

# L'EFFETTO FOTOELETTRICO

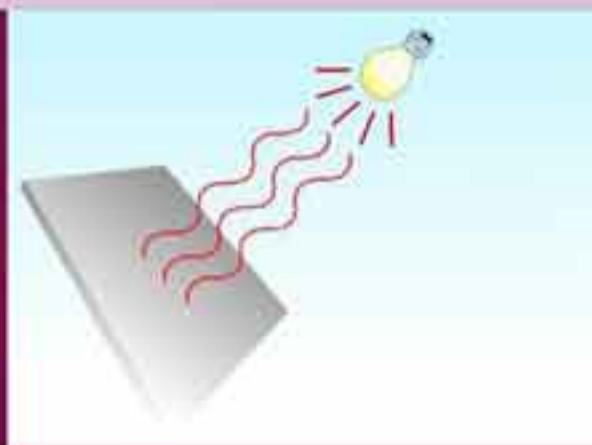
Nel primo dei suoi lavori del 1905, quello che egli stesso definiva "rivoluzionario", Einstein affronta il fenomeno fisico noto come **effetto fotoelettrico** (dal greco: *phôs* = luce ed *electron* = che scintilla, da cui anche il termine elettricità).

Si tratta dell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica quando questa è illuminata da una luce con "adeguate" caratteristiche.

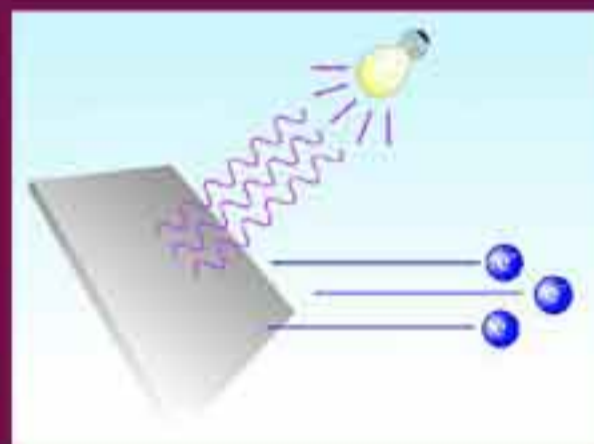
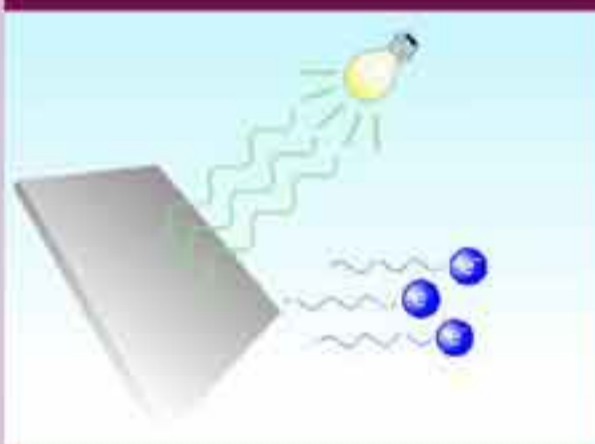
L'energia elettromagnetica trasportata dalla luce viene ceduta sotto forma di energia di movimento (cinetica) agli elettroni che riescono così a "fuggire" dal metallo a cui appartengono. Il fenomeno ha tre caratteristiche fisiche peculiari.



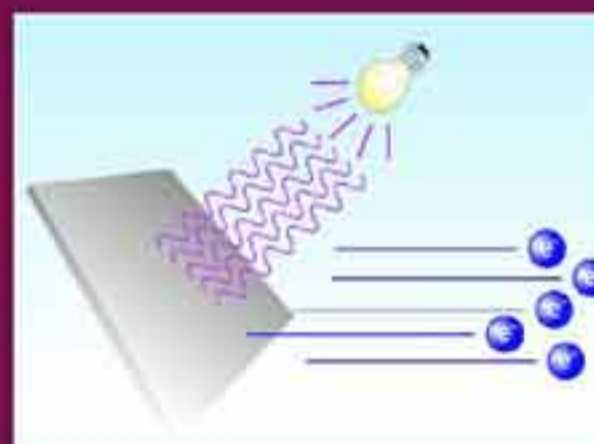
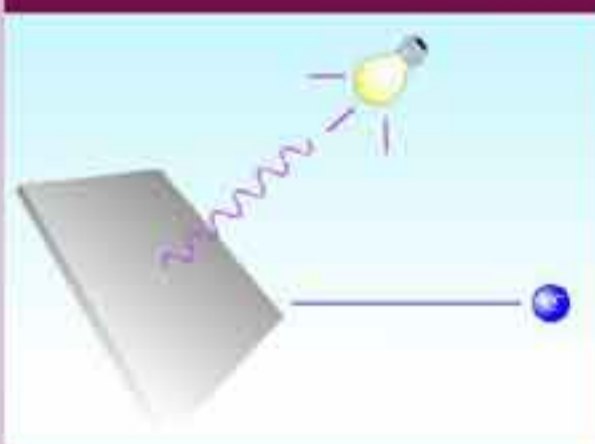
**Philippe Lenard** (1862 - 1947) fu il primo a scoprire le peculiari caratteristiche dell'effetto fotoelettrico e il suo lavoro del 1902 fu alla base dell'articolo di Einstein



a) Al di sotto di una certa frequenza detta di **soglia**, che cambia da metallo a metallo, la luce non riesce a provocare l'espulsione di elettroni neanche ad altissime intensità



b) L'energia dei singoli elettroni emessi dalla superficie metallica non dipende dall'intensità della luce, ma dalla **frequenza** di quest'ultima



c) L'aumento dell'**intensità** della radiazione provoca solamente un aumento del **flusso** dei "fotoelettroni"

Nessuna di queste tre proprietà dell'effetto fotoelettrico può essere spiegata facendo ricorso alla teoria ondulatoria di **Maxwell**.

# UNA SPIEGAZIONE INTUITIVA

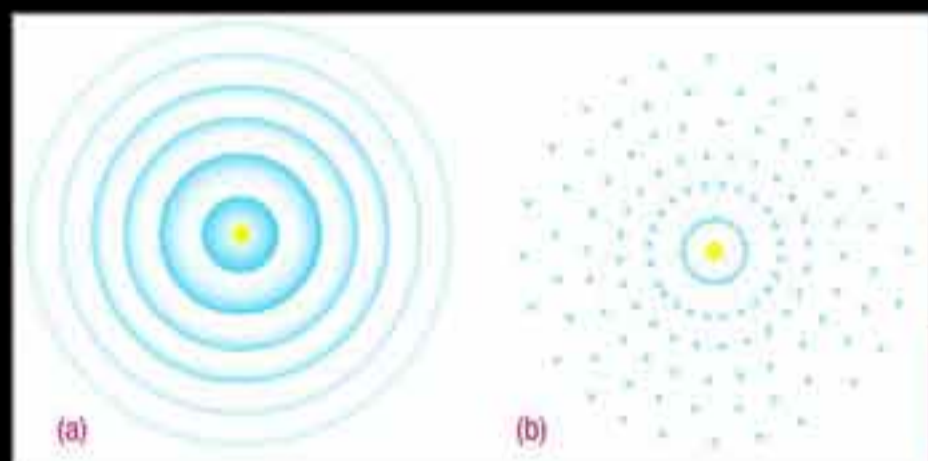
Nella sua attività di ricercatore, Einstein ha sempre cercato di individuare l'unitarietà e l'ordine profondo della realtà fisica. È per questo che, a differenza dei suoi contemporanei, ha intuito che la spiegazione dell'effetto fotoelettrico non era da ricercare in una correzione del precedente modello ondulatorio, ma in un punto di vista completamente nuovo.

*"Secondo l'ipotesi qui considerata, quando un raggio luminoso si propaga partendo da una sorgente puntiforme, l'energia non si distribuisce con continuità su volumi di*

*spazio via via crescenti, bensì consiste in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, che si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti o generati solo come unità intere".*

*(Dall'articolo del marzo 1905)*

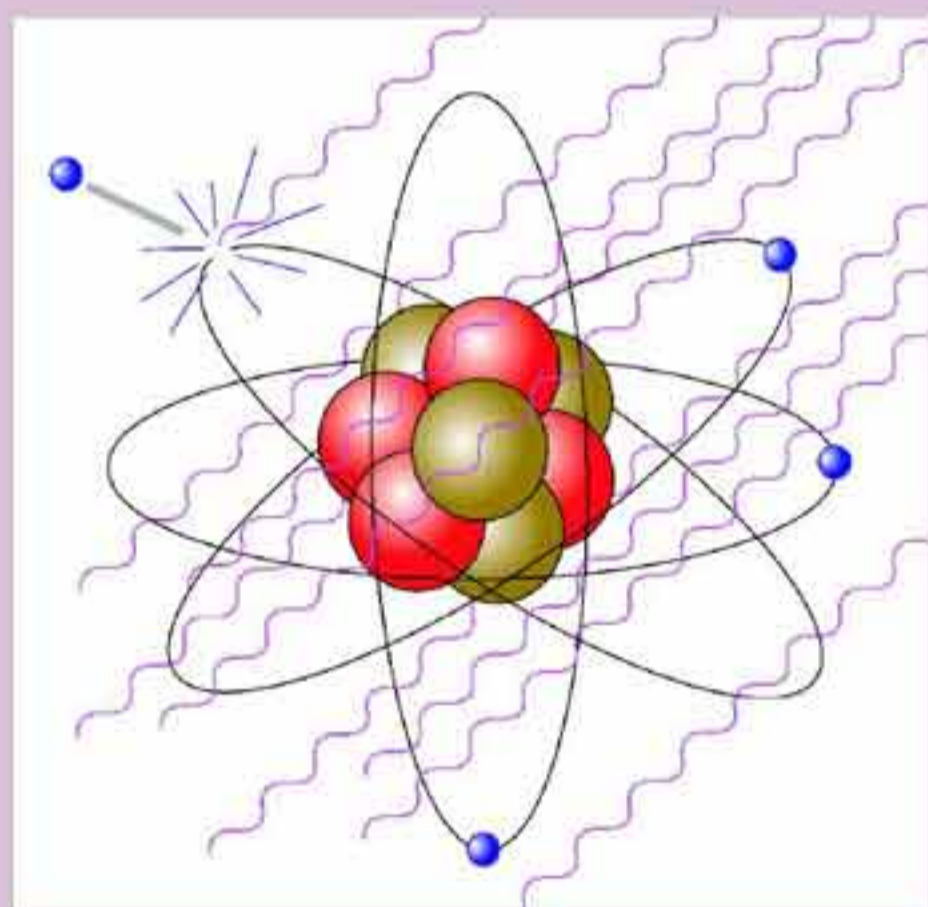
Utilizzando lo stesso termine coniato da Planck nel 1900, Einstein battezza come **"quanti"** tali quantità minime e indivisibili di energia, con quest'ultima direttamente proporzionale alla frequenza  $\nu$  della radiazione:



$$E = h \cdot \nu$$

dove  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J-s è la costante di Planck

Confronto fra la radiazione luminosa concepita come onda (a) o come insieme di quanti (b)



Un elettrone assorbe un fotone acquistando un'energia sufficiente ad uscire dal metallo a cui appartiene

L'effetto fotoelettrico può quindi essere così interpretato:

- un quanto di luce viene assorbito da un elettrone del metallo a cui cede tutta la sua energia;
- se l'energia assorbita è sufficiente a vincere l'attrazione elettrostatica che lo lega al metallo, ossia se la frequenza della radiazione è superiore al valore di soglia, l'elettrone viene emesso;
- l'aumento dell'intensità della radiazione, ossia del flusso di quanti, provoca semplicemente l'aumento del numero di elettroni foto-emessi nell'unità di tempo.

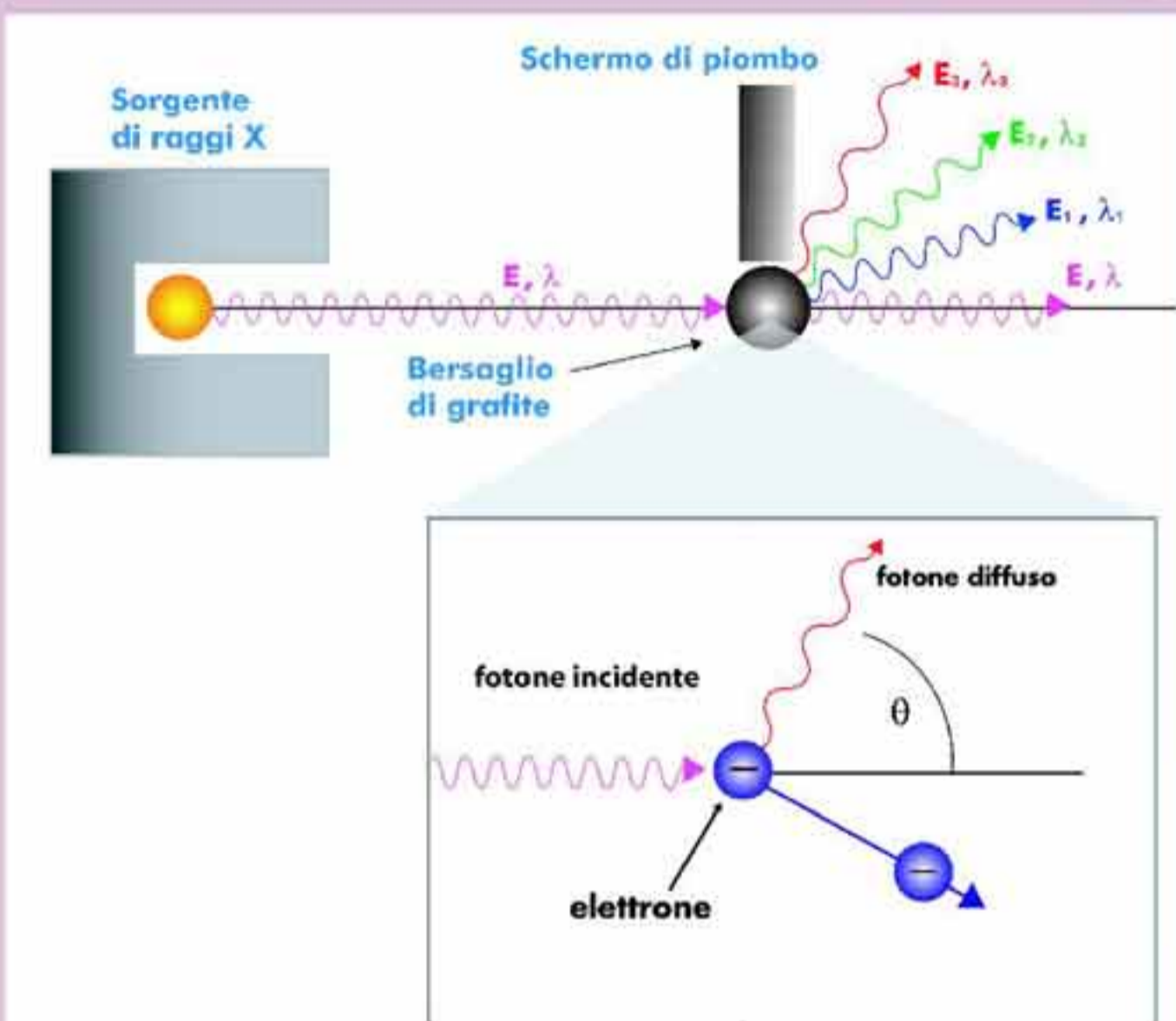
Con la spregiudicatezza tipica della sua personalità, il giovane Einstein si permette di elevare a principio di conoscenza la sua congettura; un principio, come egli stesso lo definisce, "euristico" ossia intuitivamente capace di spiegare i fenomeni fisici studiati, ma non ancora rigorosamente dimostrato.

# DAL QUANTO DI LUCE AL FOTONE

La domanda circa la reale natura dei quanti di luce assillò Einstein per tutta la sua vita, senza che egli potesse mai raggiungere un punto di vista soddisfacente. Gli furono infatti necessari dodici anni di lavoro per riuscire a dimostrare rigorosamente che la propagazione dei quanti di luce avviene lungo una linea retta, secondo una direzione ben precisa. Ne conseguiva che questi ultimi sono ben più che semplici grani di energia, bensì **vere e proprie particelle** dotate di quantità di moto, ossia capaci di spostare un oggetto da loro colpito, esattamente come farebbe una comune palla da biliardo.



Arthur H. Compton (1892 - 1962)  
in laboratorio



**Effetto Compton:** un fascio di raggi X viene diffuso da un bersaglio di grafite. Si osserva che la lunghezza d'onda della radiazione diffusa varia in funzione dell'angolo di diffusione esattamente come se fosse avvenuto un urto elastico fra il fotone e un elettrone e che parte dell'energia luminosa fosse stata ceduta a quest'ultimo.

Sempre spinto dal suo desiderio di confrontarsi con la realtà, quale giudice supremo della bontà di ogni teoria, Einstein cercò di sviluppare per anni un esperimento che evidenziasse inequivocabilmente l'aspetto particellare della luce.

Fu però anticipato da **Arthur H. Compton** che nel 1922 scoprì l'effetto che porta il suo nome.

La nuova particella venne battezzata nel 1926 con il termine **fotone** dal chimico-fisico **Gilbert N. Lewis**.

Entrato nel mondo della fisica in silenzio, come ipotesi euristica e provvisoria, il quanto di luce si era ormai rivelato come una delle particelle fondamentali costituenti l'universo e nessuno scienziato, dagli anni '20 in poi, ha messo più in dubbio la sua reale esistenza.

# MA LA LUCE, DUNQUE, COS'È?

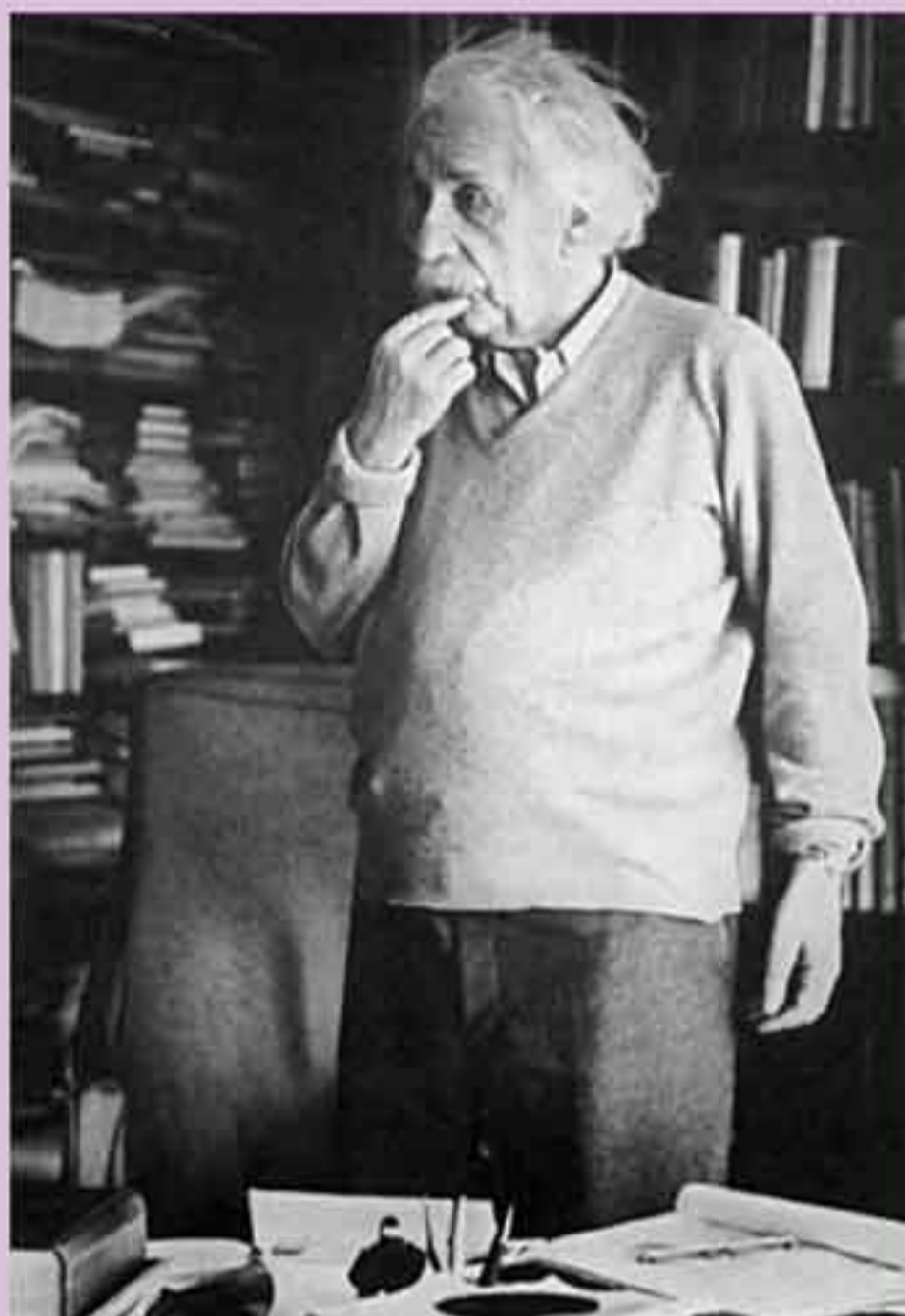
Per "la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico" ad Einstein verrà assegnato il premio Nobel per la Fisica nel 1921. Tuttavia la vera natura della luce restava un problema. Ma lasciamo che sia lo stesso Einstein a presentarci la questione:

*"Lo stato di fatto può riassumersi come segue: vi sono fenomeni spiegabili con la teoria quantistica, ma non con la teoria ondulatoria. L'effetto fotoelettrico è uno dei tanti casi del genere. Vi sono invece fenomeni spiegabili con la teoria ondulatoria, ma non con la teoria dei quanti; la diffrazione della luce intorno a piccoli ostacoli ne è un esempio tipico. Finalmente esistono fenomeni come la propagazione rettilinea della luce che possono spiegarsi tanto con la teoria quantistica come con quella ondulatoria"*

*Ma la luce, dunque, cos'è?  
È un'onda oppure un getto di fotoni?*



Nel discorso di ringraziamento per il premio Nobel, tenuto a Goteborg nel luglio 1923, Einstein non ha voluto trattare dell'effetto fotoelettrico, ma solo della teoria della relatività



*"Abbiamo due opposte rappresentazione della realtà; da sola nessuna delle due spiega totalmente i fenomeni della luce; insieme vi riescono! (...) Come combinare queste due rappresentazioni? Come capire questi due aspetti affatto diversi della luce? (...) Ci troviamo di fronte ad un problema fondamentale. (...) Ci troviamo ora di fronte ad un nuovo problema per la cui soluzione bisogna fare appello a nuovi principi".*

Siamo quindi ad un punto cruciale nel processo di conoscenza scientifica: due diversi modelli rendono parzialmente ragione di ciò che accade in natura, ma la realtà rimane lì, vicina e al tempo stesso misteriosa. In situazioni del genere Einstein era solito ripetere: "Sottile è il Signore, ma non maligno", ad indicare la sua totale fiducia nella presenza di un ordine ultimo nella realtà fisica che, per quanto misterioso, è comunque penetrabile dalla ragione umana.

# SPAZIO E TEMPO "CLASSICI"

Nella fisica classica, vige la concezione di uno **spazio vuoto assoluto** euclideo e di un **tempo** che scorre in modo anch'esso **assoluto**: questi sono, per così dire, i due contenitori di tutta la fisica. Queste idee si traducono nell'assunzione che i valori dei tempi e delle lunghezze siano gli stessi in tutti i sistemi di riferimento.

*Le misure di tempo e di lunghezza sono indipendenti dal sistema di riferimento.*

## Parola di Newton

*"Non definisco tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti. [...] Lo spazio assoluto, per sua natura privo di relazione con qualcosa di esterno rimane sempre simile a sé stesso e immobile [...]. Il tempo assoluto, vero e matematico in sé e per sua natura fluisce uniformemente".*

Un altro pilastro della fisica classica è il **principio di relatività** di Galileo: *se le leggi fisiche valgono in un sistema di riferimento, allora valgono in tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo con velocità costante rispetto ad esso.*

## Parola di Galileo

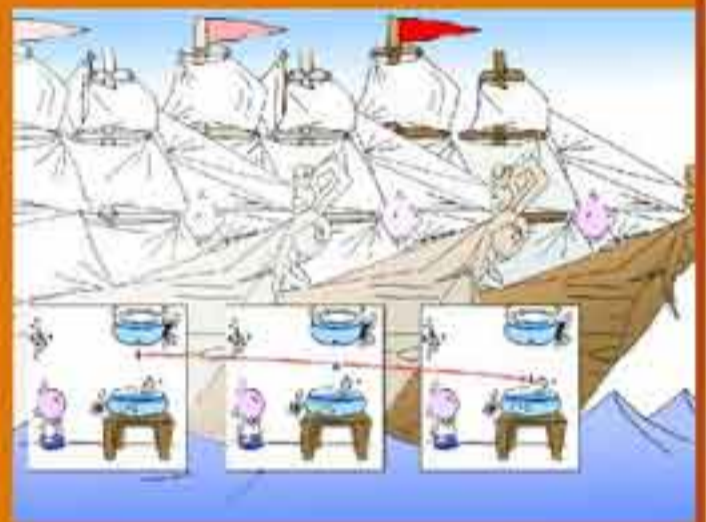


*"Rinseccatevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun grande navilio e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; avvi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti;*

*sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso; e stando ferma la nave osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto.*

*"Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché non dubbio ci sia che mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità, (ché pur che il moto sia*

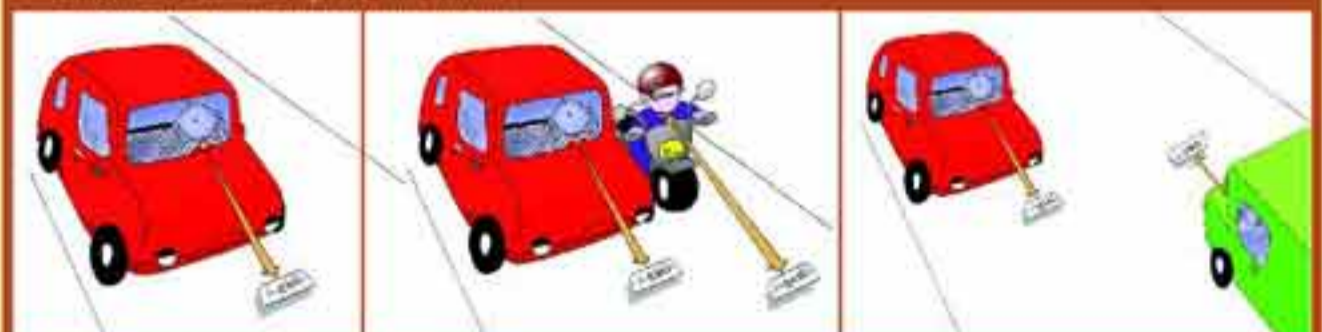
*uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina oppure sta ferma [...]. E di tutta questa corrispondenza di effetti ne è la ragione l'essere il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che perciò io dissi che si stesse sotto coverta".* (Galileo Galilei, Dialogo sui massimi sistemi)



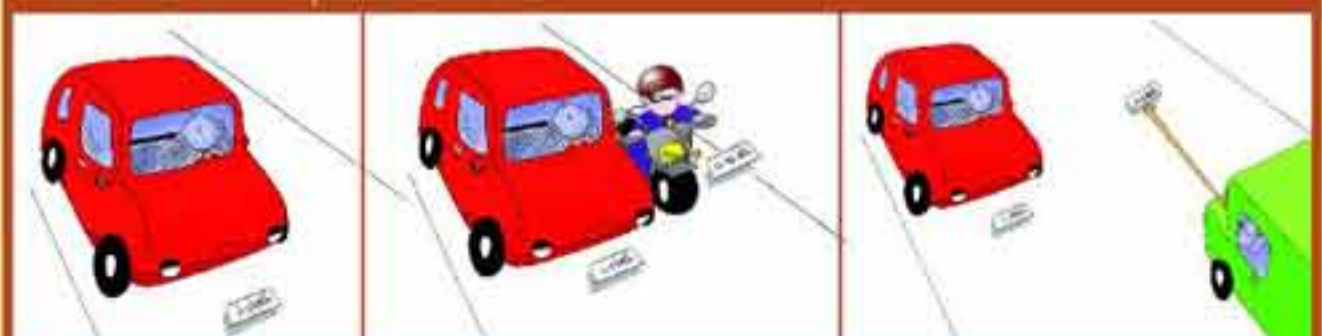
Nell'ultima frase di Galileo è implicita una importante legge della fisica classica nota come **legge di composizione delle velocità**: *se un sistema di riferimento S' (l'automobile nel disegno) si muove con una certa velocità v rispetto ad un altro sistema di riferimento S (la strada), la velocità u di un oggetto (la motocicletta o il camion) misurata in S è uguale a quella u' misurata in S' più o meno la velocità di S' rispetto a S.*

In sintesi:  $u = u' \pm v$

Velocità dei veicoli rispetto alla strada



Velocità dei veicoli rispetto all'automobile



# UN OGGETTO MISTERIOSO: L'ETERE

Era stato denominato **etere** l'ipotetico mezzo attraverso il quale si propagano le onde elettromagnetiche (e quindi la luce); i fisici di fine Ottocento avevano un gran da fare per descrivere le sue proprietà, che dovevano essere molto particolari.

Così ne parla Einstein:

*"Se la luce doveva essere interpretata come un movimento ondulatorio in un corpo elastico (etere), quest'ultimo doveva essere un mezzo che permeava ogni cosa, fondamentalmente simile a un corpo solido per la trasversalità delle onde luminose e tuttavia incompressibile, cosicché non potessero esistere onde longitudinali. Questo etere doveva condurre un'esistenza da fantasma accanto al resto della materia, poiché sembrava non offrire alcuna resistenza al moto dei corpi «ponderabili»".*



Il concetto di etere risale al Settecento. Questa illustrazione dell'etere fu proposta da Eulero nel XVIII secolo.

Se l'etere permea tutto l'universo, costituisce un riferimento assoluto; ad esso va quindi riferita la velocità della luce indicata con  $c$  (circa 300.000 km/s). Allora, misurando la velocità della luce in un laboratorio terrestre, si deve poter distinguere se la Terra si muove o no rispetto al riferimento assoluto.

In un sistema in moto con velocità  $v$  nell'etere,

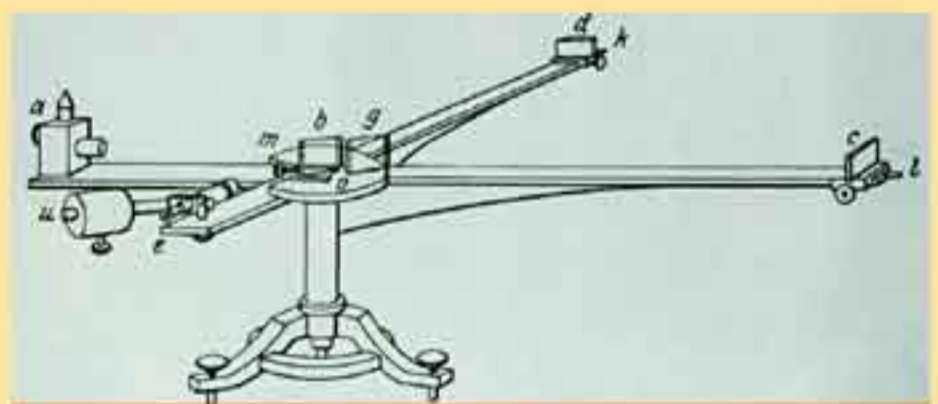
$$c' = c \pm v$$



Misure della velocità della luce in un laboratorio terrestre in moto attraverso l'etere, a sei mesi di distanza l'una dall'altra. In quella schematizzata a sinistra si troverà  $c' = c - v$ , a destra  $c' = c + v$ .

Per verificarlo, e quindi per evidenziare un moto relativo all'etere, il fisico **Albert Michelson** e il chimico **Edward Morley** avevano ideato un accurato esperimento: utilizzando un interferometro, pensavano di misurare una variazione della velocità della luce su due percorsi diversamente orientati rispetto alla direzione del moto nell'etere.

L'esito dell'esperimento (1887) però è negativo: **nessuna differenza** viene registrata!



L'interferometro di Michelson: se la Terra è in movimento rispetto all'etere, la percorrenza dei due bracci richiede tempi diversi, e quindi le onde luminose arrivano all'osservatore con una differenza di fase che provoca un'interferenza misurabile.



# DUE IPOTESI DECISIVE

Così Einstein descrive la situazione che si era venuta a creare nella fisica a seguito dell'esito nullo dell'esperimento di Michelson e Morley.

*"Tutti i tentativi di fare dell'etere una realtà sono falliti. Esso non ha rivelato né la propria struttura meccanica, né il moto assoluto. Nulla è rimasto di tutte le proprietà dell'etere, eccetto quella per la quale esso venne inventato, ovvero la facoltà di trasmettere le onde elettromagnetiche. E poiché i nostri tentativi per scoprirne le proprietà non hanno fatto che creare difficoltà e contraddizioni, sembra giunto il momento di dimenticare l'etere e di non pronunciare più il nome. Diremo dunque che il nostro spazio possiede la facoltà fisica di trasmettere talune onde, e cesseremo di usare una parola ormai inutile".*

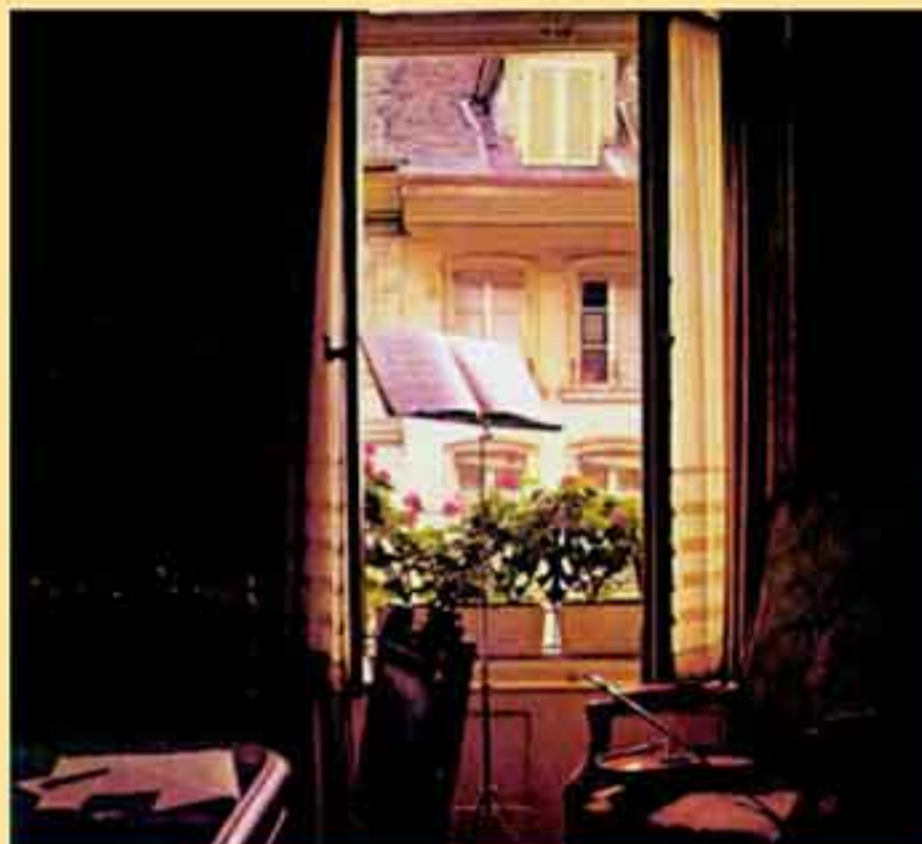
## Un dilemma da risolvere...

Gli stessi risultati hanno posto un conflitto insanabile tra queste tre affermazioni:

1. la velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore  $c$  in tutti i sistemi di riferimento (legge di propagazione della luce);
2. se le leggi della fisica valgono in un sistema di riferimento, allora valgono in tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo con velocità costante rispetto ad esso (*principio di relatività*);
3. velocità nel sistema  $S =$  velocità nel sistema  $S' \pm$  velocità del sistema  $S'$  rispetto a  $S$  (*legge di composizione delle velocità*).

## ...in compagnia.

*"Inaspettatamente venne in mio aiuto un amico di Berna. Fu un giorno splendido quello in cui andai a trovarlo e cominciai a parlargli della cosa in questi termini: 'Ho avuto un problema, ultimamente, del quale non riesco a venire a capo. Così oggi sono venuto qui per discuterne a oltranza'. Dopo avere lungamente dibattuto la questione con lui all'improvviso la questione mi fu chiara. Il giorno dopo tornai a trovarlo e gli dissi, senza neanche averlo salutato: 'Grazie. Ho completamente risolto il problema'".*



La stanza di Einstein a Berna nel 1905

Nella conclusione dell'articolo *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento* Einstein scrive: *"Mi sia concesso menzionare l'amico e collega Michele Besso per avermi assistito fedelmente mentre lavoravo ai problemi discussi qui, e ringraziarlo per i numerosi e preziosi suggerimenti".*

Einstein quindi risolve la questione formulando due ipotesi e ponendole come postulati della nuova teoria:

*il principio di relatività vale per tutti i fenomeni fisici*

*la velocità della luce nel vuoto è la stessa in tutti i sistemi di riferimento*

*"Da un'analisi dei concetti di fisica di tempo e spazio, risulta evidente che nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, e che attenendosi strettamente e sistematicamente a entrambe queste leggi si poteva pervenire a una teoria logicamente ineccepibile".*

11. Die Theorie eines Systems von Massen.  
Anfangsartikel 1905/1906  
von A. Einstein.

Die Theorie eines Systems von Massen ist ein Aufsatz von Albert Einstein, der 1905/1906 in der Zeitschrift Annalen der Physik veröffentlicht wurde. Er enthält die Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie, die die Beziehung zwischen Raum und Zeit in einem Inertialsystem beschreibt. Ein zentraler Punkt ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit  $c$  in allen Inertialsystemen. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die Äquivalenz von Masse und Energie, ausgedrückt durch die berühmte Gleichung  $E=mc^2$ . Der Aufsatz ist ein Meilenstein der modernen Physik und hat die Entwicklung der Relativitätstheorie maßgebend beeinflusst.

Frontespizio della memoria  
"Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento"  
"Teoria della relatività è una denominazione data da altri, l'epistolario di Einstein prova che egli avrebbe preferito l'espressione direttamente opposta, ma molto più precisa, Teoria dell'invarianza poiché egli si interessava prima di tutto alle costanze al di là del cambiamento"  
(G. Holton)

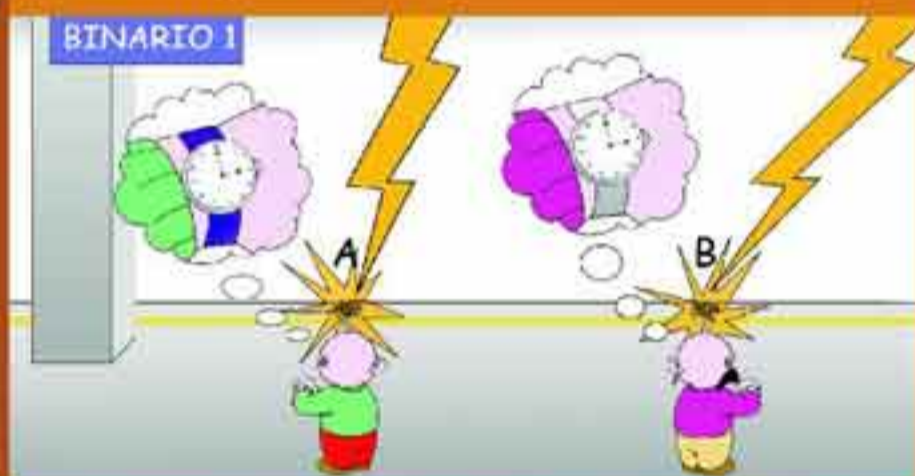
# LA SIMULTANEITÀ È RELATIVA

*“Non dobbiamo dimenticare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su eventi simultanei. Se, per esempio, dico che ‘il treno arriva qui alle 7 in punto’, ciò significa che, in pratica, il posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio sul 7 e l’arrivo del treno sono due eventi simultanei. (...) ma la definizione non è più sufficiente quando si devono correlare nel tempo eventi che avvengono in luoghi differenti.*

Per Einstein:

- il tempo di un evento deve essere misurato da un orologio posto esattamente dove l'evento accade;
- ogni sistema di riferimento in tutti i suoi punti deve possedere orologi sincronizzati.

Due eventi che accadono in due punti distanti A e B, sono simultanei se avvengono allo stesso istante secondo orologi sincronizzati posti in A e B.

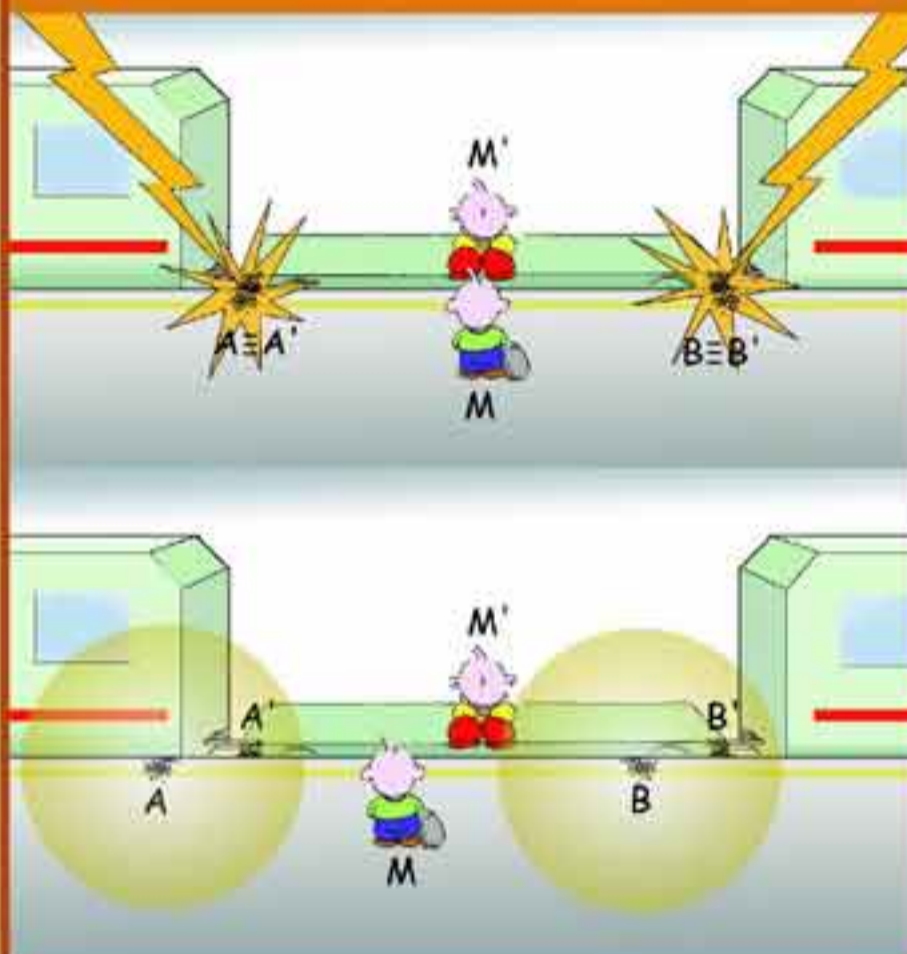


Due osservatori dotati di orologi sincronizzati situati sulla banchina di una stazione ferroviaria giudicano simultanee le cadute di due fulmini

Ma come sincronizzare gli orologi? Il metodo corretto, suggerito dal secondo postulato della teoria, è quello di utilizzare dei segnali luminosi. Gli osservatori in A e B inviano ad un terzo osservatore situato a metà strada tra essi (punto M) dei segnali luminosi quando i loro orologi indicano una stessa ora precedentemente convenuta. Se l'osservatore in M riceve i segnali nello stesso istante, gli orologi in A e B sono sincronizzati.

L'osservatore in M sincronizza due orologi distanti

Due eventi che sono simultanei rispetto ad un sistema di riferimento, lo sono anche rispetto ad un sistema in moto rispetto al primo?



Immaginiamo che due fulmini cadano colpendo la banchina nei punti A e B e il treno nei punti A' e B' lasciando su entrambi dei segni permanenti. Nel riferimento della banchina un osservatore che si trova nel punto M, equidistante da A e B, riceve contemporaneamente i bagliori dei fulmini e giudica simultanei i due eventi. Nel riferimento del treno un osservatore che si trova nel punto M', equidistante da A' e B', come giudica i due eventi?

Ecco la risposta di Einstein:

*“Tuttavia nella realtà (considerata con riferimento alla banchina ferroviaria), egli si muove rapidamente verso il raggio di luce proveniente da B mentre corre avanti al raggio proveniente da A. Pertanto l'osservatore vedrà il raggio di luce emesso da B prima di vedere quello emesso da A. Perveniamo così al seguente importante risultato: gli eventi che sono simultanei rispetto alla banchina, non sono simultanei rispetto al treno e viceversa (relatività della simultaneità); ogni corpo di riferimento (sistema di coordinate) ha il suo proprio tempo particolare: un'attribuzione di tempo è fornita di significato solo quando ci venga detto a quale corpo di riferimento tale attribuzione si riferisce”.*

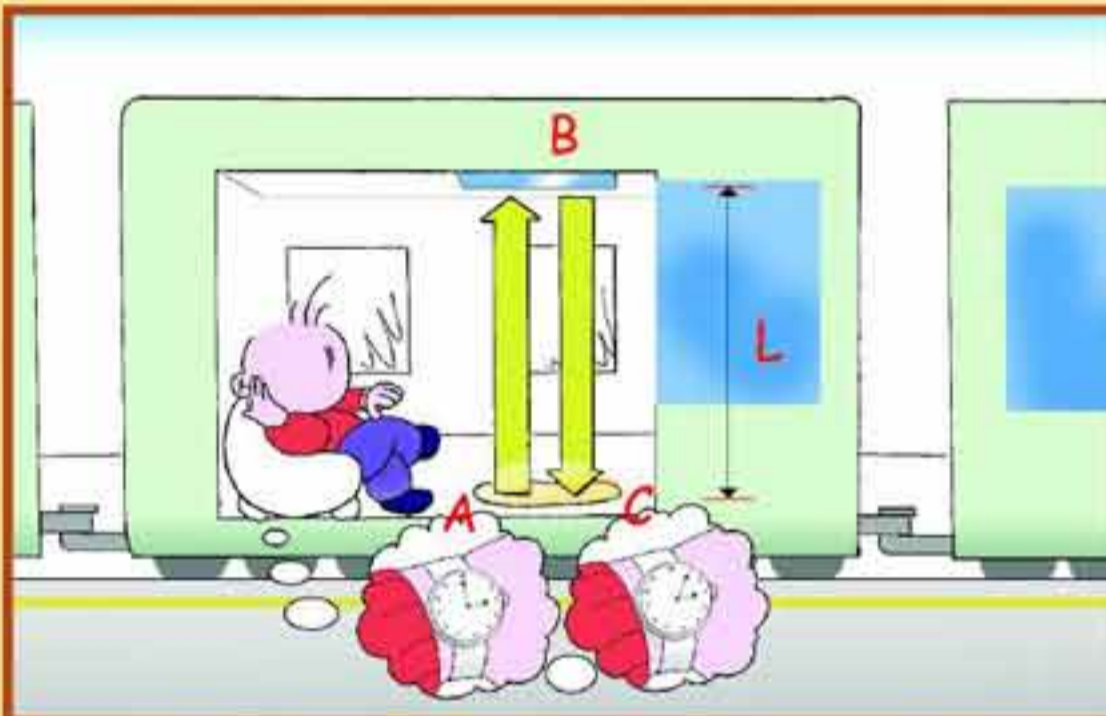
Quindi la simultaneità è relativa!



# I TEMPI SI DILATANO

Consideriamo un dispositivo costituito da una sorgente A che invia un impulso di luce, con velocità  $c$ , verso uno specchio B, distante  $L$ , che lo riflette indietro in A. Lo chiamiamo **orologio a luce**.

Immaginiamo che tale dispositivo si trovi nello scompartimento di un treno in transito per una stazione. Come misurare il tempo impiegato dall'impulso luminoso a percorrere il tragitto da A a B e ritorno?

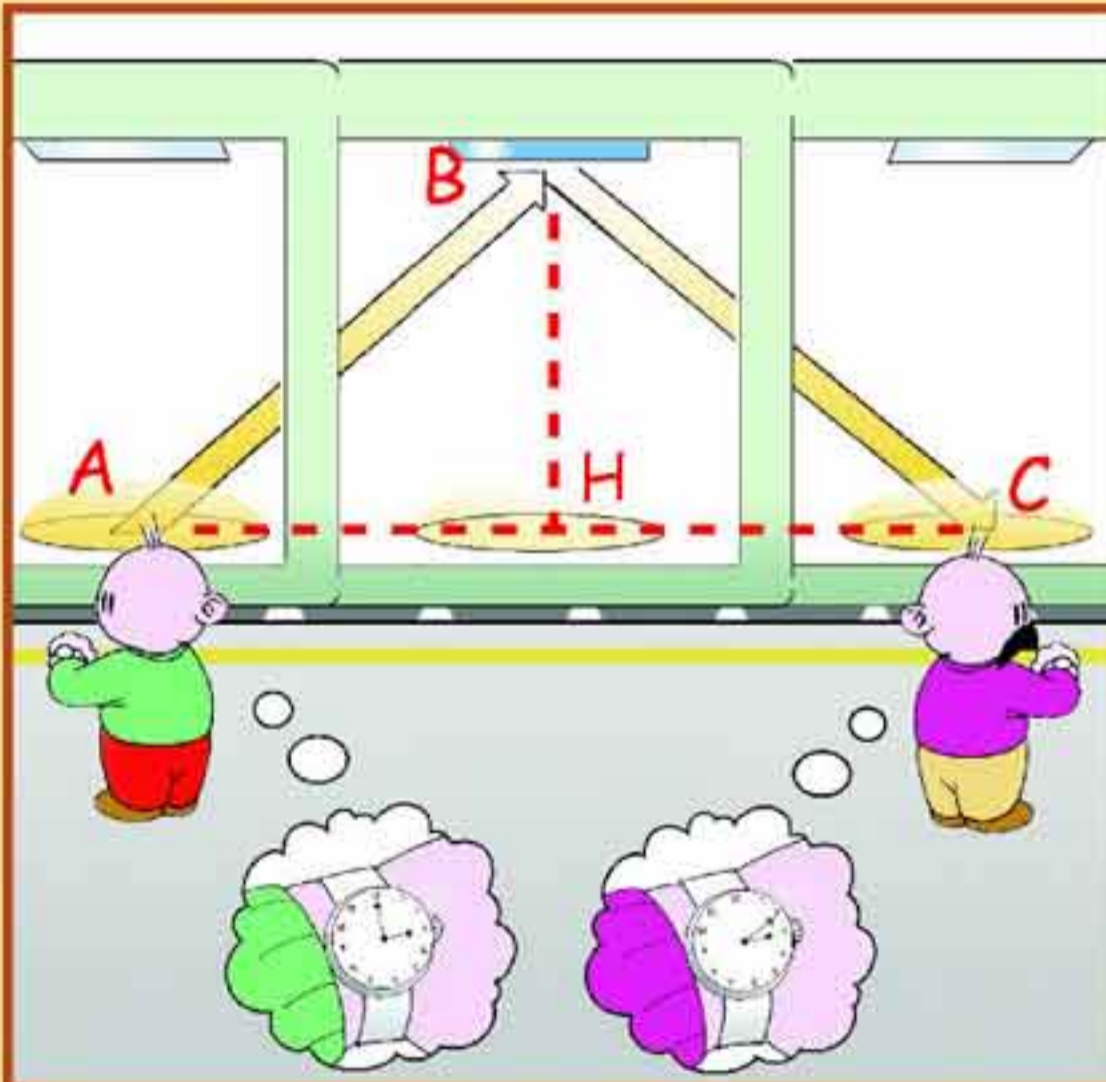


*Sul treno...*

...un osservatore determina il tempo  $t'$  mediante due letture del suo orologio: una quando l'impulso parte da A, l'altra quando ritorna in C.

Il tempo  
impiegato  
è dato da:

$$t' = \frac{2L}{c}$$



*Dalla banchina...*

...gli osservatori vedono che l'impulso luminoso ha una traiettoria diversa; infatti, mentre si propaga, il treno e lo specchio si muovono rispetto alla banchina con una velocità costante  $v$ , sicché per raggiungere lo specchio l'impulso deve propagarsi in modo obliquo (tratti AB e BC).

Essi misurano il tempo mediante le letture di due orologi: uno in A, il secondo in C.

La distanza percorsa dalla luce è ora maggiore di quella percorsa nel sistema di riferimento del treno; poiché la velocità della luce è sempre la stessa, il tempo  $t$  misurato dalla banchina è **maggiore** di  $t'$  misurato a bordo del treno!

Un semplice  
calcolo  
mostra che:

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

Al crescere della velocità del treno,  $t$  aumenta fino ad un valore teorico infinito quando  $v = c$ .

Quindi il **tempo** subisce una **dilatazione**.