

Il documento è protetto da copyright.  
Fatene un uso strettamente personale.  
E' vietato qualsiasi ulteriore atto di utilizzazione  
(re-immissione in rete, diffusione, riproduzione in copia)  
senza la dovuta autorizzazione o citazione della fonte di provenienza.  
**www.ibeans.it**

### ***La relatività ristretta***

Se le leggi della natura devono essere le stesse per tutti gli osservatori che si muovono a una velocità costante, tali osservatori devono concordare tutti con la descrizione delle leggi dell' elettricità e del magnetismo date da Maxwell. Poiché la velocità della luce è una costante inclusa nelle equazioni di Maxwell, ne segue che tutti gli osservatori devono misurare lo stesso valore della velocità della luce. In caso contrario i diversi osservatori troverebbero infatti diversi valori delle equazioni di Maxwell.

Questa conclusione viola già di per sé la nostra intuizione. Consideriamo un esempio semplice: siamo in piedi in una carrozza ferroviaria che si muove alla velocità di 80 km all'ora, e lanciamo in avanti una palla da baseball alla velocità di 80 km all'ora. Un osservatore che si trovasse fuori del treno vedrebbe naturalmente la palla muoversi a 160 km all'ora: la velocità del treno più la velocità della palla da baseball. Se però, invece di lanciare una palla, accendiamo una lampadina, il principio di relatività ci dice che un osservatore al suolo vedrà la luce muoversi alla velocità di 300.000 km al secondo, e non a 300.000 km al secondo più 80 km all'ora.

Questa sorta di contraddizione fondamentale fra il modo in cui noi pensiamo che l'universo dovrebbe comportarsi e l'idea che le leggi di natura abbiano una validità universale condusse Albert Einstein a riflettere sulla teoria della relatività. Verso la fine dell'Ottocento c'erano tre modi in cui si poteva risolvere questa difficoltà:

- 1) Potevano essere sbagliate le equazioni di Maxwell; oppure
- 2) poteva essere sbagliato il principio di relatività; oppure
- 3) potevano essere sbagliate le nostre idee intuitive sullo spazio o sul tempo.

Quest'ultima possibilità deriva dal fatto che, per calcolare la velocità, dobbiamo dividere la distanza percorsa per il tempo impiegato a percorrerla. Nel nostro pensiero intuitivo sul problema della luce della lampadina, per esempio, noi supponiamo che un orologio al suolo e un orologio sul treno segnino entrambi il tempo nello stesso modo. In realtà ciò potrebbe essere vero o no, e noi non potremmo mai saperlo se non dopo aver compiuto le misurazioni.

Negli anni venti alcune serie teorie proposero di apportare modifiche alle equazioni di Maxwell per far dipendere la velocità della luce dal moto della sorgente. Sottoposte alla prova dell'esperienza (per esempio misurando la luce emessa da un sistema binario quando una delle due stelle del sistema si sta muovendo verso di noi e quando si sta allontanando), queste modifiche non trovarono conferma. Possiamo dire di fatto che tanto le equazioni di Maxwell quanto quelle di Einstein sono state abbondantemente confermate dai fatti. Rimane perciò solo la terza possibilità, che ci sia qualcosa di sbagliato nelle nostre nozioni intuitive sul modo in cui diversi osservatori considerano cose come orologi e regoli.

Einstein, riflettendo su questi problemi, comprese che, l'orologio al polso di un uomo seduto su un tram non segnava il tempo allo stesso modo dell'orologio di un altro uomo in attesa alla fermata dello stesso tram. Guardando un orologio su una torre, si rese conto che, se si fosse trovato su un tram lanciato alla velocità della luce, l'orologio della torre gli avrebbe dato l'impressione di fermarsi. In tal caso, infatti, egli si sarebbe allontanato dalla torre, per così dire, a cavalcioni di una singola cresta di un'onda luminosa. Il suo orologio da tasca, d'altra parte, muovendosi insieme a lui, avrebbe continuato a ticchettare nel suo modo solito. Perciò, ragionò Einstein, valeva quanto meno la pena di riflettere sulla possibilità che il nostro assunto abituale sul tempo - che esso sia lo stesso per tutti gli osservatori - sia semplicemente sbagliato nel caso di oggetti in movimento a velocità prossime a quella della luce.

Noi pensiamo istintivamente che ci sia qualcosa di sbagliato nell'idea che la luce viaggi alla stessa velocità tanto se viene emessa da una sorgente in movimento quanto se proviene da una sorgente immobile. Il nostro pregiudizio si fonda su una vita di esperienze con oggetti in movimento. Ma quanta di questa esperienza è stata conseguita muovendosi a velocità prossime a quella della luce? Nessuno di noi ha mai viaggiato a velocità anche di un po' inferiori a 300.000 km al secondo, cosicché, a rigore, non abbiamo alcuna esperienza su come la luce o una palla da baseball dovrebbero comportarsi a tali

velocità.

L'unica cosa effettivamente violata nell'esempio della luce della lampadina che si muove a velocità relativistica è la nostra attesa spontanea che la natura debba

*La dilatazione del tempo*

comportarsi nello stesso modo alle alte e alle basse velocità. Ma questo è solo un assunto e, come altri assunti, prima di poter essere accettato deve essere sottoposto alla prova dell'esperimento.

Esploriamo con mente aperta alcune delle notevoli conseguenze del principio di relatività e vediamo come le previsioni della teoria reggano alla prova dell'esperimento.

Un orologio misura a ogni tic-tac una durata di tempo uguale. Qualsiasi cosa che «ticchetti» può essere usata per misurare il passaggio del tempo.

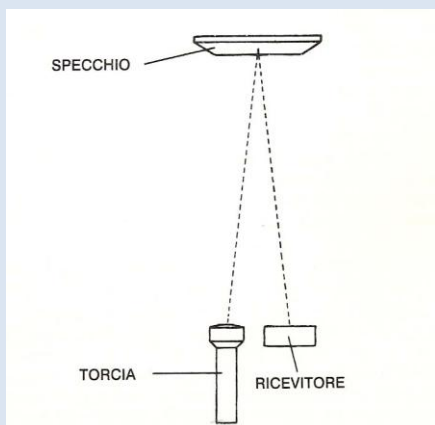


Fig.01

Pensiamo a un orologio composto da una sorgente di luce stroboscopica, da uno specchio e da uno strumento che registri l'arrivo di un raggio di luce. Ogni «tiC» o «tac» dell'orologio consiste in un singolo lampo di luce, nella propagazione della luce sino allo specchio e dal click (o che altro) dello strumento al ritorno della luce. Se la ricezione della luce al suo ritorno nello strumento determina il successivo lampo di luce, l'orologio «ticchetterà» regolarmente. Possiamo immaginare di adattare la distanza dello specchio così che i «tic-tac» del nostro orologio a luce siano sincronizzati con i tic-tac di qualsiasi altro tipo di orologio: la pendola del nonno, le vibrazioni nell'orologio al quarzo che portiamo al polso, e via dicendo. Nonostante il suo aspetto strano, l'«orologio a luce» sarebbe un orologio perfettamente normale.

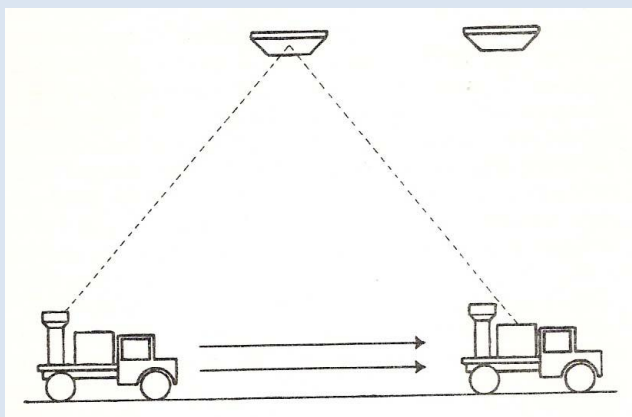


Fig02

Albert Einstein si rese conto che un orologio a luce in movimento sembra segnare il tempo in modo diverso per vari osservatori. Quanto più rapidamente un orologio si muove di moto relativo verso l'osservatore, tanto più rapidamente dovrebbe viaggiare la sua luce, ma la velocità di propagazione della luce è costante. (Lo specchio si muove assieme all'autocarro.) Einstein concluse che quando un orologio si approssima alla velocità della luce, il tempo sembra scorrere più lentamente

Immaginiamo due orologi a luce, entrambi orientati perpendicolarmente al suolo, uno dei quali si trovi accanto a noi e l'altro su una macchina che passi accanto a noi a velocità costante. Predisponiamo le cose in modo tale che, mentre i due orologi passano l'uno accanto all'altro, entrambe le lampade emettano un lampo di luce. La luce emessa dall'orologio stazionario raggiunge lo specchio e viene riflessa verso il ricevitore. Frattanto la luce emessa dall'orologio in movimento si muove verso l'alto mentre l'intero orologio si muove verso destra. Ne consegue che la luce emessa dall'orologio in movimento *quale è vista da un osservatore stazionario al suolo*, deve compiere un percorso a denti di sega, come si vede nella figura.

Il principio di relatività ci dice che la velocità della luce deve essere la stessa in tutti i sistemi di riferimento. La luce nell'orologio in movimento deve percorrere una distanza maggiore, cosicché impiegherà un tempo più lungo per raggiungere la sua destinazione rispetto alla luce nell'orologio stazionario, la quale deve compiere solo un percorso avanti e indietro. L'osservatore al suolo vedrà entrambi i lampi di luce, poi udrà il tic-tac a luce del suo orologio e solo in seguito udrà il tic-tac dell'orologio in movimento. La stessa cosa si ripeterà a ogni clic, e l'orologio in movimento sarà sempre più in ritardo rispetto a quello stazionario. Se la velocità della luce è la stessa per tutti gli osservatori, ne segue che *gli orologi in movimento vanno più lentamente*. Questo è l'effetto noto come dilatazione del tempo.

Molti reagiscono a questo ragionamento negando che l'orologio in movimento sia «in realtà» più lento. In quanto insegnanti, noi abbiamo imparato a riconoscere nell'uso dell'espressione «*In realtà*» un indizio di una *forma mentis* newtoniana e a usare quest'obiezione per portare i nostri allievi ad affrontare il vero nocciolo della teoria della relatività. Quando infatti qualcuno dice che «in realtà» l'orologio in movimento non va più lento, intende dire che esso appare normale *a un osservatore che partecipi dello stesso movimento*. Per usare la terminologia del fisico, l'orologio appare normale all'interno del «proprio» sistema di riferimento.

L'assunto che si cela in quest'obiezione è che in qualche modo il sistema di riferimento proprio sia quello «giusto» e che gli altri sistemi siano «sbagliati», e che, se si vuol sapere come si comporti «in realtà» l'orologio si debba considerare il sistema di riferimento suo proprio. La tesi centrale della teoria della relatività è però che non ci siano sistemi di riferimento «giusti», che non esista alcuna posizione privilegiata dalla quale si dovrebbero osservare gli eventi. Ogni osservatore - ogni sistema di riferimento - ha un egual diritto a essere ascoltato quando si danno descrizioni di eventi fisici.

Ancora più disturbante della nozione anti-intuitiva della dilatazione del tempo è il fatto che l'effetto esiste realmente in natura. Ci sono molte conferme di questa tesi, ma l'esperimento più clamoroso fu eseguito da scienziati dell'Università del Michigan. Essi fissarono orologi atomici estremamente precisi a sedili di prima classe su aerei che facevano il giro del mondo e, una volta completato il viaggio, confrontarono l'ora segnata da tali orologi con quella di orologi simili che erano rimasti al suolo. Come ci si attendeva, gli orologi che avevano viaggiato erano rimasti leggermente indietro.

La dilatazione del tempo, oltre a essere facilmente derivabile dal principio di relatività, è dunque anche confermata dall'esperimento. Per quanto possa sembrare difficile conciliare questo fatto con la nostra

intuizione, gli orologi in sistemi di riferimento in moto rimangono indietro rispetto a orologi stazionari. Nella nostra esperienza normale questo rallentamento è troppo piccolo per poter essere misurato tranne che con strumenti di estrema precisione: un orologio che avesse viaggiato a 100 km all'ora dall'inizio dell'universo a oggi sarebbe rimasto indietro di un solo secondo. Se la velocità dell'orologio in movimento è piccola rispetto alla velocità della luce, la larghezza del dente di sega sarà piccola e la distanza percorsa dai due raggi di luce sarà press'a poco la stessa. Differenze apprezzabili si manifestano solo quando i denti di sega sono molto larghi (cioè quando la velocità dell'orologio si approssima a quella della luce).

Per ora non siamo ancora costretti a rinunciare alla nostra intuizione sugli orologi in relazione all'esperienza quotidiana, ma se l'uomo svilupperà mai astronavi in grado di viaggiare a velocità prossime a quella della luce, la dilatazione della luce potrebbe avere conseguenze disastrose per i futuri genealogisti. Viaggiatori spaziali a velocità elevatissime, invecchiando lentamente nel corso delle loro lunghe spedizioni, potrebbero tornare da un viaggio più giovani dei loro figli rimasti sulla Terra!

Tu stesso puoi verificare la tua comprensione della dilatazione del tempo convincendoti che un osservatore che viaggi accanto all'orologio in movimento penserà che l'orologio sulla terra stia andando più piano.

### **Altre previsioni della relatività ristretta**

Einstein chiamava il tipo di esercizio che abbiamo appena fatto per l'orologio in movimento un *Gedankenexperiment* (« esperimento concettuale »). È una tecnica che ci consente di comprendere il comportamento essenziale di cose come gli orologi, anche se l'esecuzione di tale particolare esperimento potrebbe essere tecnicamente difficile. Altri esperimenti mentali permisero a Einstein di trarre conclusioni sorprendenti dalla sua teoria ristretta della relatività:

1) I regoli in movimento sono più corti di quelli stazionari. Quando un oggetto si muove, si contrae - si accorcia fisicamente - nella direzione del movimento.

Così, una palla da baseball che si muovesse alla velocità della luce, o a una velocità prossima a quella della luce, apparirebbe appiattita, come un biscotto visto di taglio.

2) Gli oggetti in movimento hanno una massa maggiore.

Quanto più velocemente si muove un oggetto, tanto maggiore diventa la sua massa e tanto più difficile è deviarlo dal suo corso. Quando un oggetto in movimento si approssima alla velocità della luce, la sua massa - qualunque essa sia allo stato di quiete - tende all'infinito. Questo risultato conduce al comune fraintendimento che nulla possa muoversi più "velocemente della luce. La relatività non dice nulla del genere: essa dice solo che nessuna cosa che si muova a una velocità inferiore a quella della luce può essere accelerata sino a raggiungere e a superare tale velocità. C'è ancora spazio per il *Wmp drive*, il motore dei telefilm della serie *Star Trek* capace di

far viaggiare le astronavi a velocità molto superiori a quella della luce!

3)  $E = mc^2$

Il risultato più famoso della teoria della relatività è l'equivalenza di massa ed energia. Questa semplice equazione è stata elevata a livello di folklore, ed è forse l'unica equazione della fisica a godere di un tale status. Essa dice, in effetti, che la massa non è altro che un'altra forma dell'energia. La massa può anche sparire, purché venga sostituita da una quantità equivalente di energia in una forma diversa. Più sorprendentemente, se c'è una quantità di energia disponibile (per esempio nella collisione fra due particelle) una parte di tale energia può essere convertita in massa, e può essere creata una nuova particella in precedenza inesistente. La nuova particella non è creata «dal nulla», bensì da energia tratta da un'altra sorgente.

Poiché la velocità della luce,  $c$ , è un numero molto grande, la conversione di un pezzetto di massa può produrre una quantità grandissima di energia. Inversamente, si richiede una grande quantità di energia per produrre anche una piccola particella. Un blocco di cemento abbastanza piccolo da poter stare sotto il nostro tavolo da cucina, se fosse trasformato completamente in energia potrebbe fornire corrente elettrica agli Stati Uniti per più di un anno.

## **Conferma sperimentale**

Gli scienziati hanno potuto verificare tutte queste previsioni della relatività ristretta. Per esempio, i fisici usano di solito acceleratori di particelle per portare fasci di protoni e di elettroni a velocità prossime a quella della luce. Le particelle che vengono accelerate sono mantenute mediante grandi magneti all'interno di un percorso preordinato, e la forza esercitata dai magneti deve essere regolata in modo da tenere conto dell'accrescimento della massa delle particelle. Ogni volta che si usa una di queste macchine, si ha una conferma delle predizioni della teoria della relatività.