant, abstract composition of overlapping organic shapes in shades of teal, yellow, and orange. These shapes are filled with various patterns: some have small white dots, others have larger white ovals, and some have thin white lines. A prominent teal shape in the upper center contains a pattern of white ovals. To its right, a yellow shape features a pattern of small red dots. Below these, a teal shape has a pattern of small white dots. The overall effect is a rich, textured, and colorful abstract design.

Qual è il «vero» numero?

Punti di vista

The background is a vibrant, abstract composition of overlapping organic shapes in shades of teal, yellow, and orange. These shapes are filled with various patterns: white dots, red dots, white dashes, and white vertical lines. A large, stylized number '9' is centered in the upper half, with a blue-to-green gradient.

9

E adesso?

Punti di vista

**Non tutti potrebbero essere
d'accordo...**



Punti di vista

**Eppure per qualcuno ancora
non tornano le cose!
Questo osservatore non è
solidale al moto!**



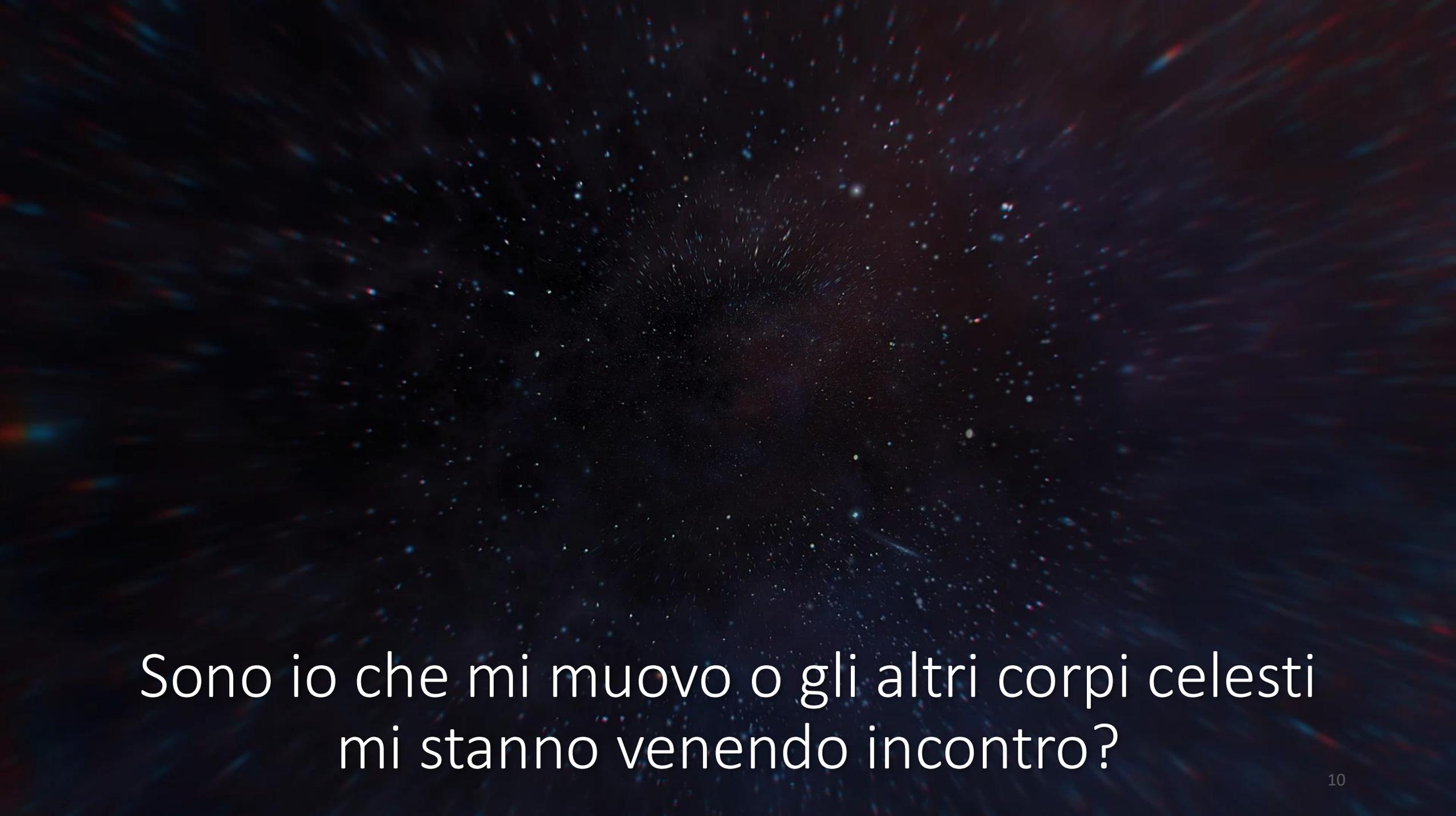
**Osservatore e numero sono in
moto con la stessa velocità... il
numero è fermo (ed è 9)**

**Che numero vede
l'osservatore?**



E adesso?

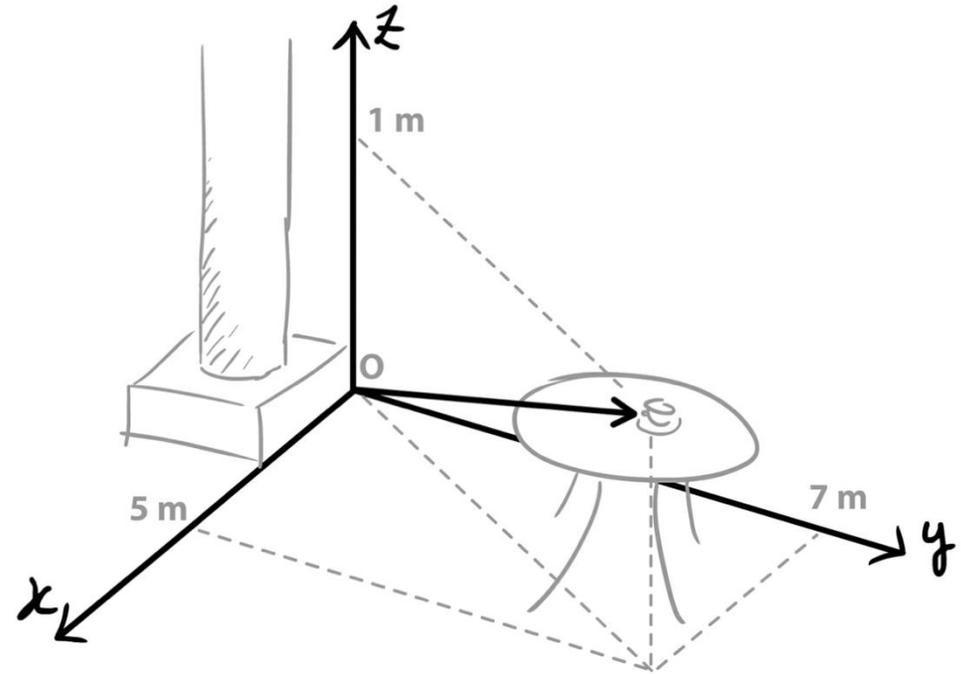
Punti di vista



Sono io che mi muovo o gli altri corpi celesti
mi stanno venendo incontro?

Cosa è un sistema di riferimento?

Qualunque oggetto cui sono associati una terna di assi e un sistema di orologi identici e sincronizzati posti in ogni punto dello spazio



Cosa ha di speciale questa scelta?

Nessuna! Avrei potuto scegliere qualsiasi altro punto d'origine. Esistono infiniti sistemi di riferimento, fermi o in moto rispetto a quello che io ho scelto

Cosa è un sistema di riferimento?

Abbiamo alcune definizioni da introdurre se vogliamo «rapportarci» ad un altro sistema di riferimento / osservatore



Il tempo

È lo stesso per tutti gli osservatori?



Lo spazio

Come cambia tra sistemi di riferimento?



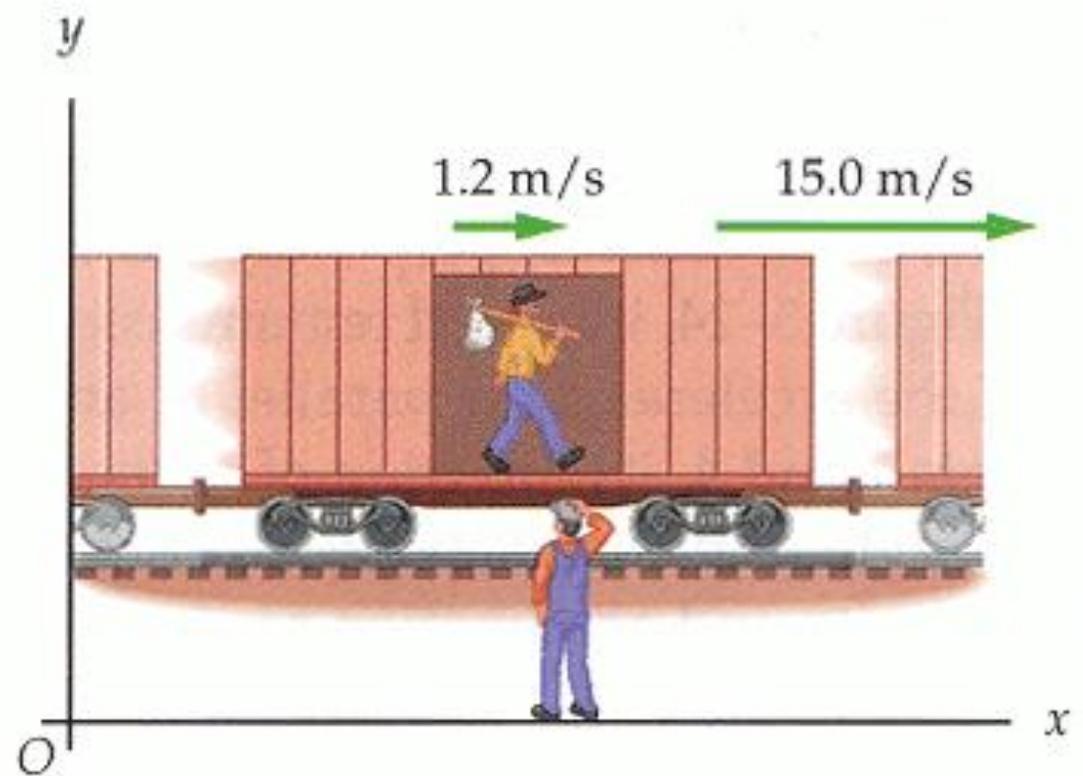
La velocità

Cosa succede tra due sistemi di riferimento in moto l'uno rispetto all'altro?

I sistemi di riferimento inerziali

Sistemi dove vale il principio di inerzia: se un punto materiale è libero, cioè non sottoposto a forze oppure sottoposto ad una risultante nulla di forze, allora persevererà il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finché esso non viene perturbato.

COME PASSO DA UN SISTEMA DI RIFEIRMENTO ALL'ALTRO?



- Trasformazioni basate sull'esperienza quotidiana
- Il concetto di moto è relativo a qualcosa: "A si muove rispetto a B", ma anche "B si muove rispetto ad A"

I sistemi di riferimento inerziali

Sistemi dove vale il principio di inerzia: se un punto materiale è libero, cioè non sottoposto a forze oppure sottoposto ad una risultante nulla di forze, allora persevererà il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finché esso non viene perturbato.

Domanda: posso individuare il RI in cui mi trovo?

NON con le leggi della meccanica: queste hanno la stessa forma (i.e., sono **covarianti**) in tutti i RI (**Principio di Relatività**)

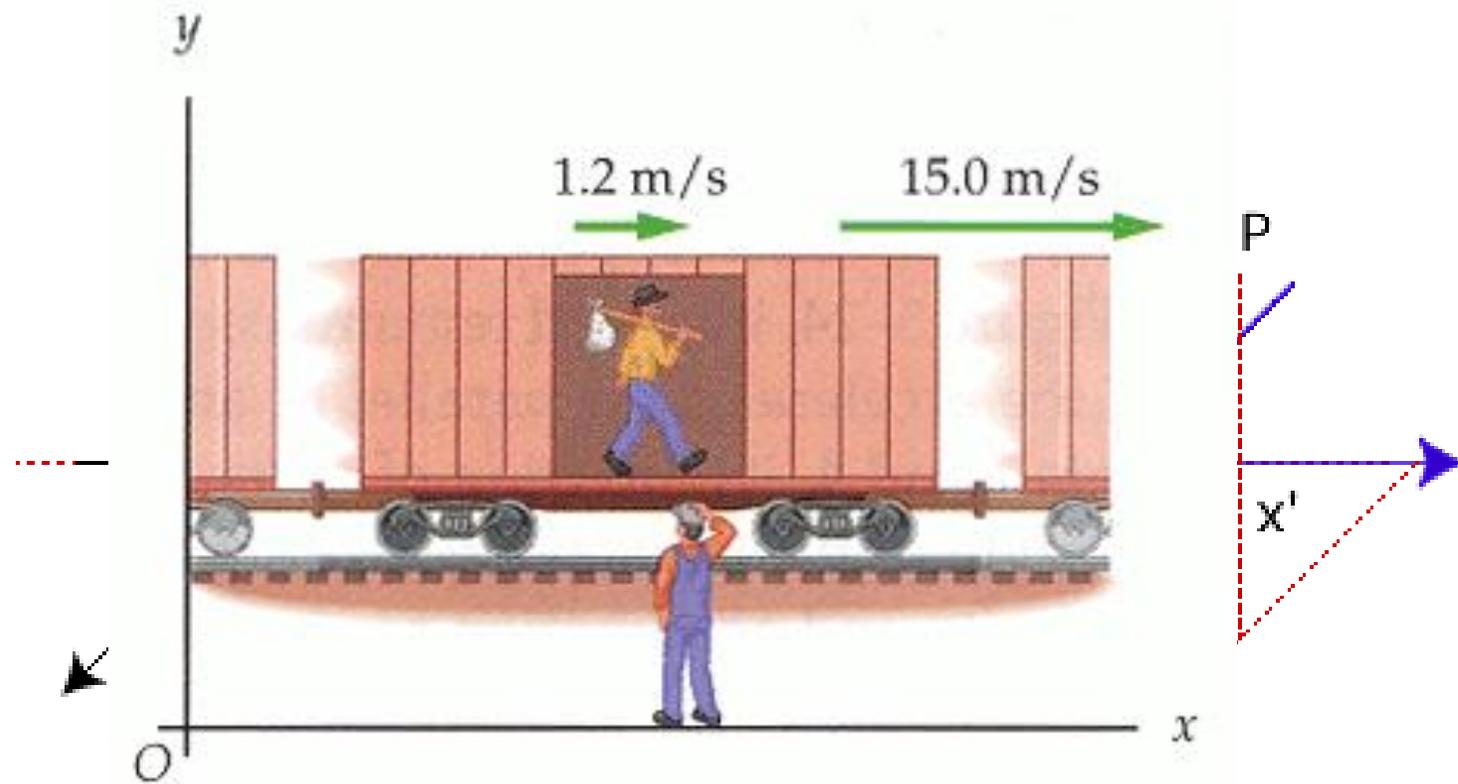
NB – così non fosse, avremmo ∞ descrizioni diverse del mondo a seconda del RI utilizzato per descriverlo

Più precisamente: **tutti i RI sono fisicamente equivalenti**, i.e., risultati degli esperimenti non dipendono dal RI in cui vengono osservati

Le trasformazioni di Galileo

Individuazione delle trasformazioni di coordinate spazio-temporali per il passaggio da un RI a un altro richiede ulteriore postulato che coinvolge il tempo: il tempo è **assoluto**, ossia è lo stesso in qualsiasi sistema di riferimento

Principio di Relatività Galileiano: le leggi della meccanica sono covarianti rispetto alle trasformazioni di Galilei



$$\begin{aligned}\vec{x}' &= \vec{x} - \vec{v}t \\ t' &= t \\ \vec{u}' &= \vec{u} - \vec{v}\end{aligned}$$

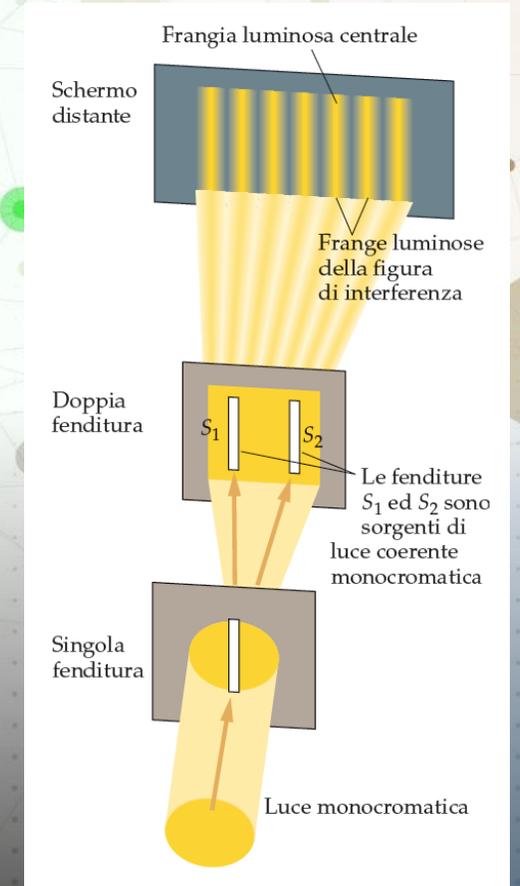
A che velocità sta andando il vagabondo nel sistema di riferimento solidale all'altro osservatore?

Principio di relatività (come l'aveva pensato Galileo)

Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti: siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza. [...] Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così: fate muovere la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur di moto uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma. »

La luce

Spostiamoci in avanti di 200 anni...nel 1865 Maxwell risolve il dilemma della luce!



Le inconsistenze con la luce

- Le equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo permettono di descrivere la luce come un'onda elettromagnetica.
- Esse prevedono che nel vuoto tale onda si propaghi con una velocità ben definita, data dal prodotto di due costanti fondamentali:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m / s}$$

Problema: le equazioni di Maxwell non sono covarianti per trasformazioni galileiane: il PRG non è applicabile ai fenomeni elettromagnetici!

Che fare?

1. Principio di Relatività deve valere anche per i fenomeni e.m. → le trasformazioni galileiane non sono corrette
2. La velocità della luce dipende dal riferimento in modo da investigare sperimentalmente → Principio di Relatività valido solo per la meccanica; fenomeni e.m. descrivibili solo in un riferimento privilegiato: etere

L'etere

All'epoca di Maxwell tutte le onde si propagavano in un mezzo. Si riteneva che esistesse un mezzo materiale, l'**etere**, attraverso il quale si propagavano le onde elettromagnetiche.

L'etere si muove rispetto alla Terra con una data velocità, creando il cosiddetto vento d'etere.

Come provarne l'esistenza? Se esiste l'etere, e se la luce si propaga attraverso questo, le onde nell'attraversarlo subiranno una variazione in positivo o in negativo della loro velocità (pensiamo quando nuotiamo al mare!)

Etere e luce paralleli



v_E



c

$$v = v_E + c$$

Etere e luce antiparalleli



v_E

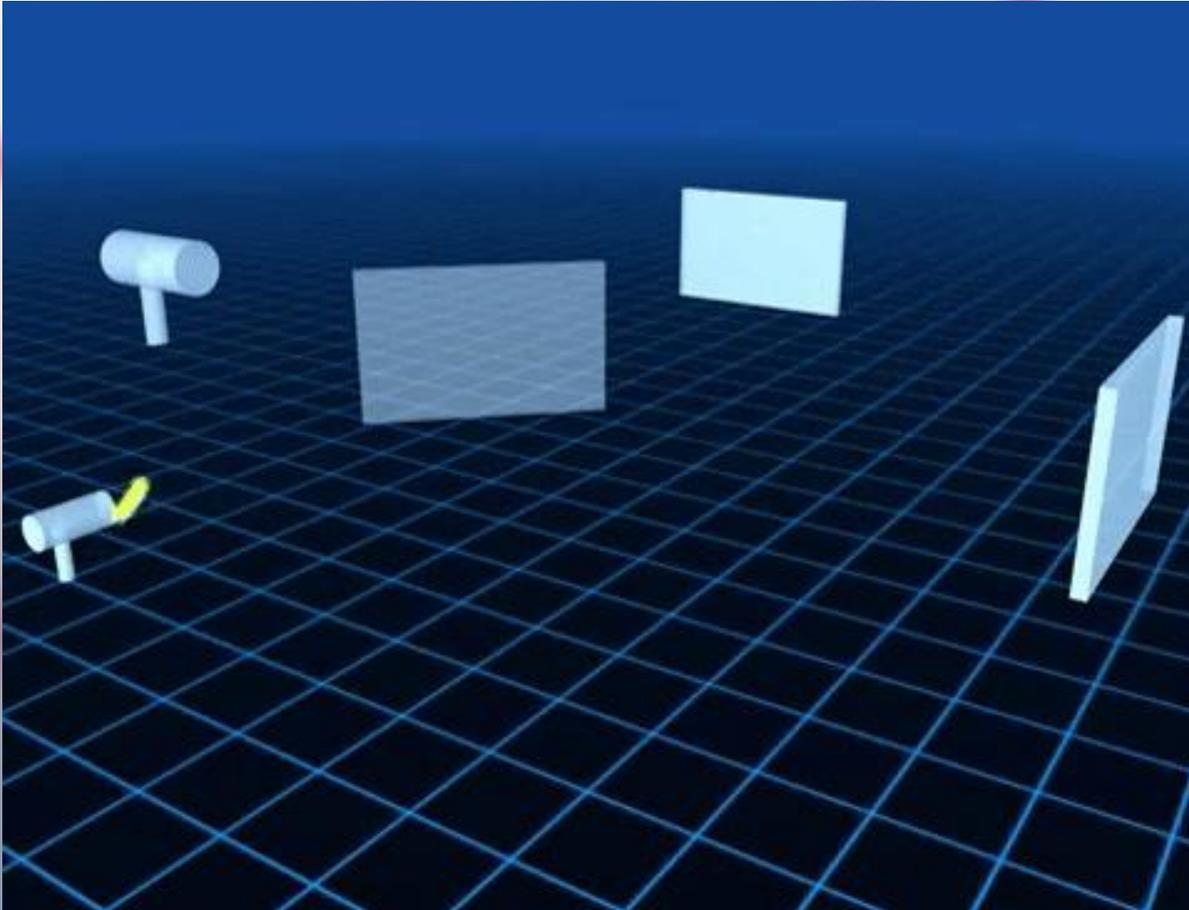


c

$$v = v_E - c$$

L'esperimento di Michelson-Morley

A partire da queste considerazioni Michelson e Morley idearono nel 1887 un esperimento per dimostrare l'esistenza dell'etere



L'idea di fondo era che la figura di interferenza che si creava cambiava se tutto il sistema veniva ruotato

Non sono state osservate variazioni!

L'esperimento di Michelson-Morley

L'esperimento di Michelson Morley portava ad una serie di conclusioni rivoluzionarie:

1. L'etere non esiste
2. La velocità della luce resta costante in qualsiasi sistema di riferimento la si guardi. In altre parole non puoi cambiare la velocità della luce



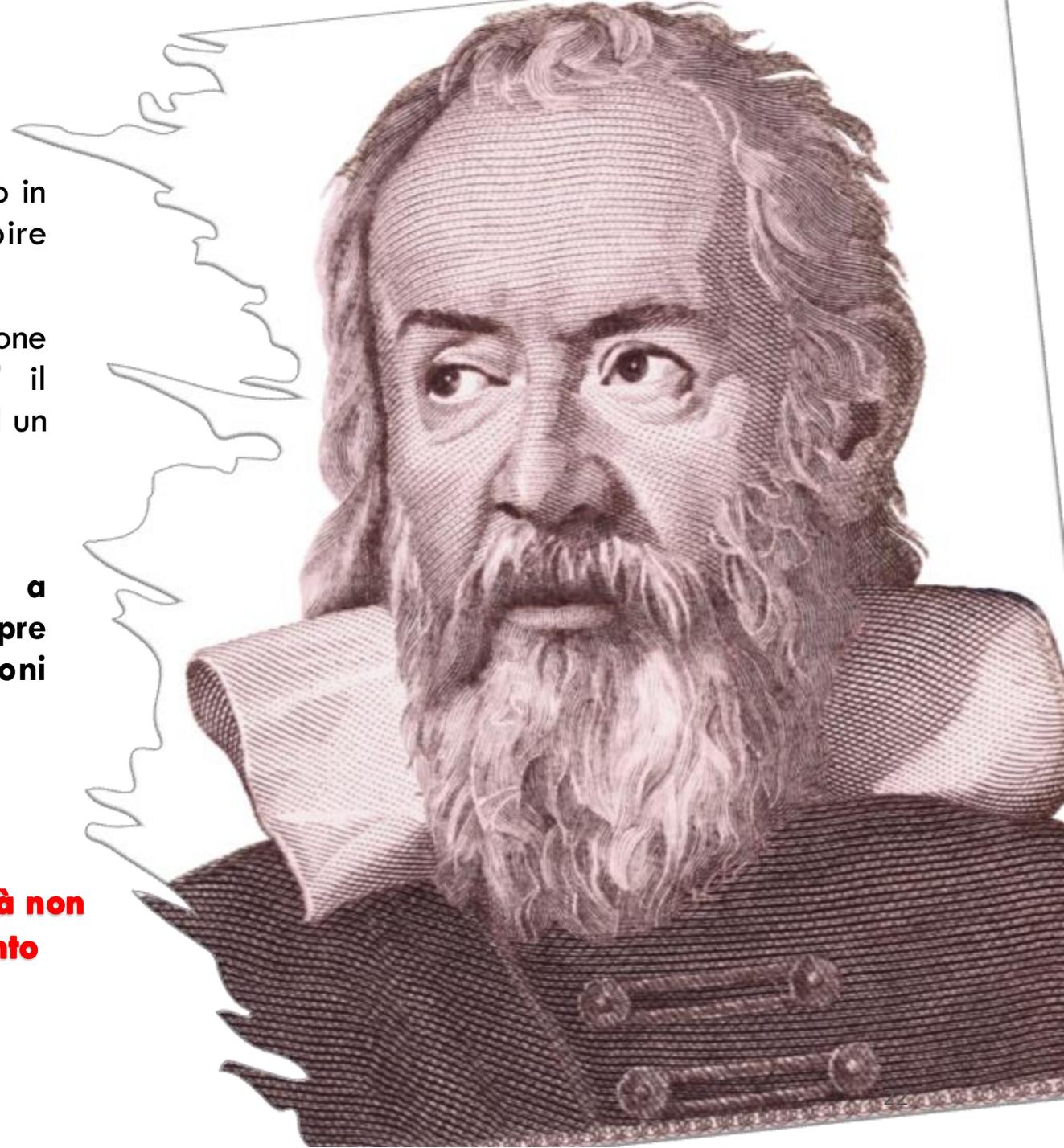
In particolare la seconda conclusione è “grave” perchè mina i principi dati dalle trasformazioni galileane, considerati capisaldi della Meccanica

Il principio di relatività - Galileo

- Riprendiamo il moto dei due astronauti. Questi fluttuano in assenza di forze e nessuno dei due è in grado di capire chi è in moto.
- Cosa succede se applico una forza? C'è una variazione del moto, e chi è soggetto alla forza "avverte" il cambiamento del suo stato di moto. (Diamo dei razzi ad un astronauta)

Conclusione: per sistemi inerziali (in moto relativo a velocità costante) le leggi della dinamica sono sempre valide, e le velocità si sommano secondo le trasformazioni di Galileo.

Ma la luce non si comporta così! La sua velocità non cambia passando da un sistema di riferimento all'altro!

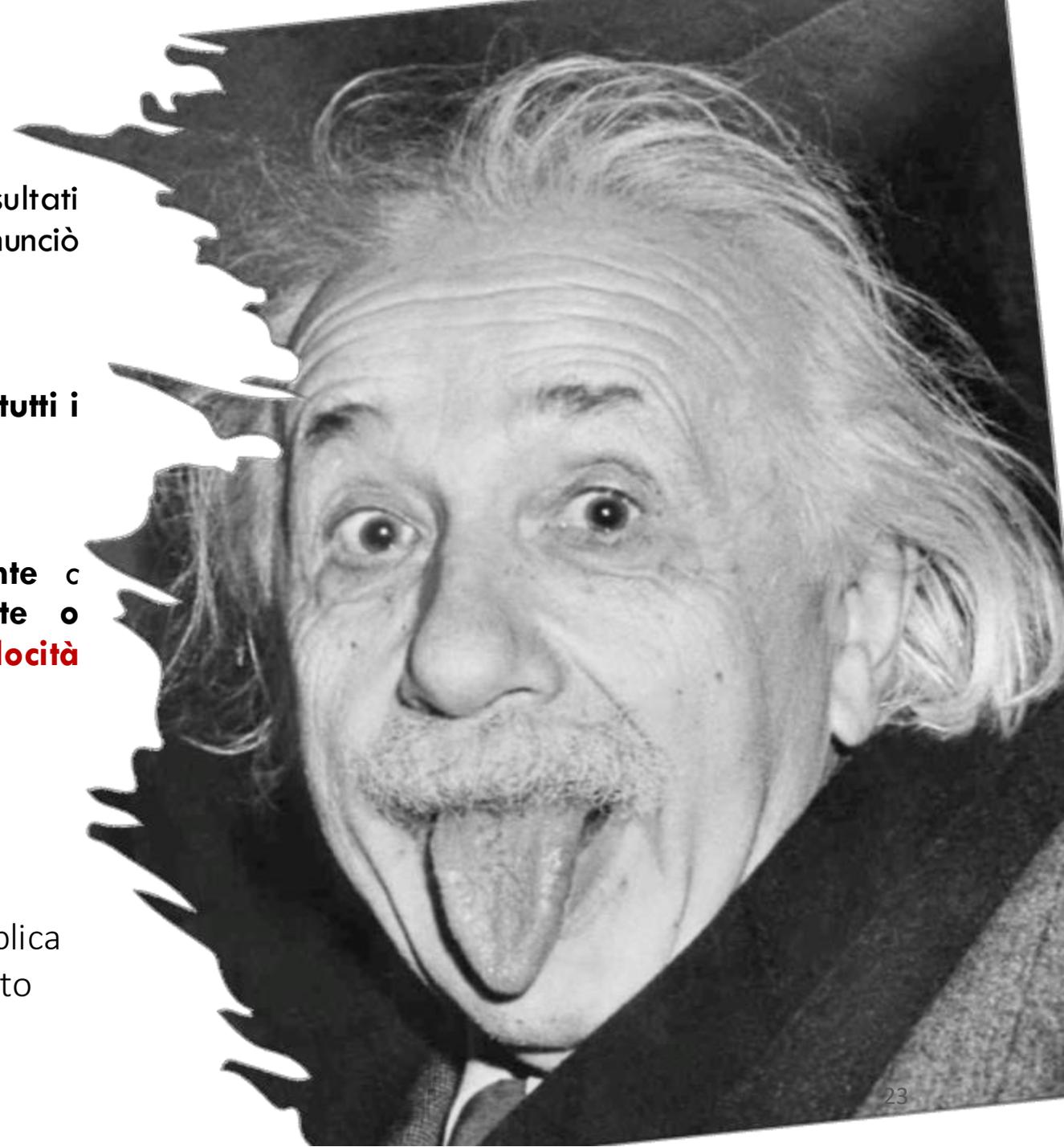


Il principio di relatività - Einstein

Sulla base della teoria dell'elettromagnetismo e dei risultati dell'esperimento di Michelson Morley, Albert Einstein enunciò due postulati che "allargavano" il principio di relatività:

1. **Le leggi della Fisica (tutta la fisica!) sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali (principio di relatività)**
2. **La luce si propaga nel vuoto a velocità costante c indipendente dallo stato di moto della sorgente o dell'osservatore (postulato della costanza della velocità della luce)**

È il 1905, l'*annus mirabilis* di Einstein. Lo scienziato pubblica tre articoli rivoluzionari, sulla relatività ristretta, l'effetto fotoelettrico e il moto browniano



Conseguenze

Quali sono le conseguenze dei postulati di Einstein? La velocità è una grandezza strettamente connessa con i concetti di spazio e tempo. E sono proprio queste due grandezze che saranno rivoluzionate dalla teoria della relatività ristretta.

$$v = \frac{s}{t}$$

La velocità della luce non cambia, è una costante indipendente dal Sistema di riferimento

Qui bisogna intervenire!

Le trasformazioni di Lorentz

Quali trasformazioni tra RI compatibili con i postulati della Relatività Speciale?

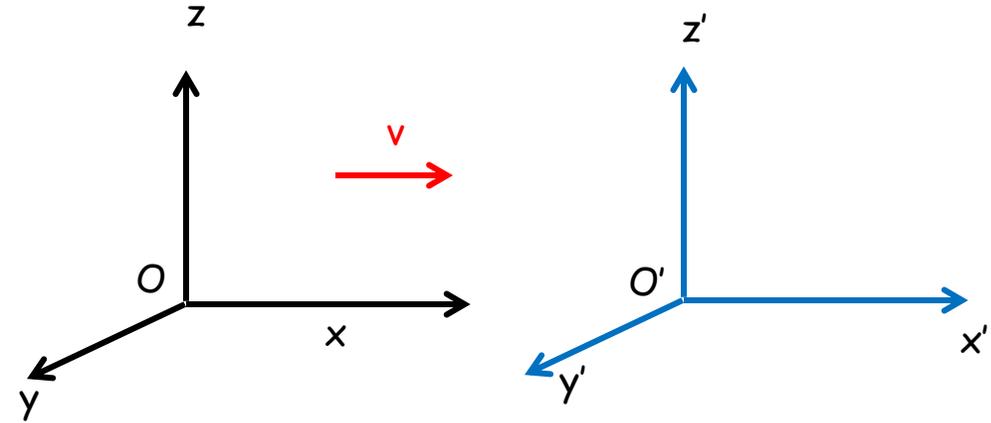
Condizione fondamentale da assicurare: invarianza intervallo tra due eventi. Nella trasformazione $K \rightarrow K'$ deve rimanere inalterata una combinazione di coordinate spaziali e del tempo

Anche il tempo dell'evento deve cambiare!

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$y' = y$$

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



Confronto **Lorentz** vs **Galilei**:

- Dipendenza dal tempo dal RI, $t' \neq t$

- Presenza del fattore lorentziano $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

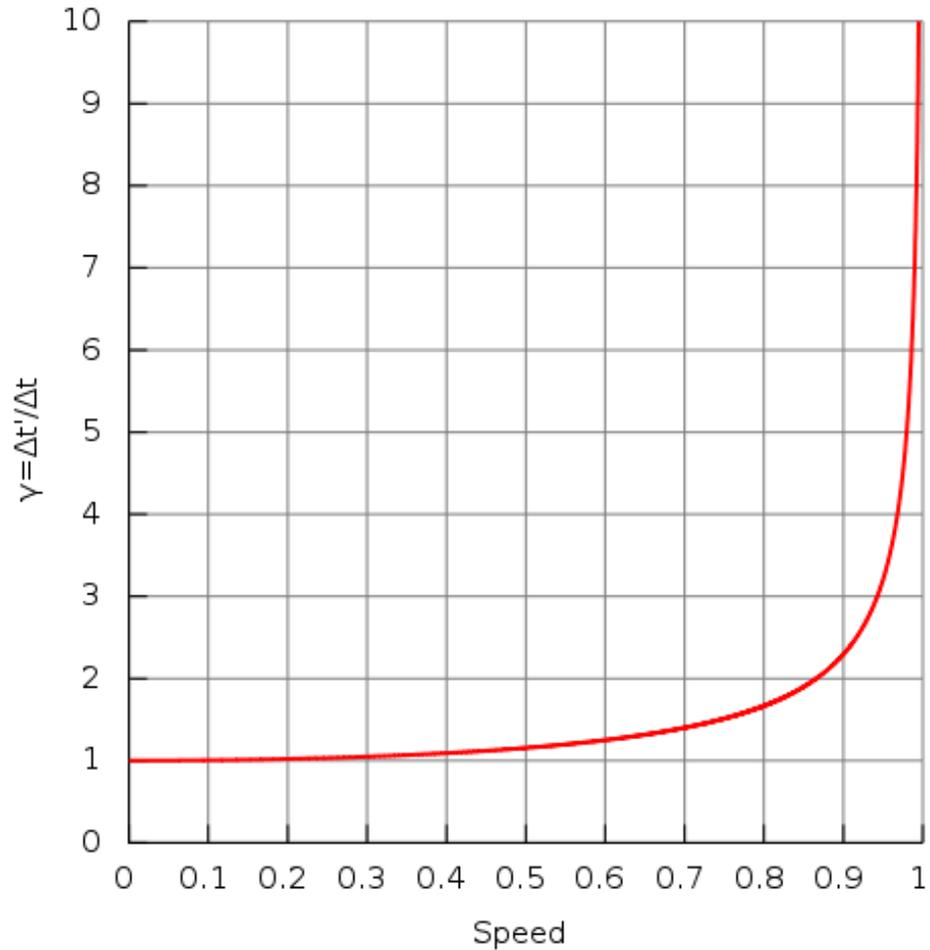
- La legge di composizione delle velocità diventa $v' = \frac{v - U}{1 - \frac{v \cdot U}{c^2}}$

Velocità limite

Cosa succede se due particelle di velocità $\frac{3}{4}c$ collidono una verso l'altra? Quanto fa le velocità relative? Appliciamo la formula di addizione di Einstein:

$$v' = \frac{v - U}{1 - \frac{v \cdot U}{c^2}} = \frac{\frac{3}{4}c - (-\frac{3}{4}c)}{1 + \frac{9c^2}{16c^2}} = \frac{6}{4}c \cdot \frac{16}{25} = \frac{24}{25}c$$

- ✓ esistenza di velocità limite = c
→ costanza della velocità della luce diviene una conseguenza
- ✓ causalità (i.e., invarianza dell'ordinamento temporale causa-effetto)
→ esiste una velocità limite v_L → TL si ottengono imponendo $v_L = c$



Il fattore γ è sempre maggiore o uguale a 1 e tende a infinito quando U si avvicina a c . Per velocità della luce «infinite» si riottengono le trasformazioni di Galileo
N.B. Qualcuno preferisce dire per velocità molto più piccole di quelle della luce...

Conseguenze della relatività ristretta

- **Impossibilità dell'azione a distanza:** Discende immediatamente dal concetto di velocità limite, un'azione a distanza propagherebbe i suoi effetti con velocità infinita. Questo rende centrale il concetto di campo rispetto a quello di forza, e, in Meccanica Quantistica, porta al concetto di mediatore
- **Dilatazione dei tempi :** un orologio in movimento «batte il tempo» a un ritmo più lento di un fattore γ : $\Delta t' = \gamma \Delta t$
- **Contrazione delle lunghezze :** un righello in movimento «si accorcia» di un fattore γ : $L' = L_0 / \gamma$. Questo perché per misurarne la lunghezza devo misurare la distanza fra gli estremi allo stesso istante. Ma la simultaneità è relativa!



La contrazione lunghezze

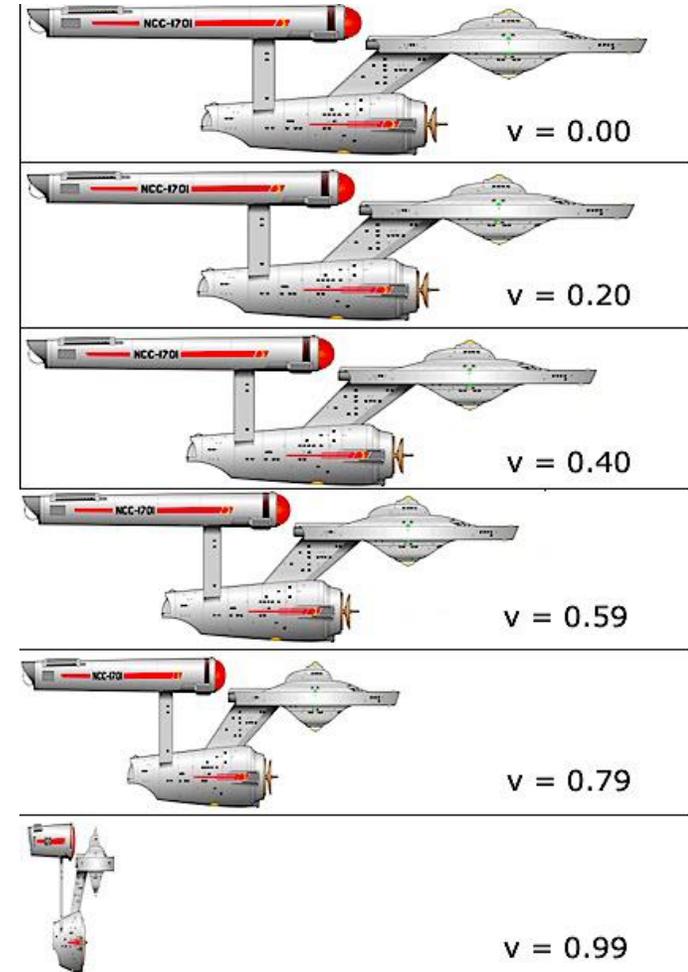
Gli osservatori percepiscono gli oggetti in moto come se fossero contratti nella direzione del moto stesso.

Un osservatore in moto rispetto al regolo misura una **lunghezza minore di quella propria** (che per definizione è quella misurata nel sistema di riferimento in cui il regolo è in quiete)

NB – origine del fenomeno: le misure delle estremità del regolo, simultanee in un RI, non lo sono nell'altro: la struttura molecolare dei corpi non si modifica; no proprietà intrinseca del corpo, ma relazione tra misure effettuate da osservatori in moto relativo

– effetto **reciproco**: se invece che in K' il regolo fosse in quiete rispetto a K , sarebbe la lunghezza in K' a risultare contratta del fattore γ

dimensioni nelle direzioni perpendicolari a quella del moto rimangono invariate
→ volume si **contrae** (densità si **cresce**) di un fattore γ





La dilatazione dei tempi

“orologio in moto ritarda”: il ritmo di scansione del **tempo di un orologio in moto rallenta rispetto a quello proprio** (quello misurato nel RI in cui l’orologio risulta in quiete)

NB – al pari della contrazione delle lunghezze, si tratta di un effetto **reciproco**: se l’orologio fosse in quiete in K e registrasse la differenza in tempo tra due eventi che accadono nello stesso punto, un osservatore in K’, con i propri orologi, misurerebbe un intervallo temporale maggiore di un fattore γ

Vediamo qualche esempio...

I muoni sono particelle che si formano negli strati superiori dell'atmosfera. Queste particelle hanno una vita molto breve, e alla loro "morte" si disintegrano in altre particelle

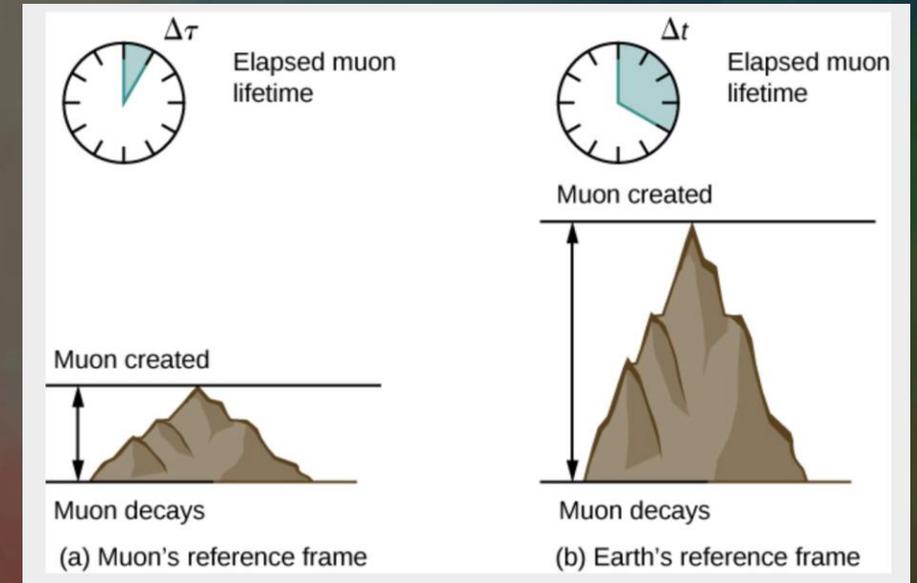
$$t = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s}; v \approx c$$

Quanto spazio percorrono?
Facile!

$$s = vt = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} = 660 \text{ m}$$

I muoni dovrebbero "morire" dopo 600 m dalla loro formazione, quindi negli strati alti dell'atmosfera.

In realtà, da quando abbiamo fatto il calcolo ci hanno attraversato circa 5000 muoni!



Interpretiamo i risultati con i concetti della relatività:

- Punto di vista della Terra: il muone si muove rispetto alla terra con velocità c . La sua vita media si dilata quindi di 25 volte ($t = 37.5 \times 10^{-6} \text{ s}$) e quindi percorre circa 11km
- Punto di vista del muone: il muone è in movimento rispetto alla Terra, che vede dunque "accorciata" di 25 volte, l'atmosfera per lui è spessa solo 600 m circa

Vediamo qualche esempio...

Facciamo un piccolo esperimento. **Siamo su un vagone** di un treno che si muove a velocità costante. Agli estremi del vagone ci sono due dispositivi che raccolgono la luce A e B. Dal centro del vagone facciamo partire due raggi di luce.

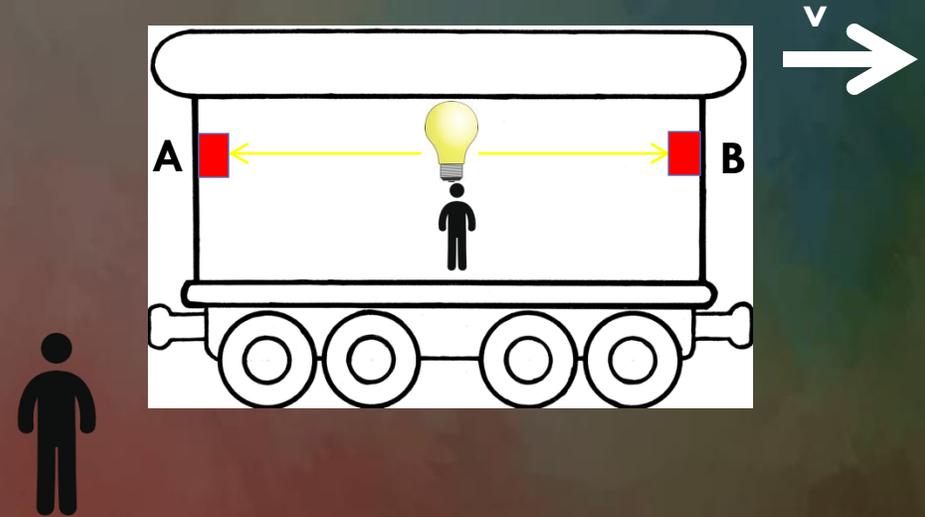
1. Dove arriva prima la luce?

Arriva nello stesso tempo

2. E per un osservatore che vede il tutto all'esterno del treno?

Arriva prima in A! Perché?

La luce ha la stessa velocità in ogni sistema di riferimento, dunque arriva prima da A che si avvicina al raggio luminoso, rispetto a B che si allontana da questo



La simultaneità degli eventi è persa!

Vediamo qualche esempio...

Il vostro GPS non funzionerebbe bene se non tenessimo in conto degli effetti relativistici!

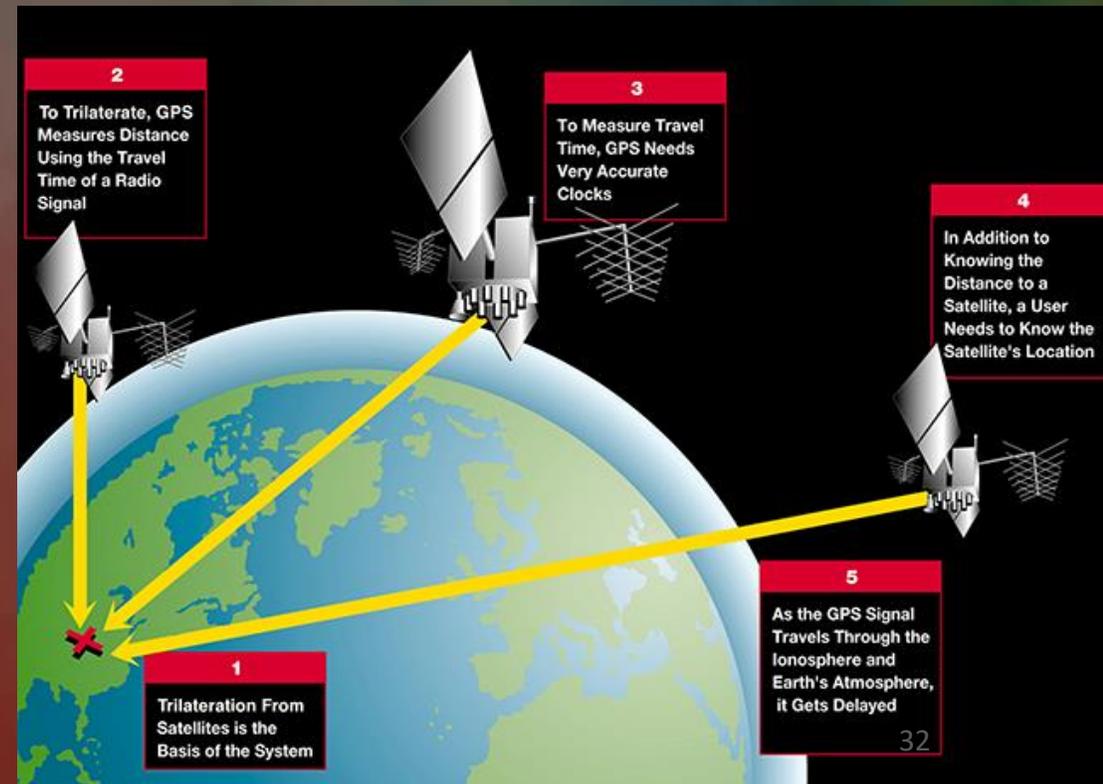
GPS: almeno 4 satelliti mandano frequentemente un segnale che contiene l'ora esatta (al ns circa) dell'istante in cui il segnale è partito e la posizione del satellite (orbite ellittiche). Il dispositivo risolve il sistema di equazioni e trova il tempo e la posizione

Ma un orologio in movimento va più piano di un orologio in quiete!

I satelliti orbitano a circa 14000 km/h, quindi

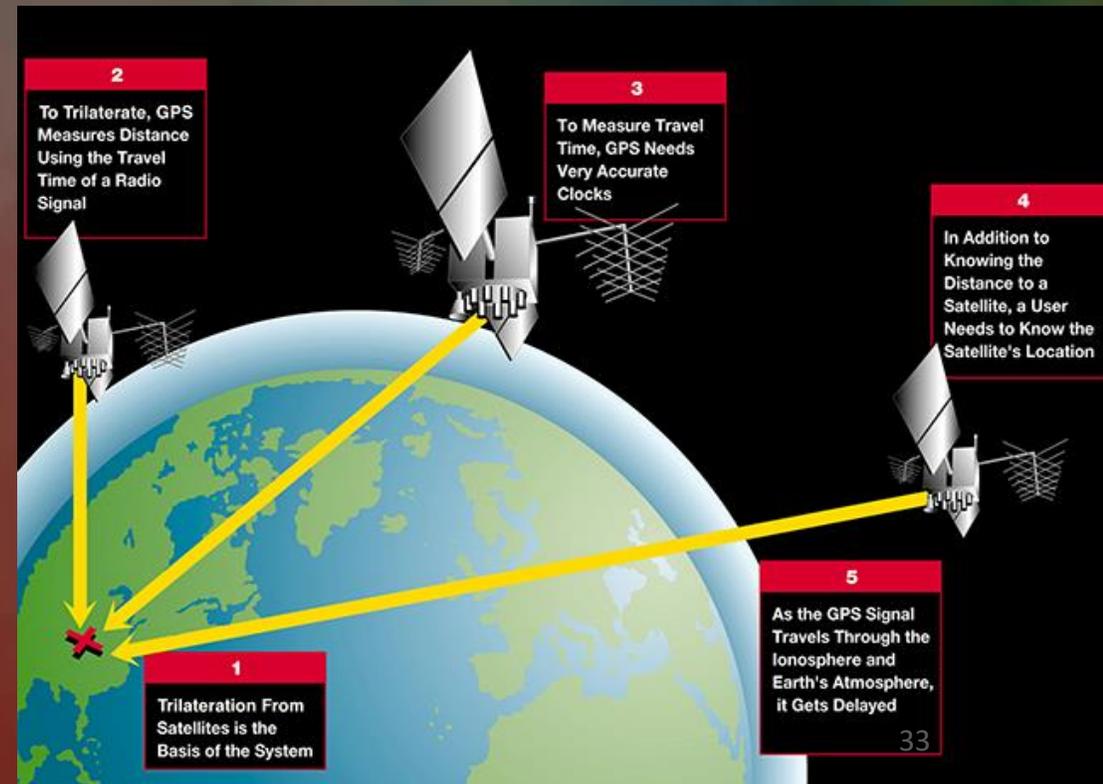
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1,0000000000834 \rightarrow 7.1 \mu s/g$$

Qual è l'errore accumulato in un giorno? Circa 2.2 km!



Vediamo qualche esempio...

In realtà vanno tenuti in conto anche gli effetti della Relatività Generale altrimenti gli errori nelle posizioni globali continuerebbero ad accumularsi ad una velocità di circa 10 chilometri ogni giorno!



Va bene, ma io conosco solo una formula della relatività...

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$E = mc^2$$

$$ds \geq 0$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{df}{dt} = \lim_{h \rightarrow 0} \dots$$

E la formula $E=mc^2$?

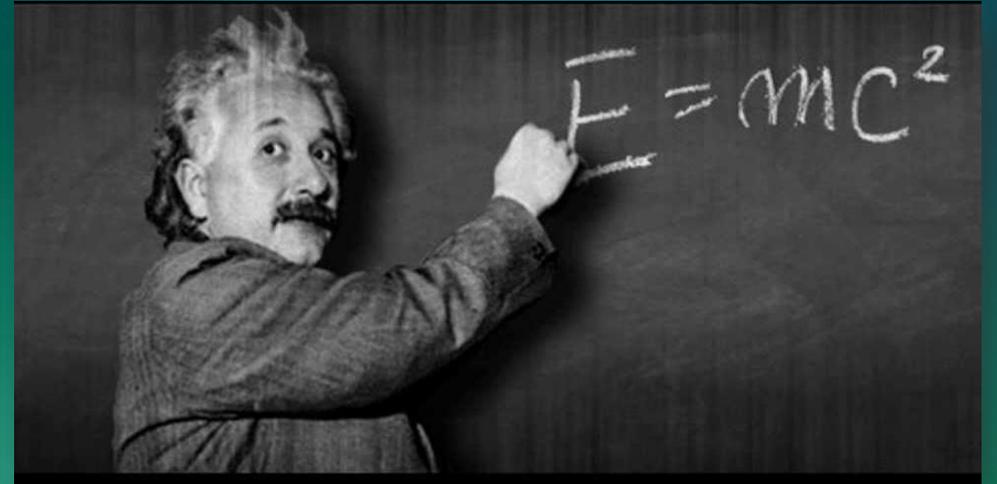
Dato che il tempo e lo spazio sono quantità che cambiano a secondo di dove le si osserva, tutte le grandezze che derivano da queste (velocità, accelerazione, forza, impulso, energia) dovranno essere riscritte in termini relativistici

A voler essere precisi, la formula corretta è

$$E = \gamma mc^2$$

A differenza della consueta energia cinetica, che si annulla se la velocità si annulla, quando la velocità va a zero il fattore γ va a 1. In quel caso la relazione esprime l'energia posseduta da una particella a riposo, per il solo fatto di avere una massa:

$$E_0 = mc^2$$



Un'importante conseguenza è che è impossibile portare un corpo massivo alla velocità della luce. Infatti man mano che la velocità aumenta, aumenta l'energia, e quindi la massa. Diventa quindi sempre più difficile riuscire a "spostare" un corpo pesante.

Solo la luce va alla velocità della luce!

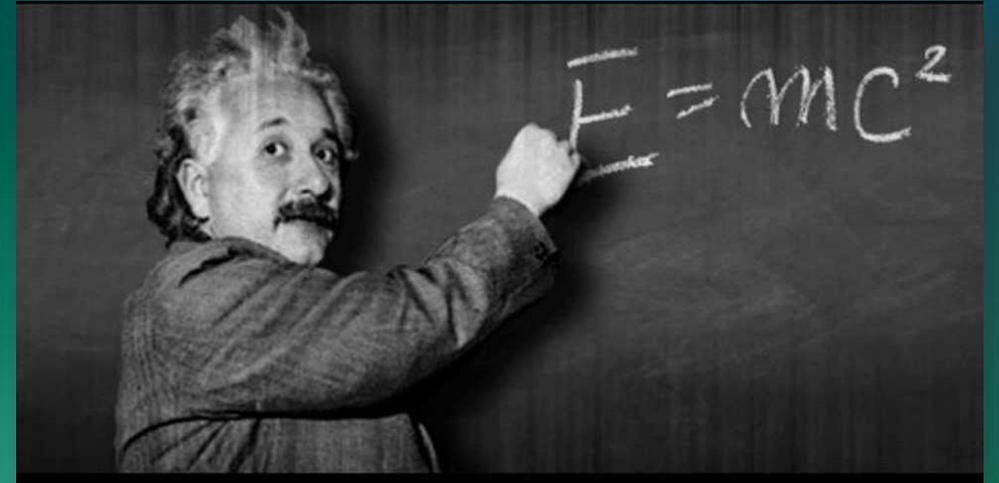
E la formula $E=mc^2$?

Per un sistema composto di più parti interagenti (come un atomo o un nucleo) l'energia potenziale di interazione è contenuta nel termine «di riposo» dell'energia, e quindi cambierà la massa del sistema !

Ad esempio il deutone, sistema legato composto da protone e neutrone ha una massa INFERIORE alla somma delle masse dei suoi costituenti:

$$\begin{aligned}m_p &= 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\m_n &= 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\m_d &= 3,343 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = m_p + m_n - 0,005 \cdot 10^{-27} \text{ kg}\end{aligned}$$

La piccola differenza di massa è proprio dovuta all'energia potenziale (negativa) di interazione dei due corpi, e corrisponde all'energia ($3,57 \cdot 10^{-13} \text{ J}$) che è necessario fornire al sistema per «rompere» il legame e liberare le due particelle.



E nel mondo macroscopico? Non ce ne accorgiamo!

Per 1 kg di acqua che passa da una temperatura di 20°C a 90°C la variazione di massa è

$$\Delta m = C(T-T_0)/c^2 \approx 3.17 \times 10^{-12} \text{ kg}$$

Conclusioni

- La relatività ristretta è in grado di spiegare il comportamento “non classico” della luce
- Da qualsiasi punto di vista la si guardi la luce ha sempre la stessa velocità
- Questo comportamento della luce si riflette su una perdita dell’oggettività di spazio e tempo
 - Non più grandezze uguali per tutti gli osservatori, ma invece dipendenti dallo stato di moto
 - Tempi più veloci, grandezze più corte, perdita della simultaneità, viaggi nel tempo!
 - Concetti decisamente controintuitivi!
- Massa ed energia strettamente collegate
- Gli effetti relativistici sono tanto più marcati quanto più ci muoviamo alla velocità della luce, ecco perchè nel quotidiano non ce ne accorgiamo

Il paradosso dei gemelli

Sulla terra vi sono due gemelli, uno parte per un viaggio interstellare (a velocità relativistiche), l'altro rimane sulla terra ad aspettarlo. Al rientro dal viaggio interstellare i gemelli si rincontrano dopo anni. Per uno dei due il tempo non sembra essere passato...il gemello astronauta è più giovane

La teoria della relatività prevede che il gemello astronauta sia più giovane, facendo le opportune considerazioni nel suo Sistema di riferimento

Ma se mi metto nel Sistema di riferimento del gemello rimasto sulla Terra e rifaccio i calcoli il risultato è esattamente l'opposto! Il gemello astronauta è quello più vecchio!

Cosa sta succedendo?



“Un tempo i giornali scrivevano che solo dodici uomini al mondo erano in grado di capire la teoria della relatività. Non penso che sia vero. Forse c'è stato un momento in cui un uomo solo ne capiva qualcosa, perchè era l'unico che ci stava pensando, prima di scrivere il suo articolo. Ma dopo la pubblicazione, la teoria è stata in qualche modo capita da molta gente, certo più di una dozzina di persone. Invece penso di poter affermare con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica”

Richard Feynman, 1965



Energia infinita?

- Se provassimo a calcolare (classicamente) l'energia elettromagnetica all'interno di un forno (corpo nero) troveremmo infinito!
- L'idea rivoluzionaria di Max Planck: l'energia si presenta in pacchetti ben precisi. Non è una quantità continua, ma discreta.
- Lo scambio di energia tra gli atomi della cavità e la radiazione non avviene in modo continuo ma attraverso “pacchetti di energia”, i **quanti**.



L'energia di ciascun quanto dipende dalla frequenza della radiazione:

$$E = h\nu$$

Dove $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ è la costante di Planck

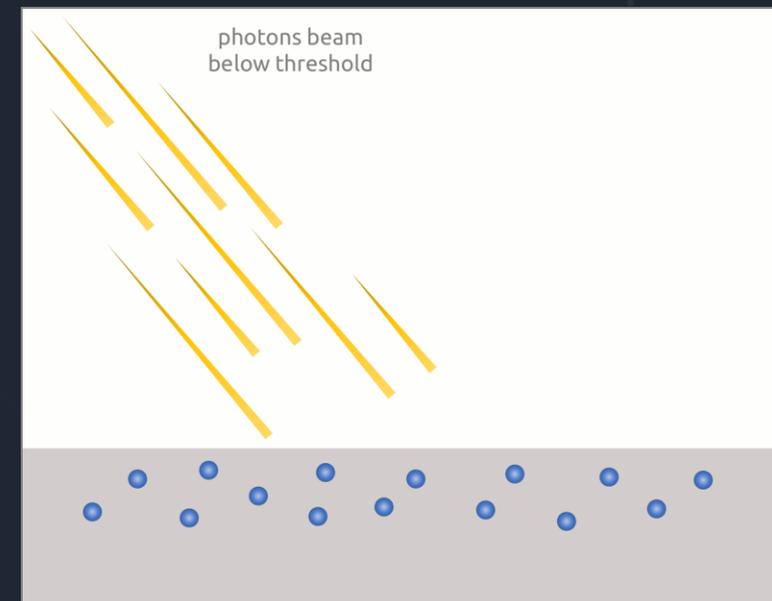
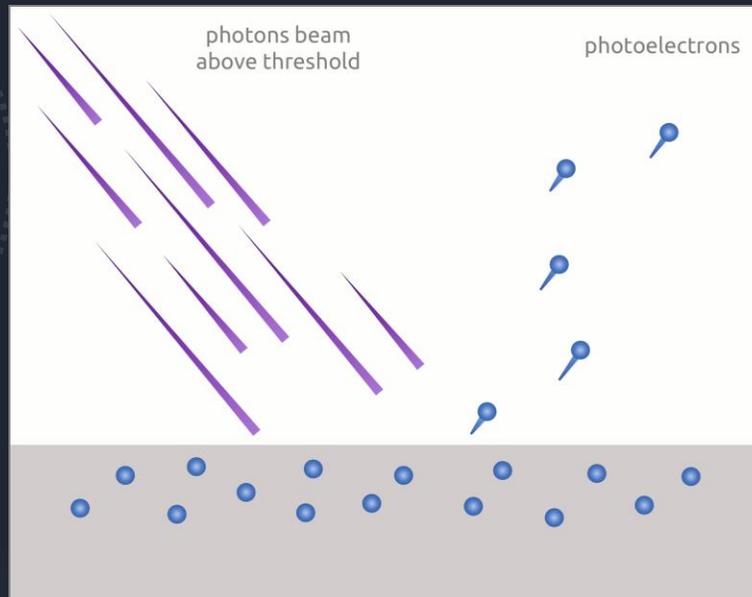
Particelle elettromagnetiche?

Quando la luce incide su un metallo provoca la fuoriuscita di elettroni. Allora se aumento l'intensità della radiazione aumenterà la velocità degli elettroni estratti?

Questo ci si aspettava dalla Fisica Classica, ma si osservava solo un aumento del numero di elettroni. La velocità degli elettroni estratti sembrava dipendere non dall'intensità della radiazione, ma dalla sua frequenza ν

Einstein provò a spiegare l'effetto fotoelettrico in termini di interazione tra due corpi.

Ammettiamo che la luce sia composta da particelle, i **fotoni**, cosa succede quando i fotoni urtano gli elettroni del metallo? Se il fotone ha abbastanza energia per rompere il legame dell'elettrone con il nucleo, allora avviene l'estrazione del metallo. Planck ha trovato la relazione per un quanto di energia



Natura della luce

L'interpretazione di Einstein gettava (di nuovo!) scompiglio nella comunità scientifica. Il dibattito sulla natura della luce, che sembrava definitivamente accantonato in favore dell'ipotesi ondulatoria, era di nuovo un argomento "caldo"

Ma quindi la luce è un'onda o una particella?

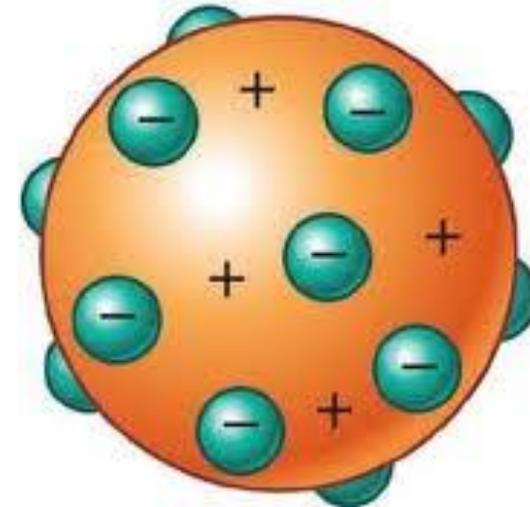
DUALISMO ONDA - PARTICELLA

La luce si presenta come onda o particella a seconda delle condizioni sperimentali

Il Modello Atomico

Ai primi del '900 iniziò a svilupparsi la teoria atomica

Nel 1902 Thomson propose il modello "*plum pudding*" (budino di prugne), nel quale gli elettroni erano sparsi all'interno di una massa carica positivamente, in modo tale da avere una struttura complessivamente neutra

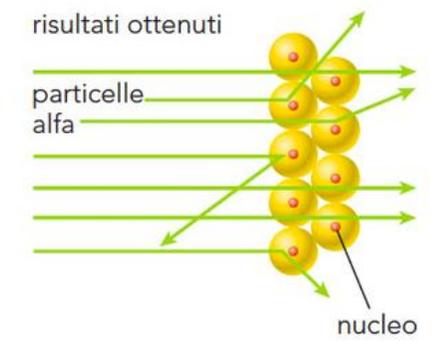
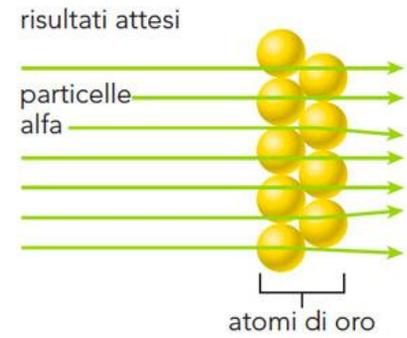
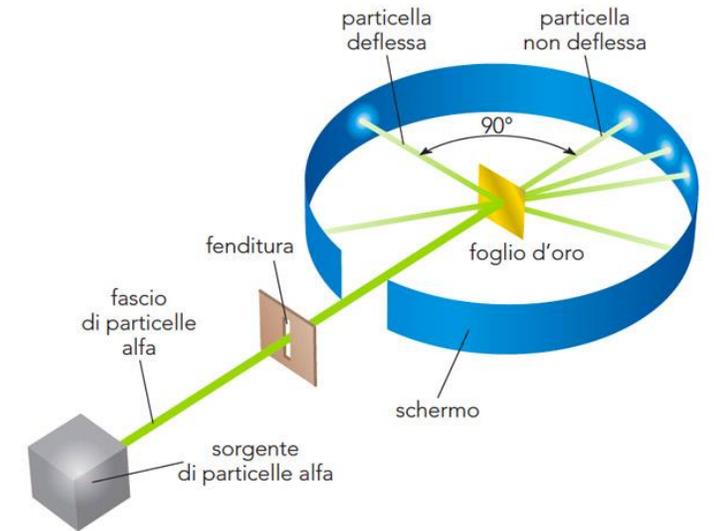


- * Il modello non era in grado di spiegare formalmente la stabilità dell'atomo, dato che le forze elettriche tra le cariche non erano in grado di produrre una configurazione stabile
- * Si iniziarono ad usare gli urti come fonti di informazioni!

L'atomo di Rutherford

Dallo studio degli urti di particelle α prodotte in laboratorio, Rutherford dedusse che l'atomo era una struttura principalmente vuota

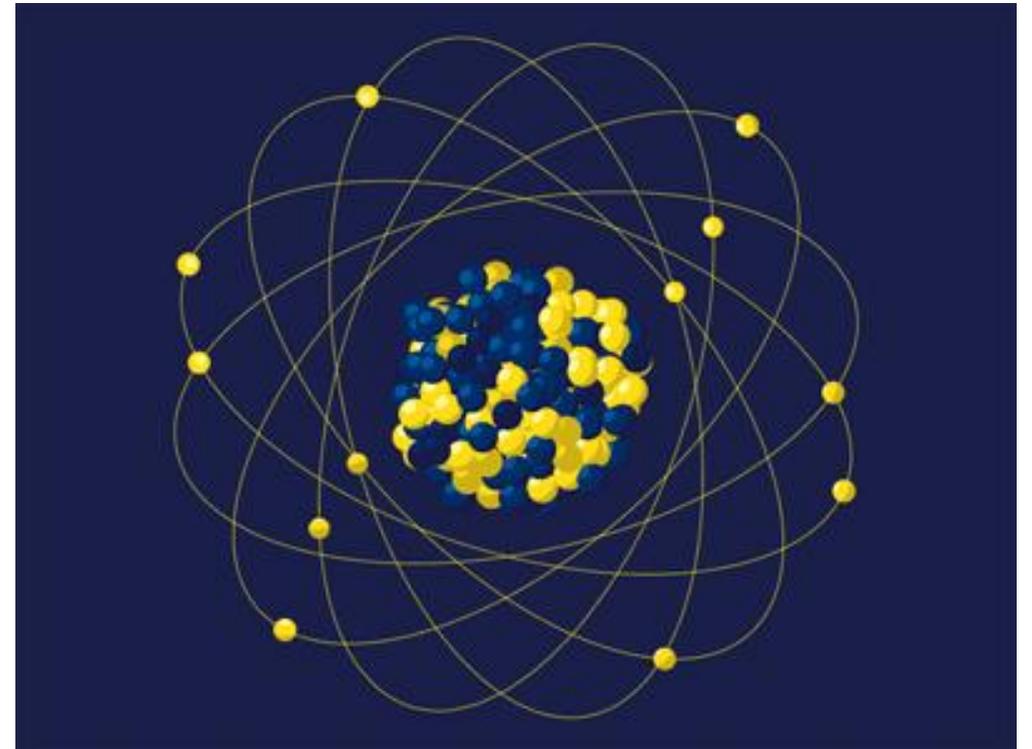
- * Le particelle α sono cariche positivamente
- * Incidendo su una lamina, il fisico trovò che alcune vanivano deviate ed altre invece no
- * Ne concluse che l'atomo era formato da un nucleo centrale positivo, e dagli elettroni che ne ruotavano intorno



L'atomo di Rutherford

Anche il modello planetario di Rutherford “soffriva” di alcuni problemi formali

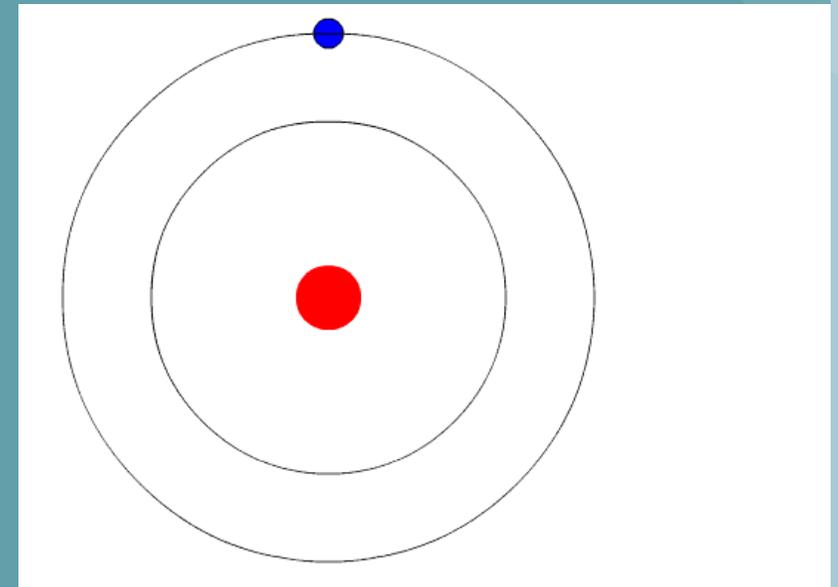
- Una carica elettrica in moto accelerato emette radiazione elettromagnetica
- Questo significa che al perdere dell'energia l'elettrone finiva per “collassare” sul nucleo
- La materia risultava instabile: ma noi siamo qui!



L'atomo di Bohr

Nel 1913 Bohr propose un modello di atomo che spiegava la stabilità della materia con 3 postulati:

1. Un elettrone in un atomo si muove in un'orbita circolare intorno al nucleo, ma non gli sono permesse tutte le orbite possibili, ma solo quelle per le quali il suo momento angolare è un multiplo intero di $h/2\pi$
2. L'elettrone in moto nelle orbite circolari, nonostante sia sottoposto ad una accelerazione costante, non emette radiazione elettromagnetica, quindi la sua energia non cambia e l'atomo resta un sistema stabile
3. La radiazione elettromagnetica è emessa se un elettrone passa da un'orbita permessa ad un'altra. La frequenza della radiazione emessa è $h\nu = E_f - E_i$

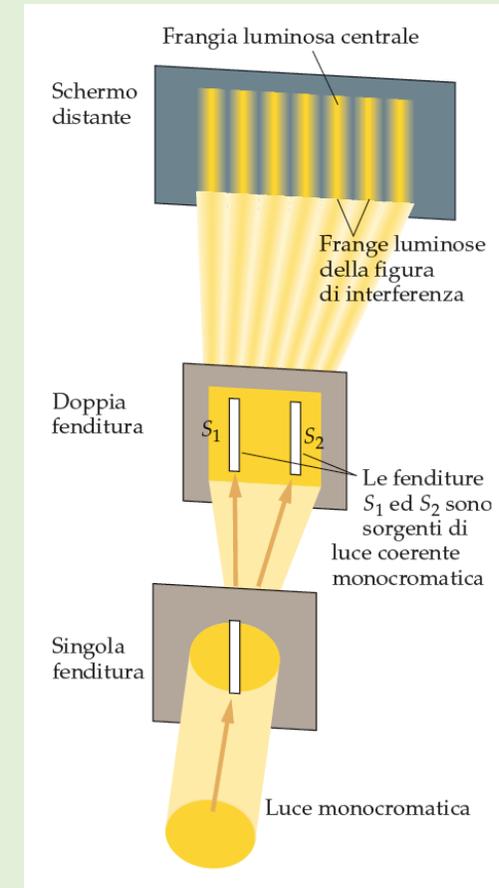


- La radiazione elettromagnetica è formata da corpuscoli (i fotoni) che trasportano una quantità definita di energia che è multiplo intero di una quantità minima
- L'energia risulta quindi una grandezza quantizzata, varia in modo discreto, non continuo
- La luce ha una duplice natura sia ondulatoria che corpuscolare
- Si andava delineando il modello atomico di Bohr, ma restava da capire perchè mai le orbite fossero (come l'energia) quantizzate

Verso la Meccanica Quantistica



Onde elettromagnetiche



Esperimento della doppia fenditura

Riproponiamo l'esperimento di Young della doppia fenditura, ma con dei proiettili. Stavolta abbiamo una "mitragliatrice" di elettroni



- * Con una fenditura aperta è facile aspettarsi il risultato in figura
- * E con due fenditure anche è ovvio, **giusto?**

SBAGLIATO!

Esperimento della doppia fenditura

La figura che si forma è quella tipica delle frange d'interferenza già viste con l'esperimento di Young

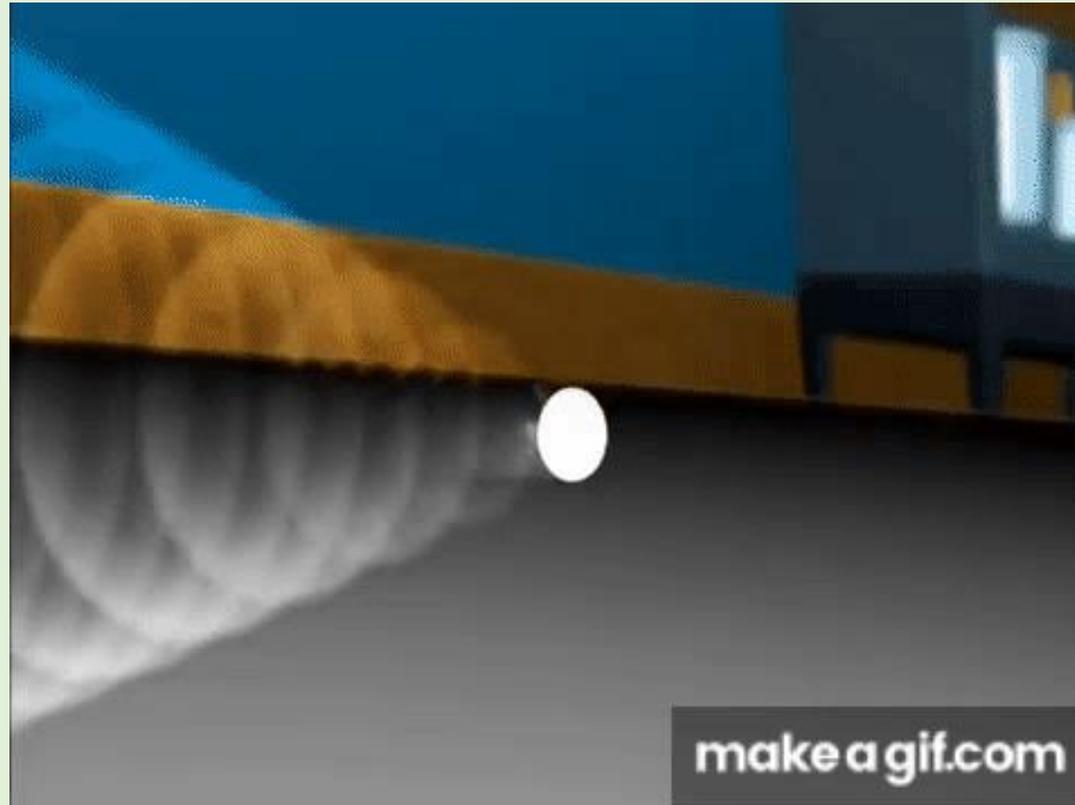


Siccome siamo furbi pensiamo bene di sparare un elettrone alla volta. In questo modo o passa in una o nell'altra fenditura, costruendo la figura vista in precedenza.

Niente da fare! Anche in questo modo si formano le frange d'interferenza (un pò più lentamente!)

Esperimento della doppia fenditura

E non finisce qui! Siamo testardi, e mettiamo un rivelatore vicino alle due fenditure così da capire dove passano gli elettroni!



Di nuovo la figura classica!

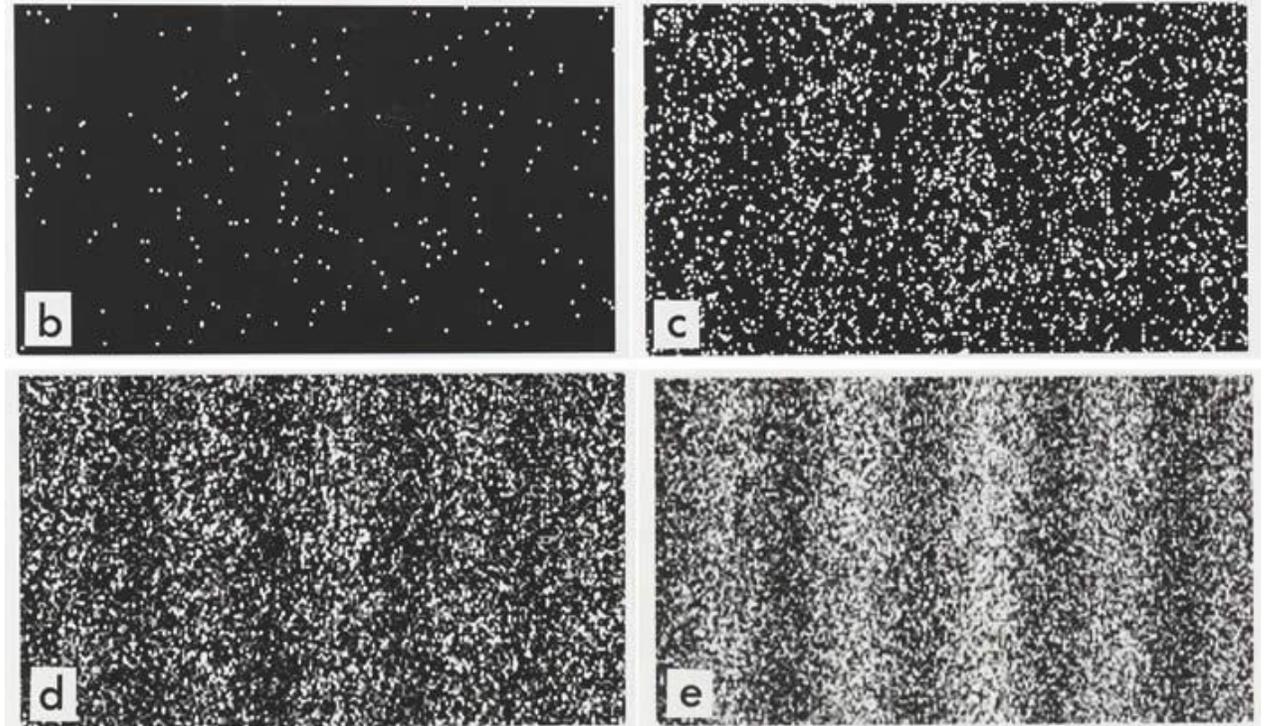
I risultati dell'esperimento della doppia fenditura con elettroni furono previsti dalla teoria di Louis de Broglie nel 1924

- Il dualismo onda-particella della luce deve estendersi a tutta la materia: ad un corpo con quantità di moto p si associa un'onda di lunghezza d'onda λ

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Nel 1927 venne realizzato un esperimento in cui si osservava la diffrazione tra gli elettroni

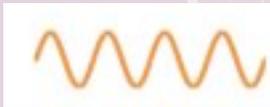
Dualismo Onda - Particella



Dualismo Onda - Particella

Nella realtà quotidiana non ci accorgiamo minimamente di questa doppia natura della materia, perchè le masse sono enormemente più grandi rispetto alle particelle

fotone



$$E = 2,07 \text{ eV}$$
$$v = 300000 \text{ km/s}$$



$$\lambda = 600 \text{ nm}$$

elettrone



$$m \sim 10^{-28} \text{ g}$$
$$v = 5000 \text{ km/h}$$



$$\lambda = 523 \text{ nm}$$

palla da tennis



$$m = 50 \text{ g}$$
$$v = 100 \text{ km/h}$$



$$\lambda \sim 10^{-25} \text{ nm}$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi_m + (E - V) \psi_m = 0$$

La formalizzazione matematica della teoria quantistica avvenne con Erwin Schrodinger, che nel 1926 formula un'equazione che descrive l'evoluzione temporale di un sistema quantistico.

- Simile all'equazione delle onde
- Onde di materia?
- Che informazioni ottengo da questa equazione?

L'interpretazione probabilistica

- Pensare ad onde di materia, non è una cosa molto facile!
- La funzione d'onda, "l'incognita" dell'equazione di Schrodinger assunse grazie a Max Born un significato probabilistico
- L'onda di un elettrone deve essere interpretata in termini probabilistici, possiamo solo assegnare all'elettrone la probabilità di trovarsi in un dato punto dello spazio (orbitali?)



Il Principio di Indeterminazione

Se ripensiamo all'esperimento della doppia fenditura con gli elettroni (ma anche i fotoni), abbiamo visto che se vogliamo sapere da quale fenditura passa la particella distruggiamo la figura di interferenza



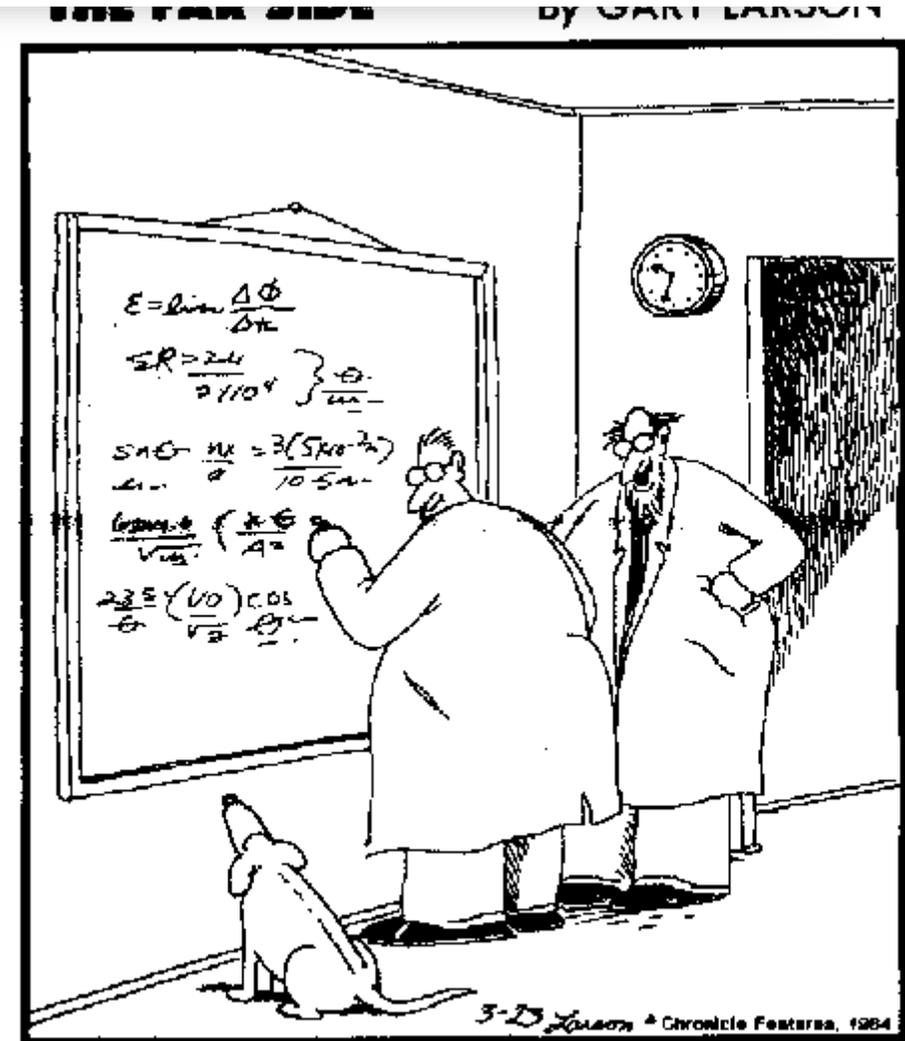
- In qualche modo interferiamo con l'esperimento, cambiandone lo stato!
- Per “vedere” un elettrone ci serve la luce, dunque alteriamo il suo stato di moto

“Non è possibile misurare contemporaneamente e con arbitraria precisione velocità e posizione di un corpo, oppure energia e tempo”

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Cerchiamo di capirci qualcosa!



"Ohhhhhh... Look at that, Schuster. Dogs are so cute when they try to comprehend quantum mechanics."

Meccanica classica

Equazioni della dinamica
Traiettoria precisa nello spazio-tempo
Predizione precisa di un corpo
Valori continui di una grandezza misurabile



Meccanica quantistica

Equazione di Schrodinger
Funzione d'onda
Probabilità di ottenere un certo risultato
Valori quantizzati

Un confronto veloce

L'interpretazione della misura

- Risulta difficile pensare ad un'interpretazione probabilistica della natura
 - Non siamo ignoranti, è la natura che è fatta così!
- Non è una questione di tecnologia!
- L'atto della misura stessa perturba il sistema portandolo al risultato finale misurato
 - * E prima? Prima non sappiamo cosa dire! L'elettrone ad esempio può passare da entrambe le fenditure!
 - * Un sistema può trovarsi in due stati fisici distinti, se però si esegue un'osservazione allora si va in uno dei due stati

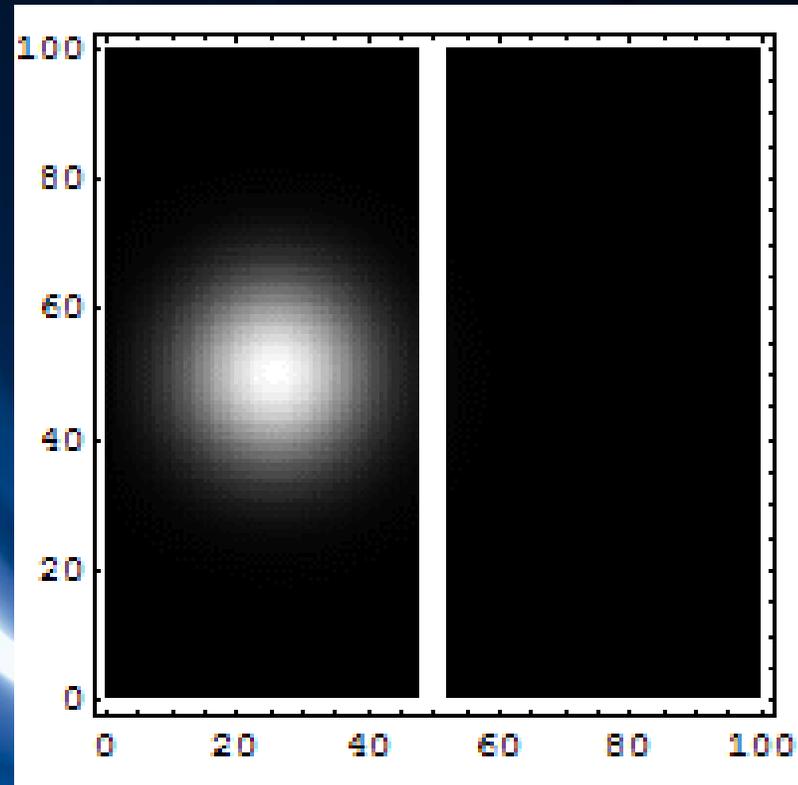


Il gatto di Schrodinger

“Si possono anche costruire casi del tutto burleschi. Si rinchioda un gatto in una scatola d'acciaio insieme alla seguente macchina infernale (che occorre proteggere dalla possibilità d'essere afferrata direttamente dal gatto): in un contatore Geiger si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegrerà, ma anche, in modo parimenti probabile, nessuno; se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato, mentre la prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono degli stati puri, ma miscelati con uguale peso”

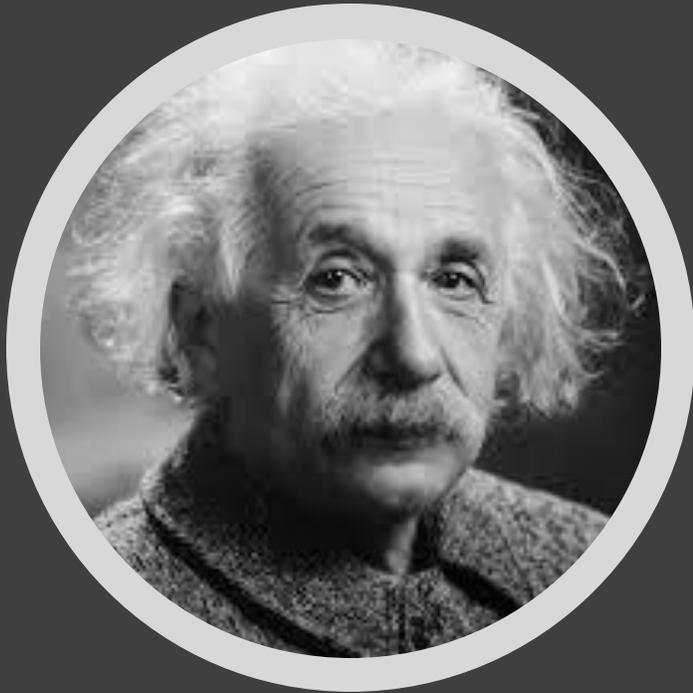


**SCHRÖDINGER'S CAT IS
ADLEAVDE**



L'effetto tunnel

La fine del determinismo



“Non credo che Dio abbia scelto di giocare a dadi con l'universo”

“Veramente lei è convinto che la Luna esista solo se la si guarda?”



“Einstein, smettila di dire a Dio cosa fare con i suoi dadi”



“Einstein sbagliò quando disse: «Dio non gioca a dadi». La considerazione dei buchi neri suggerisce infatti non solo che Dio gioca a dadi, ma che a volte ci confonda gettandoli dove non li si può vedere”



Fine?

- Siamo appena intorno all'inizio degli anni '30....c'è ancora un intero Universo (letteralmente!) da scoprire.
- Intanto I padri fondatori della Meccanica Quantistica formalizzavano le loro teorie nella conferenza di Solvay (1927)

Cosa succederebbe se la costante
di Planck fosse più grande?



Domande

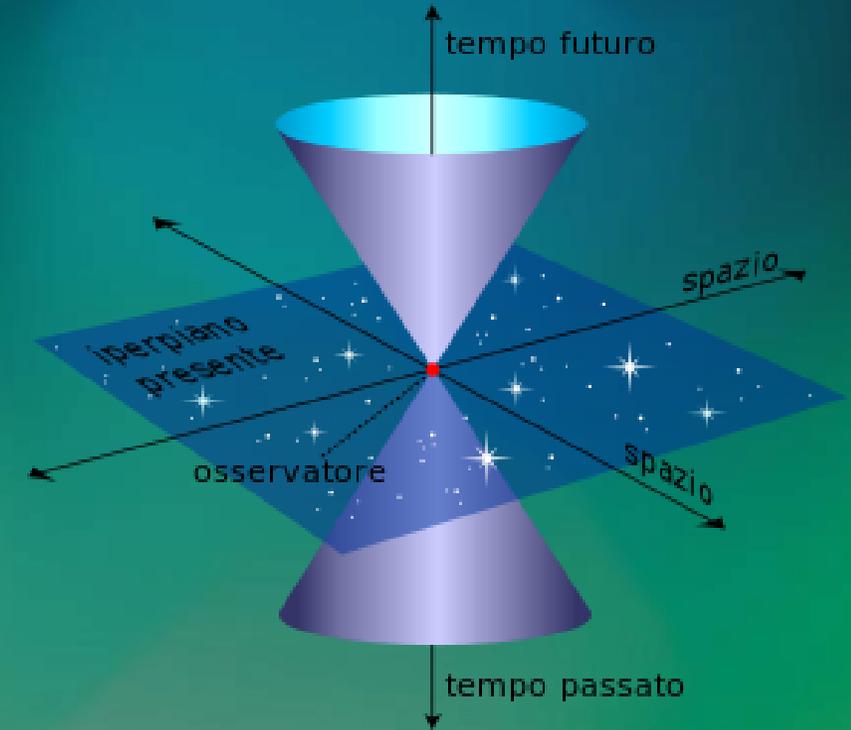


Spazio tempo

- Lunghezze (=intervalli spaziali) e intervalli di tempo non sono più invarianti per cambiamento di sistema di riferimento, come avveniva nel caso classico.
- C'è però un «punto fermo», una grandezza invariante che si può costruire a partire dagli intervalli spaziali e temporali fra due «eventi». Essa, misurata in due sistemi qualunque in moto relativo dà sempre lo stesso valore ! Si tratta della grandezza:

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

- Se s è maggiore di zero gli eventi si dicono separati da una distanza di tipo tempo, se minore di zero di tipo spazio. s è chiamata distanza spazio-temporale fra i due eventi.



Esperimento Hafele-Keating

2 aerei di linea volano intorno alla Terra in direzioni opposte (EST & OVEST): ciascun aereo trasporta un orologio atomico al Cesio → al ritorno a terra, confronto letture di questi orologi con quella di un altro orologio atomico (i 3 orologi sono identici e sincronizzati tra loro prima del volo)

Risultato: rispetto all'orologio rimasto a terra

- ✓ orologio EST in **ritardo** di (59 ± 10) ns
- ✓ orologio OVEST in **anticipo** di (273 ± 7) ns

in **eccellente accordo** con le predizioni della RS

NB – nel volo verso EST velocità aereo si somma a quella di rotazione della Terra, mentre nel volo verso OVEST si sottrae;

– anche il campo gravitazionale terrestre introduce dilatazione temporale

(**Relatività Generale**)

Verso qualcosa di più grande

La relatività ristretta risolveva in maniera brillante (e impensabile!) il problema legato alla velocità della luce.

Ma ben presto Einstein si rese conto che l'idea che ci fosse un limite invalicabile alla velocità dei corpi portava ulteriori problemi.

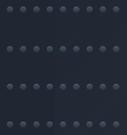
- Niente batte la luce in velocità! Ma la forza di gravità così come pensata da Newton era un'interazione istantanea: se il Sole sparisse all'improvviso, la Terra subirebbe istantaneamente le conseguenze!
- Matematicamente parlando la teoria della gravità non era invariante per trasformazioni di Lorentz: cioè la gravità non si comportava allo stesso modo in ogni sistema di riferimento



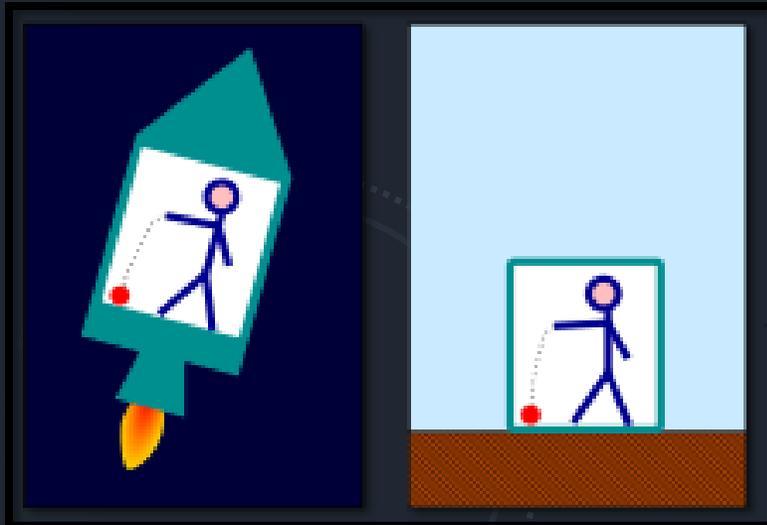
**La relatività ristretta non era compatibile con
la teoria della gravità**



La Relatività Generale



Negli anni successivi Einstein cercò di trovare una soluzione per raccordare queste teorie apparentemente ostili: nacque la Relatività Generale



La palla cade per la gravità o perchè il razzo vola verso l'alto?

Tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, possono affermare di essere stazionari, a patto di includere un opportuno campo gravitazionale

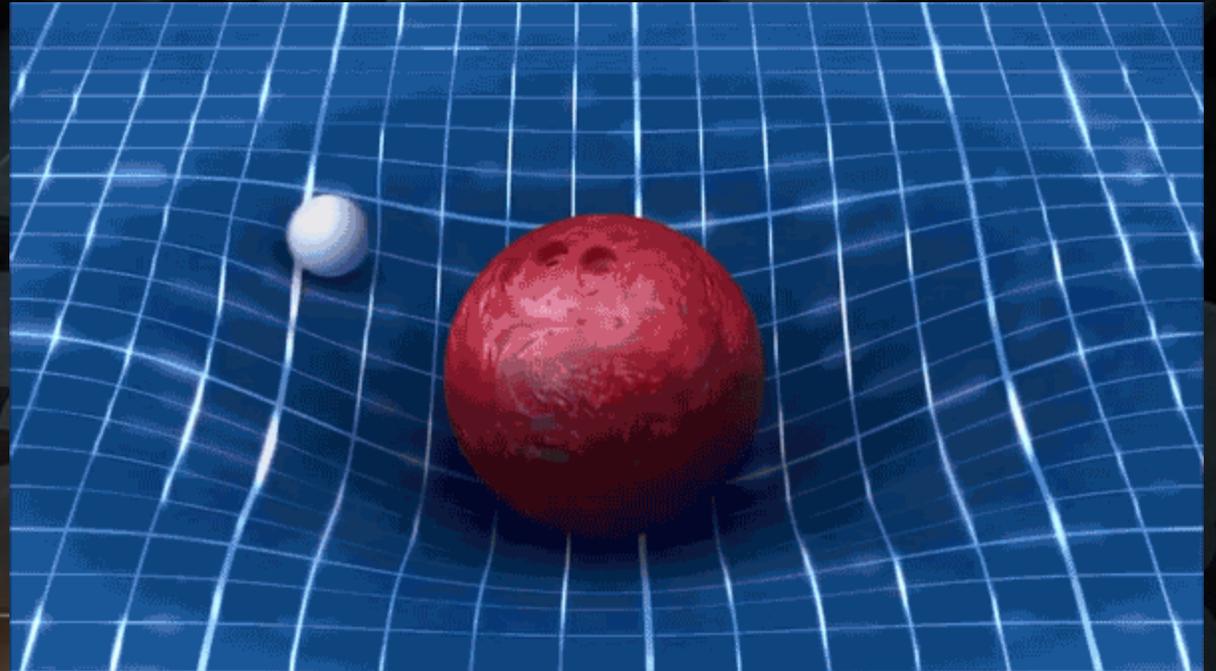
Principio di equivalenza: un osservatore solidale con le masse in moto non è in grado di distinguere un'accelerazione dovuta a una forza esterna da quella prodotta da un campo gravitazionale. La differenza è visibile solo da un sistema di riferimento non solidale con le masse in moto

Come funziona la gravità

La presenza di un corpo massivo **deforma** la geometria dello spaziotempo, che altrimenti sarebbe piatta

In assenza di massa o di masse molto piccole, lo spazio è piatto e un corpo si muove di moto rettilineo uniforme

Se invece si è in presenza di un corpo molto massivo, lo spazio è fortemente deformato ed un secondo corpo sarà attratto verso il primo

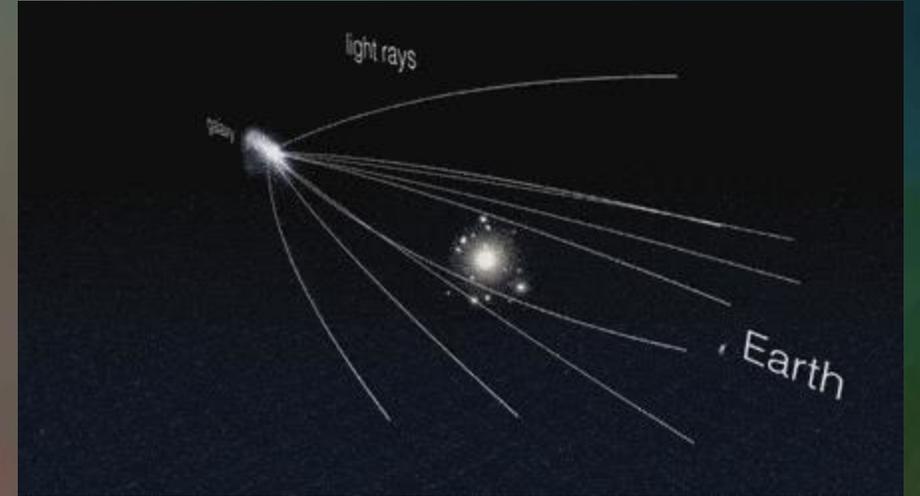


“La massa tiene in pugno lo spazio dicendogli come curvarsi, lo spazio tiene in pugno la massa dicendole come muoversi”

Lensing gravitazionale

La gravità influenza anche il moto della luce? Einstein suggerì di misurare la deflessione subita dalla luce delle stelle lontane, che nell'arrivare sulla Terra passa in prossimità del Sole

Come osservare la posizione delle stelle senza essere accecati dal Sole? Durante un'eclissi!



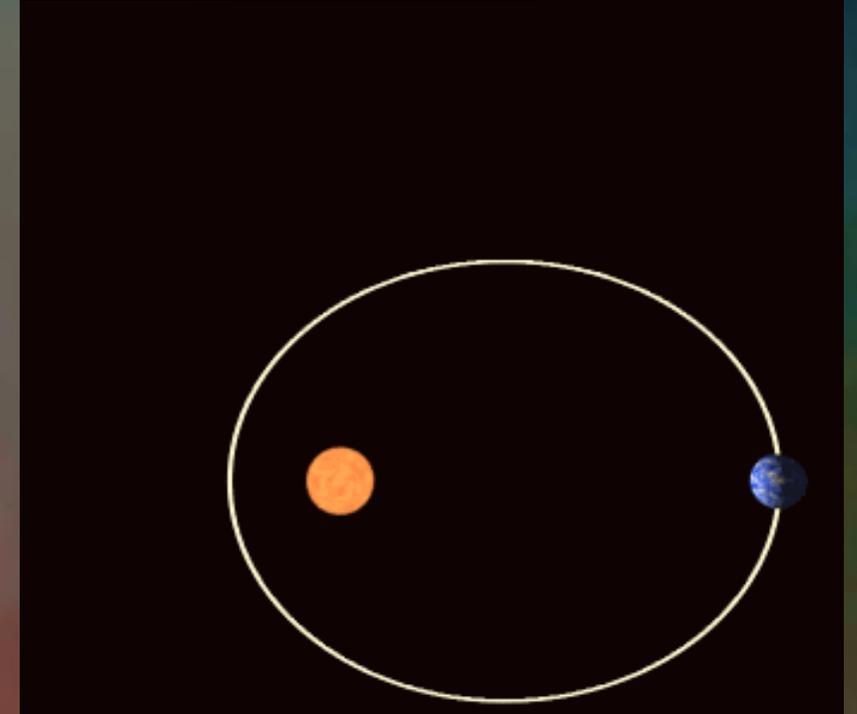
Misuriamo la posizione della stella durante l'eclissi, e sei mesi prima (o dopo), quando non c'è il Sole "tra di noi"

Nel 1919 la spedizione guidata dall'astronomo inglese Eddington mostrò che lo spostamento delle stelle era chiaramente visibile e in accordo con la previsione teorica di Einstein.

Precessione del perielio di Mercurio

L'orbita di un pianeta ruota lentamente su se stessa, descrivendo un' ellisse

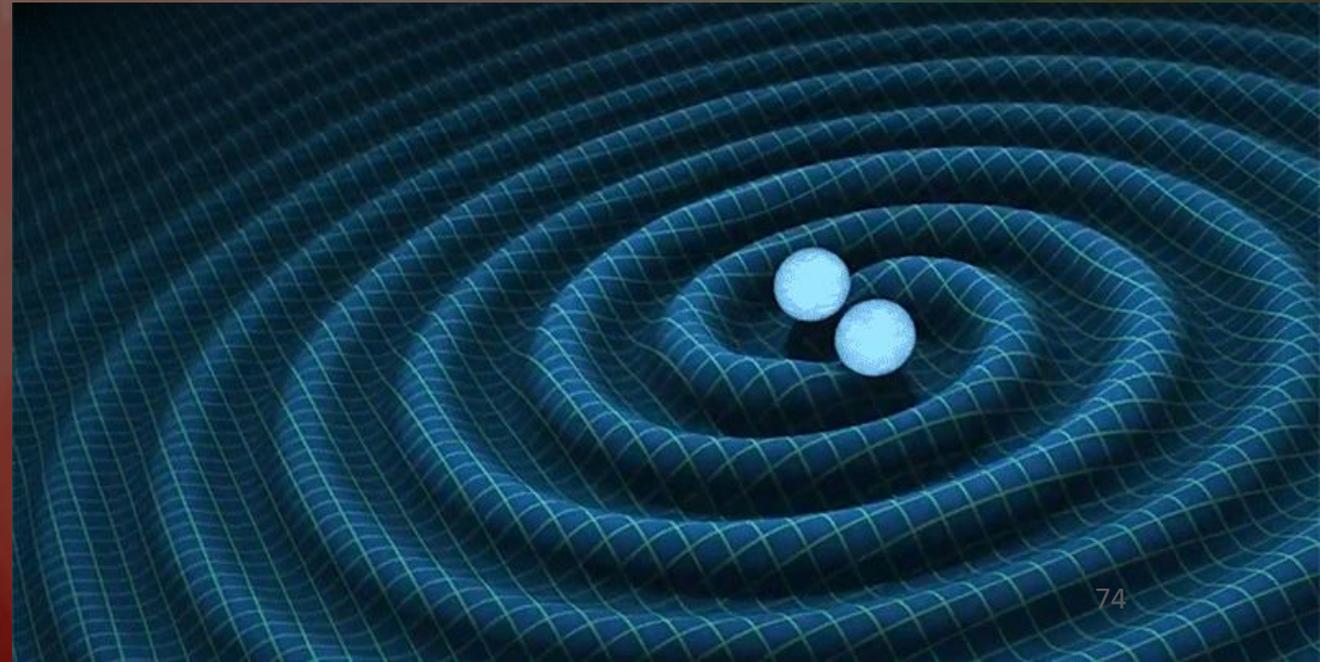
- Effetto molto piccolo
- Il perielio (punto più vicino al Sole) di Mercurio si sposta alla velocità di circa 1.6° per secolo
- Non spiegabile con la teoria della gravità di Newton
- I calcoli relativistici riproducono esattamente la velocità osservata



Nel caso di Mercurio il tempo necessario per una rotazione completa è di 23.143 anni terrestri.

Onde Gravitazionali

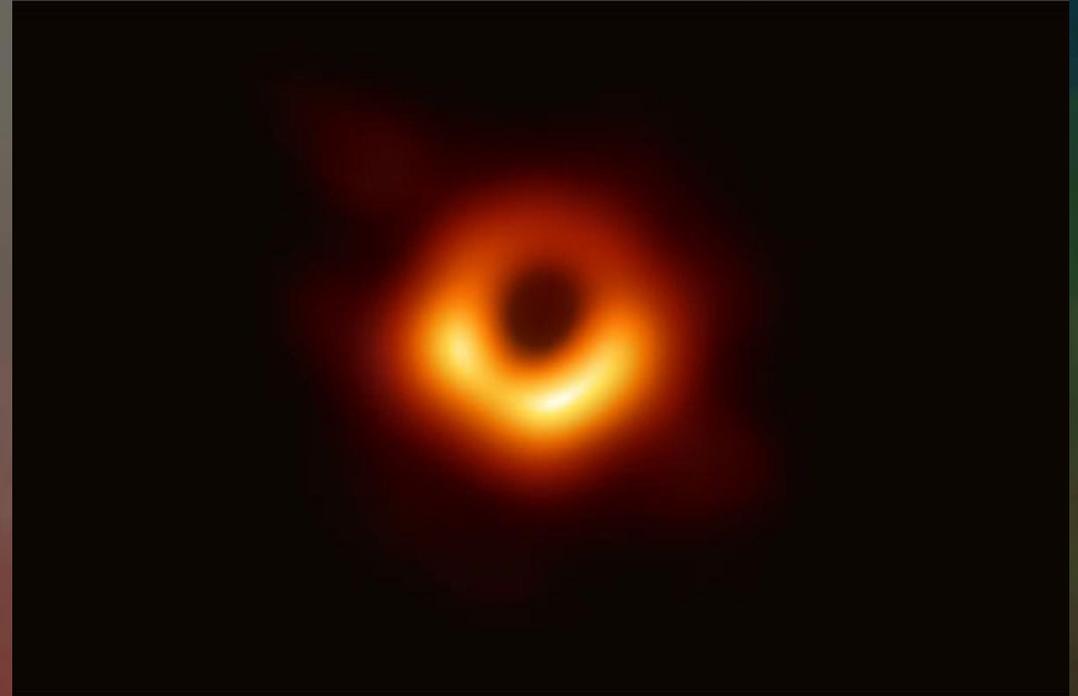
- Onde che provocano la distorsione dello spazio tempo
- Ampiezza MOLTO piccola!
- Dove/Come/Quando osservarle? In presenza di sistemi astrofisici molto massivi, o durante le esplosioni di supernove



Buchi neri

Se la massa di una stella è concentrata in una regione molto molto piccola, la distorsione spazio-temporale creata da questa è così forte che tutto ciò che capita nei dintorni della stella non riesce a sfuggire dalla sua attrazione gravitazionale.

- Se superiamo l'orizzonte degli eventi tutto viene attratto, anche la luce: è impossibile vedere un buco nero!
- Se invece siamo sul "ciglio" dell'orizzonte degli eventi il tempo scorre molto più lentamente: un anno lì equivale a 10000 sulla Terra!

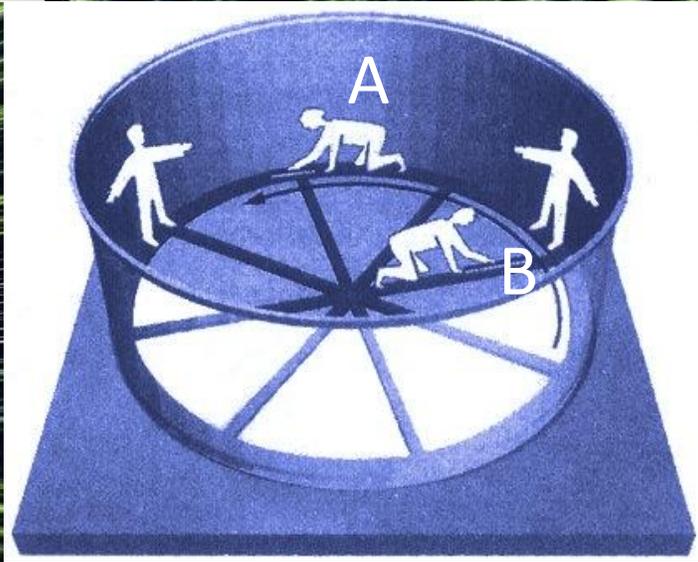


Conclusioni

- La massa determina la forma del nostro universo
- La forma del nostro universo è la manifestazione della gravità
- Relatività generale usata principalmente nella cosmologia, per studiare la creazione e l'evoluzione del nostro Universo

$$R_{ab} - \frac{1}{2}Rg_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab}.$$

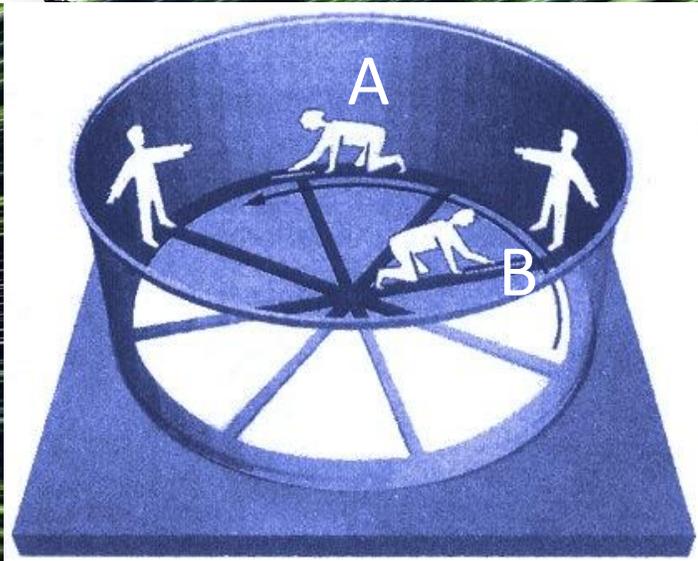
La curvatura dello spazio-tempo



- La giostra è un sistema accelerato
- A misura una lunghezza di circonferenza maggiore della nostra (che guardiamo tutto da fuori)
- B misura il nostro stesso raggio (la contrazione ha luogo solo nella stessa direzione del moto)
- Allora il rapporto tra circonferenza e raggio non fa 2π !

Einstein si rese conto che le relazioni spaziali della geometria piana non sono valide per un osservatore in moto accelerato

La curvatura dello spazio-tempo



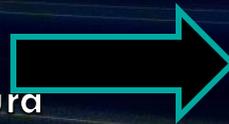
In realtà il moto accelerato non fa curvare solo lo spazio ma anche il tempo. La relatività unisce spazio e tempo in un'unica struttura, lo **spaziotempo**

Ma che significa tempo curvo?

A e B non concorderanno sui tempi, per effetto della dilatazione dei tempi. A è ritardato rispetto a B. Man mano che B si avvicina ad A anche il suo orologio ritarderà.

Allora il tempo dipende dalla loro esatta posizione

1. Gravità e moto accelerato indistinguibili
2. Moto accelerato comporta la curvatura dello spaziotempo



La gravità è la curvatura dello spaziotempo!