

6 La relatività della simultaneità

6.1 Concludiamo la disamina della concezione di spazio e tempo di Newton

Concludiamo la disamina della concezione di **spazio** e **tempo** di Newton, in particolare di spazio e tempo assoluti, esaminando altre critiche a tale concezione (tratte ancora dal lavoro di *Carla Casadio* e *Olivia Levrini*). Tali critiche riguardano la logica "causale" utilizzata da Newton e sono ben espresse nel seguente brano di Max Born (1882 – 1970) matematico e fisico tedesco. Premio nobel per la fisica nel 1954:

*"Ritenere che lo spazio sia la **causa** di qualche fenomeno è certamente incompatibile con un criterio di logica causale. L'ipotesi di uno spazio assoluto è giustificata soltanto dal tentativo di interpretare le **forze d'inerzia**, ma esse d'altra parte costituiscono l'unica indicazione della sua esistenza. Sulla base di una legittima critica epistemologica, tale ipotesi ad hoc è certamente inaccettabile; essa è troppo superficiale e troppo lontana dallo scopo della ricerca scientifica, che è diretta a stabilire dei criteri per distinguere i suoi risultati da ipotesi più o meno fantasiose. Se il foglio di carta su cui ho appena finito di scrivere vola improvvisamente dal tavolo, nessuno può impedirmi di pensare che sia stato portato via da un fantasma... per esempio dallo spettro di Newton. Ma alla luce del buon senso sono piuttosto portato a ritenere che qualcuno sia entrato dalla porta e si sia così creata una corrente d'aria proveniente dalla finestra aperta; tale ipotesi, anche se non mi sono accorto di questa corrente, è ragionevole perché mi permette di stabilire una relazione tra il fenomeno che voglio spiegare e altre circostanze osservabili. E' infatti un **atteggiamento critico** [in senso etimologico: "arte o scienza di giudicare secondo i principi del vero, del buono, del bello..."] nello scegliere le cause possibili che distingue il tentativo di costruire una descrizione della realtà basata sulla ragione, proprio della ricerca fisica, dal misticismo, dallo spiritualismo e da analoghe manifestazioni dell'immaginazione incontrollata.*

Il concetto di spazio assoluto mantiene appunto un certo carattere "metafisico". Alla domanda "qual è la causa delle forze centrifughe?" la nostra risposta è "lo spazio assoluto"; ma se si cerca di capire in che cosa consista lo spazio assoluto e in quale altro modo definirlo, non vi è altra risposta che ripetere "lo spazio assoluto è la causa delle forze centrifughe", senza poter aggiungere altre proprietà. Queste considerazioni dimostrano che l'idea di uno spazio come "causa" è incompatibile con una descrizione scientifica della realtà." (Born, 1962)xiv

Da Newton ad Einstein: il lungo percorso di costruzione della fisica come campo di conoscenza autonomo dalla teologia

Il travagliato percorso di accettazione della fisica newtoniana da parte della comunità scientifica e, più in generale, di costruzione della fisica come disciplina autonoma dalla teologia vede il *dibattito sul concetto di spazio* come caso emblematico, la cui storia è stata ricostruita da M. Jammer, **"Storia del concetto di spazio"** (1954), Feltrinelli,. Ne riportiamo di seguito brani (evidenziandone i punti che ci sembrano particolarmente significativi) che si riferiscono alle tappe principali che da Newton hanno portato a Mach.

Da Il concetto di spazio assoluto nella scienza moderna (XVIII e XIX secolo)

*"Nessuna delle critiche mosse da Leibniz e Huygens contro il concetto di spazio assoluto di Newton poté impedirne l'accettazione. Le lettere scambiate tra Leibniz e Clarke, sebbene molto lette, furono studiate e discusse soprattutto per le loro implicazioni teologiche. Con l'accettazione del sistema newtoniano, e man mano che le rivali teorie cartesiane cadevano in disgrazia, il concetto di spazio assoluto di Newton divenne **una condizione fondamentale della ricerca fisica**. [...]*

*Non solo l'aspetto sobrio, positivo e scientifico della concezione dello spazio assoluto di Newton guadagnò terreno, ma la divinizzazione dello spazio, agli inizi del diciottesimo secolo, fu salutata con entusiasmo non minore, in quanto strettamente conforme alla prospettiva generale del tempo, per il quale **la scienza era divenuta sinonimo di studio delle opere di Dio**. 'La natura fu salvata da Satana e resa a Dio' [Willey B., 1949]. [...]*

La nozione di spazio assoluto trionfò su tutti i fronti. Non solo, ma durante il diciottesimo secolo furono compiuti dei tentativi per dimostrare **la necessità logica del concetto**. Con tale problema lottò strenuamente per più di trent'anni niente meno che un uomo come Eulero, [giungendo alla conclusione che lo spazio assoluto era necessario come] substrato reale indispensabile allo scopo di una determinazione del moto. Poiché questo substrato non sembra esistere nell'informe materiale che ci sta intorno, allora è lo stesso spazio che deve esistere secondo questa capacità. 'Se ne dovrebbe piuttosto concludere che tanto lo spazio assoluto quanto il tempo, quali i matematici se lo rappresentano, sono cose reali, che sussistono anche fuori dalla nostra immaginazione'. [...]

'Questo permanere di un corpo in uno stato di quiete o di moto uniforme, può avere luogo solo in rapporto allo spazio assoluto, e può essere intelligibile solo ammettendolo' [Maclaurin] [...]

E' interessante notare quanto poco il contemporaneo progresso della scienza della meccanica rimase toccato dalle considerazioni generali sulla natura dello spazio assoluto. Fra i grandi scrittori francesi di meccanica, Lagrange, Laplace e Poisson, nessuno nutrì grande interesse per il problema dello spazio assoluto. Tutti accettarono l'idea **come un'ipotesi di lavoro** senza affaticarsi intorno alla sua giustificazione teoretica. Leggendo le introduzioni alle loro opere si scopre la convinzione che la scienza può benissimo astenersi da considerazioni generali sullo spazio assoluto. E' interessante notare che l'Encyclopédie di Diderot e d'Alembert esprime in alto grado il medesimo punto di vista. Nel quinto volume, alla voce Spazio, leggiamo: 'Questo articolo è tratto dalle carte del Signor Formey, che l'ha scritto in parte sulla scorta della raccolta delle lettere di Clarke, Leibniz, Newton, Amsterdam 1740, e in parte sulla scorta delle istituzioni di fisica di Madame du Châtelet. Noi non prenderemo partito sul problema dello spazio; si può vedere, attraverso tutto ciò che è stato detto alla voce Elementi della scienza **quanto questo oscuro problema sia inutile alla geometria e alla fisica**.' [...]

Verso la fine del diciannovesimo secolo divenne ovvio che lo spazio assoluto si sottraeva a tutti i mezzi di investigazione sperimentale. Mach mostrò che l'ipotesi dello spazio assoluto per la spiegazione delle forze centrifughe del moto rotatorio non era necessaria.

E così, verso la fine del diciannovesimo secolo il dibattito sul problema dello spazio assoluto in meccanica classica sembrava aver trovato un periodo di quiete relativa, se non fosse che la sistematizzazione dell'elettromagnetismo da parte di Maxwell riaprì immediatamente il dibattito: la teoria infatti presupponeva l'esistenza del cosiddetto "etere luminifero", un mezzo rispetto al quale le onde elettromagnetiche (cioè anche la luce) si muovevano con velocità c .

Appena individuata, dunque, l'idea che sembrava poter liberare la meccanica dallo spazio assoluto newtoniano, un altro spazio assoluto (inteso come **sistema di riferimento privilegiato**) ricomparve in fisica attraverso l'elettromagnetismo. Fu anche per mostrare quanto questo sistema di riferimento privilegiato fosse superfluo che venne formulata la relatività ristretta.

6.2 Analisi di brani tratti da "sull'elettrodinamica dei corpi in movimento" di Einstein (Tratto da un lavoro di *Olivia Levrini*)

Introduzione

Nel presentare la relatività ristretta alla comunità scientifica Einstein sceglie di inquadrarla in una precisa visione della fisica in cui i criteri di semplicità e coerenza risultano i criteri guida. Semplicità e coerenza che, per esempio, significano:

"simmetrie che si osservano nei fenomeni" devono essere descritte da "teorie simmetriche", ovvero le teorie fisiche non possono introdurre elementi di asimmetria a livello di descrizione senza che ci sia una ragione "plausibile" e, cioè, senza che tali asimmetrie siano presenti nei fenomeni stessi (l'argomento dell'identità degli indiscernibili).

In altre parole, il primo e principale problema da risolvere con la nuova teoria è, nella visione di Einstein, un' "inaccettabile" situazione in cui si trovava la fisica alla fine dell'800,

per cui l'elettromagnetismo di Maxwell valeva soltanto "per i corpi stazionari" (i corpi in quiete rispetto all'**etere luminifero**, il mezzo di cui si immaginava cosparso lo spazio in grado di propagare la luce) e non "per i corpi in movimento". Tale situazione era inaccettabile per il fatto che i fenomeni elettromagnetici mostravano invece, sperimentalmente, gli stessi comportamenti se osservati da diversi sistemi di riferimento inerziali e, quindi, di seguire di fatto **un principio di relatività**.

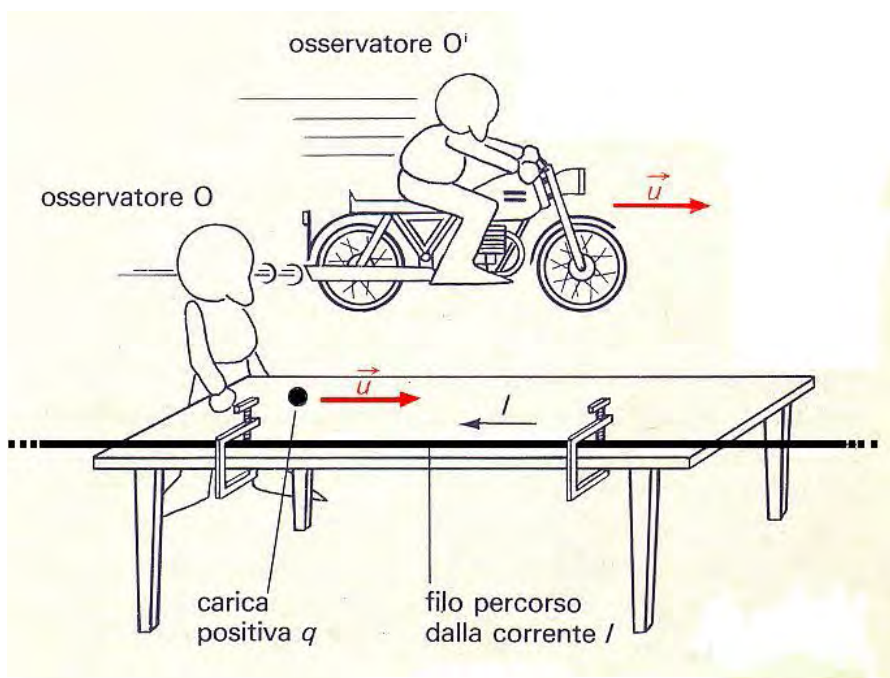
Qui di seguito riportiamo un esempio di questo tipo di "asimmetria" più semplice rispetto all'esempio originariamente fornito da Einstein:

TRATTO DA: Benuzzi F., *Un esperimento di insegnamento della Fisica: "Serena-che-cade e Alex-che-ride"*, *la Relatività Ristretta tra storia, epistemologia e studenti di V Liceo*, Tesi di Specializzazione, SSIS, Indirizzo F-I-M, classe A038, Università di Bologna,

6.3 Asimmetrie interne all'elettromagnetismo.

Il principio di relatività di Galileo¹ si applica all'elettromagnetismo?

Al tempo di Galileo l'elettromagnetismo era di fatto sconosciuto e perciò, nell'enunciare il principio di relatività, Galileo parlò solo di fenomeni meccanici. Ma perché tale principio dovrebbe valere solo per questi? La possibilità di "fare a meno" di un **sistema di riferimento assoluto** dovrebbe valere in qualsiasi ambito della fisica. O no?

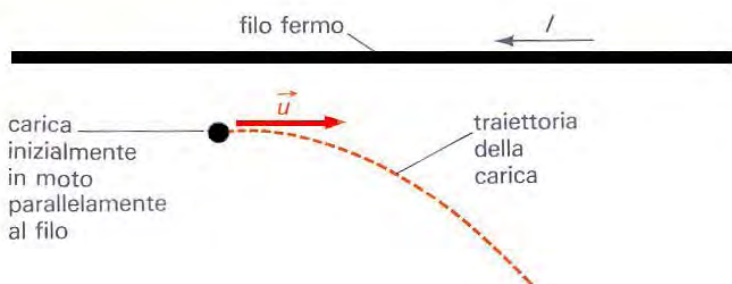


Consideriamo pertanto una semplice situazione in cui intervengano cariche e correnti elettriche e vediamo quali conseguenze derivino dall'applicazione ad essa del principio di relatività (da: G.Manuzzio e G.Passatore - *Verso la Fisica*, vol. 3 - Principato, 1981).

La situazione che vogliamo considerare è quella rappresentata in figura.

O è un sistema di riferimento solidale ad un filo elettricamente neutro percorso da corrente I . Sia q una carica positiva che

all'istante iniziale è in moto, rispetto a questo riferimento, e parallelamente al filo, con velocità u opposta al verso della corrente.



In questo sistema di riferimento la carica si allontana dal filo: infatti la corrente nel filo genera un campo magnetico B e, di conseguenza, la carica q è soggetta alla forza diretta perpendicolarmente al filo ed orientata verso l'esterno. **N.B.** non l'avevo specificato nella lezione sull'elettromagnetismo ma la *dipendenza della forza magnetica dalla velocità* si

¹ Sistemi di riferimento in moto relativo rettilineo uniforme, in meccanica, sono "fisicamente equivalenti". Cioè all'interno di ciascuno di essi valgono le stesse leggi della meccanica.

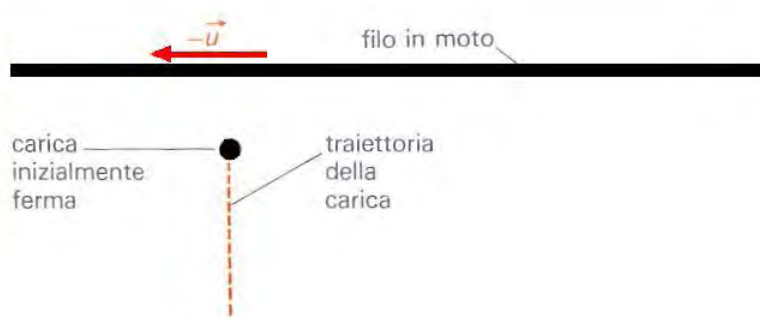
manifesta anche quando si debba valutare l'azione di un campo magnetico su di una **carica libera**: *il campo magnetico esercita una forza non nulla su una carica libera solo se questa è in moto relativo rispetto al filo o al magnete che tale campo genera, cioè se ha velocità non nulla rispetto a questo.*

In questo riferimento non si individuano forze di natura elettrica poiché, oltre la carica q , non esistono cariche elettriche (il filo è elettricamente neutro), e quindi non esistono sorgenti che possano creare un campo elettrico agente sulla carica.

O' è un sistema di riferimento in moto relativo rispetto al filo con velocità u uguale a quella della carica q . Nel riferimento O' pertanto la **carica risulterà ferma** ed il **filo si muoverà**, nel verso di scorrimento della corrente, con velocità $-u$

Anche in questo riferimento, ovviamente, la carica si allontana dal filo, sebbene con traiettoria differente;

E' importante però considerare attentamente come in tale sistema di riferimento si interpreti questo fatto: se è vero che il principio di relatività vale anche per i fenomeni elettromagnetici, in O' valgono le stesse leggi che valgono in O . In O' la carica q risulta inizialmente ferma, quindi, all'inizio il suo allontanarsi dal filo si potrà attribuire solo ad un'azione elettrica.



Dunque, se vale il principio di relatività, mentre nel riferimento O l'allontanamento della carica q dal filo è attribuita alla presenza di un campo magnetico, in O' lo stesso fenomeno è attribuito all'azione di un campo elettrico.

Il "carattere elettrico o magnetico" di un campo sembra così manifestarsi in dipendenza del sistema di riferimento. Questa constatazione pone un problema piuttosto imbarazzante: Com'è possibile che ciò avvenga? Com'è possibile che un filo percorso da corrente produca o no un campo elettrico a seconda che noi siamo in moto o fermi rispetto ad esso?

Prima di giungere a comprendere come la relatività ristretta spazii via quest'apparente asimmetria sarà necessario un po' di sforzo da parte vostra. Andiamo con ordine seguendo la strada proposta da Einstein stesso. E in un modo che, almeno nelle sue fasi introduttive, difficilmente troverai nei normali libri di testo.

6.3 Definizioni importanti fra cui la definizione di simultaneità

Molto più di quanto non venga fatto nei libri di testo, infatti, Einstein pone estrema attenzione alla costruzione della **definizione operativa del concetto di tempo** e a tutti i passaggi necessari per dotare ogni osservatore di un **reticolo di orologi sincronizzati**.

Tali passaggi prevedono le definizioni di **evento**, di **tempo di un evento**, di **simultaneità per eventi che avvengono in luoghi differenti** (ovvero di **sincronizzazione di orologi**) e li ripercorriamo qui di seguito perché, anche se pedanti, sono non banali e ad essi si possono ricondurre alcune difficoltà circa la comprensione degli effetti relativistici.

DEF di evento: Un evento fisico è qualcosa che accade *istantaneamente* indipendentemente dal sistema di riferimento che si può scegliere per descriverlo.

Es. *Accensione* di una lampadina, *emissione* o ricezione di un segnale luminoso o sonoro, lancio di un oggetto, incontro tra oggetti, ecc.

Perché un **evento** sia *localizzato nello spazio e nel tempo* è necessaria la scelta di un particolare **sistema di riferimento**.

Un evento è definito operativamente quando sono definite le operazioni di misura necessarie per determinare **posizione** e **istante di tempo** in cui l'evento stesso accade. La definizione operativa prevede perciò l'utilizzo **sia** di un "regolo misuratore" **sia** di un **orologio**.

N.B. Il concetto di evento sembra banale e, invece, riuscire a guardare ad un fenomeno fisico scomponendolo in una "collezione" di eventi è un'operazione razionale da compiere consapevolmente. Accade infatti molto spesso che si continui ad utilizzare il termine (il concetto) di *evento* negli stessi contesti e con gli stessi significati del termine (concetto) di *fenomeno*, così come solitamente si fa (in questo caso in modo lecito) nel linguaggio comune. In relatività, tuttavia, continuare a pensare ad un evento come ad un "fenomeno che ha una sua durata" può essere all'origine di profonde difficoltà nella comprensione di aspetti e/o concetti cruciali, come gli effetti relativistici o la distinzione tra misure proprie e non proprie di tempo e lunghezza (vedi più avanti l'esperimento mentale dell'orologio a luce). Lo vedremo meglio al momento di risolvere semplici (ma non facili) esercizi.

DEF di tempo di un evento: il tempo che "è misurato dall'orologio" collocato nella *stessa posizione in cui si verifica l'evento*, dove per "essere misurato dall'orologio" si intende "avvenire simultaneamente con un evento preso a riferimento".

Scriva Einstein: «Se per esempio, dico che "il treno arriva qui alle 7 in un punto", ciò significa, in pratica, che "il posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio sul 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei"».

Dal momento che **nessun segnale può viaggiare con velocità infinita**, la definizione del "tempo di un evento" non risolve completamente il problema di «correlare nel tempo serie di eventi che avvengono in luoghi differenti, oppure – il che è lo stesso – determinare i tempi di eventi che si verificano in luoghi distanti dall'orologio.».

Infatti per stabilire se due eventi distanti spazialmente sono avvenuti simultaneamente o no, occorre tener conto del **tempo impiegato da un segnale a percorrere la distanza che li separa**.

DEF di simultaneità per eventi che avvengono in luoghi differenti: due eventi distanti spazialmente sono simultanei quando gli orologi corrispondenti sono tra di loro sincronizzati e registrano per essi lo stesso tempo.

Il problema della **sincronizzazione di orologi** distanti nello spazio è delicato.

Come scrive Einstein: «Finora abbiamo definito solo un "tempo A" e un "tempo B", ma non un "tempo comune per A e B". Quest'ultimo può essere determinato stabilendo, *per definizione*, che il "tempo" necessario alla *luce* per propagarsi da A a B è uguale al tempo che essa impiega per propagarsi da B a A.

Supponiamo, cioè, che un raggio di luce che parta da A, diretto verso B, al "tempo A", t_A , venga riflesso da B verso A al "tempo B", t_B , e giunga di nuovo in A al "tempo A" t'_A .

Per definizione, i due orologi sono sincronizzati se: $t_B - t_A = t'_A - t_B$.

Un *modo operativo* per sincronizzare due orologi distanti spazialmente può essere quello di far partire un segnale luminoso dall'orologio in A verso quello in B. I due orologi saranno sincronizzati se A porrà il suo orologio ad un tempo $t_A=0$ contemporaneamente all'invio del segnale e B metterà l'orologio ad un tempo $t_B=d/c$ (il tempo impiegato dal segnale a percorrere la distanza d che separa gli orologi) quando il segnale lo raggiungerà.

Un altro modo è quello di collocare ad ugual distanza dai due orologi un emettitore di segnali luminosi **C**. Gli orologi in A e in B dovranno accordarsi per segnare lo stesso tempo t_0 quando sono raggiunti da due segnali emessi contemporaneamente da **C**.

In qualunque modo si scelga di sincronizzare due orologi distanti nello spazio si ha che **l'esistenza in natura di una velocità limite fa sì che per determinare la distanza temporale tra due eventi distanti spazialmente è necessaria anche una misura della loro distanza spaziale**, essendo tale misura necessaria per sincronizzare gli orologi che si trovano nelle posizioni in cui i due eventi accadono.



Fatti questi passaggi diventa possibile dotare ogni osservatore di **un reticolo di orologi sincronizzati** grazie al quale definire operativamente il tempo di ogni evento e confrontare il tempo di **eventi anche distanti spazialmente**.

N.B. Nella costruzione del reticolo di orologi le proprietà considerate della luce sono la sua **finitezza** e la sua **isotropia** (il suo assumere lo stesso valore in tutte le direzioni)

La velocità della luce ha un'altra caratteristica notevole, di difficile comprensione intuitiva, che vedremo in gioco al momento di analizzare la relatività della simultaneità.

6.4 Sulla relatività di lunghezze e tempi

In questo paragrafo Einstein descrive il procedimento di costruzione della **definizione operativa della lunghezza** e anticipa gli effetti relativistici che poi ricaverà formalmente, nel paragrafo successivo, a partire dalle trasformazioni di Lorentz²

Anche nella definizione di lunghezza Einstein è molto preciso e distingue:

DEF(a) Misura della **lunghezza di un oggetto "fermo"**: confronto diretto dell'asta con un regolo campione: operazione **possibile SOLTANTO** nel **sistema solidale all'asta**;

DEF(b) Misura della **lunghezza di un oggetto "in movimento"**: registrazione, per mezzo di orologi collocati nel sistema in quiete e sincronizzati, delle posizioni in cui si trovano le due estremità dell'asta da misurare in un determinato istante (ovviamente posizione degli orologi e tempi da essi registrati sono legati dalla relazione: $t_B = d/c$): operazione **necessaria SOLTANTO** nel **sistema in moto rispetto all'asta**.

Anche nella definizione di lunghezza in moto, così come nel definire l'ordine temporale di due eventi distanti spazialmente, emerge un aspetto importante: **l'esistenza in natura di una velocità limite** (quindi l'impossibilità della propagazione istantanea di un segnale, in questo caso del segnale di posizione delle estremità) **fa sì che per determinare la lunghezza di un oggetto in movimento, oltre ad un regolo, occorre un reticolo di orologi sincronizzati**.

Oggi le due diverse definizioni di lunghezza sono indicate rispettivamente come:

DEF(a) "definizione di **"lunghezza propria"**

DEF(b) definizione di **"lunghezza non propria"**

Fin qui l'articolo si sviluppa con un'analisi puntale dei concetti di tempo e lunghezza al fine di ricondurli alle loro **definizioni operative**. Sulla base di tale analisi è possibile dotare ciascun osservatore di un reticolo di orologi sincronizzati, mediante il quale egli può anche valutare distanze temporali di due eventi qualunque e misurare la lunghezza di un corpo in movimento.

I postulati della teoria non hanno ancora svolto alcun ruolo e gli unici vincoli considerati sono stati l'impossibilità di avere in natura un segnale che si propagasse a velocità infinita e l'isotropia della luce. Questi due vincoli sono comunque già sufficienti per mettere in evidenza che **tempi e lunghezze si intrecciano nelle loro definizioni: infatti, per misurare sia l'intervallo temporale tra due eventi separati nello spazio, sia la lunghezza di oggetti in movimento è necessario utilizzare contestualmente regoli e orologi**.

I concetti di spazio e tempo subiscono la loro più drastica modifica rispetto alla loro visione classica alla luce dei **postulati** della teoria: i postulati divengono infatti i nuovi vincoli che

² le trasformazioni che soppiantano le **trasformazioni galileiane di composizione della velocità** e le "formule" per calcolare intervalli temporali o spaziali. Ve le mostrerò e vi mostrerò "come funzionano" risparmiandovi però il ragionamento matematico che ad esse conduce.

permettono di confrontare leggi e risultati della fisica ottenuti in diversi sistemi di riferimento inerziali. La formulazione originale di tali postulati è:

1. Dati due sistemi di coordinate in moto relativo traslatorio parallelo e uniforme, le **leggi** secondo cui si modificano gli **stati di un sistema fisico** non dipendono dal fatto che questi cambiamenti vengano riferiti all'uno o all'altro dei due sistemi (generalizzazione del principio di relatività galileiana)

2. Dati due sistemi di coordinate in moto relativo traslatorio parallelo e uniforme, in ciascun sistema le **costanti fondamentali** devono restare uguali. In particolare ci interessa sottolineare come ogni raggio luminoso, non importa se emesso da un corpo in quiete o in movimento, risulti muoversi con la **velocità fissata** $c=299792458$ m/s. Perciò:

$$velocità = \frac{percorso - della - luce}{intervallo - di - tempo}$$

Dove però, attenzione, "**intervallo di tempo**" è da intendere nel senso della definizione data precedentemente...

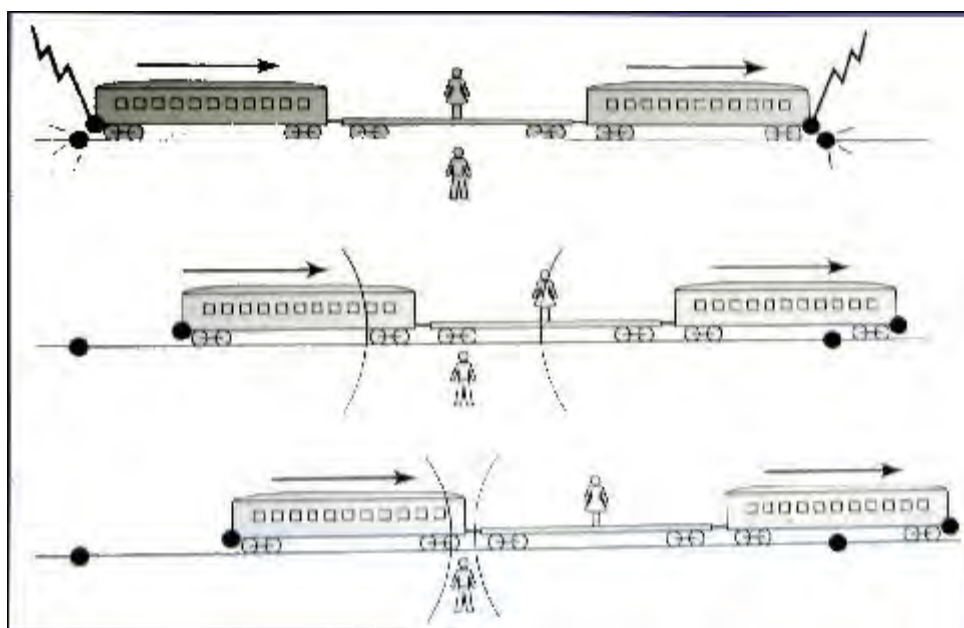
I postulati permettono di confrontare misure di intervalli temporali e intervalli spaziali effettuate in diversi sistemi di riferimento inerziali e di giungere alla conclusione che **tali misure non coincidono**. Come effetti spazio-temporali dei due postulati si ha infatti che:

- l'**intervallo di tempo** tra due eventi che in un particolare sistema di riferimento (inerziale) avvengono nella stessa posizione si **dilata** se misurato in un sistema di riferimento (inerziale) in moto relativo rispetto al primo;
- la **lunghezza** di un'asta rigida, misurata in un particolare sistema di riferimento (inerziale) in cui l'asta "è ferma", si **contrae** se misurata in un sistema di riferimento (inerziale) in moto relativo rispetto all'asta stessa.

Questi due punti possono invece essere messi ben in evidenza mediante l'utilizzo degli esperimenti mentali introdotti da Einstein stesso nei suoi scritti successivi, in particolare in "Relatività: esposizione divulgativa" del 1916.

Questa è la strada che percorreremo anche noi nel seguito anche perché ci permetterà di completare la posizione di Einstein circa il contributo fornito dalla relatività ristretta al dibattito sui concetti di spazio e tempo.

6.5 L'esperimento mentale del "treno di Einstein"



Einstein dimostra la relatività della simultaneità riferendosi ad un treno puoi pensare di collocarlo invece all'interno di una navicella spaziale, se ti piace di più! Anzi

quest'ambientazione ha il vantaggio che "impedisce" all'osservatore solidale con la navicella di fare riscontri con quanto avviene all'esterno!

Due fulmini colpiscono l'estremità anteriore e quella posteriore di un treno in movimento, lasciando delle bruciature sia sul treno stesso che sui binari (quindi i fulmini sono *solidali* con il sistema di riferimento dei binari). Ogni lampo emesso si propaga in tutte le direzioni.

Al centro un osservatore (una donna) che è fermo nel punto medio del treno (sul treno) decide che i due fulmini **non** erano simultanei. Le sue ragioni sono:

1. Sono equidistante rispetto ai segni di bruciatura che si trovano su testa e coda del treno
2. Nel mio riferimento la luce ha la solita velocità che è la stessa in entrambe le direzioni
3. Il lampo proveniente dalla testa del treno è arrivato prima, perciò
4. Il lampo dev'essere partito prima dalla testa del treno che non dalla coda: il fulmine è caduto sulla parte anteriore del treno prima che l'altro colpisse la parte posteriore

Ne concludo che i due fulmini non erano simultanei

In basso, un osservatore fermo vicino ai binari (giù dal treno) a metà strada fra i due segni di bruciatura che si trovano sui binari stessi decide che i fulmini erano simultanei, dal momento che i lampi emessi lo raggiungono nello stesso istante.

Dal punto di vista dell'osservatore a terra la donna viaggia verso il lampo che proviene dalla testa del treno e si allontana da quello che giunge nella coda, per questo viene raggiunta prima dal lampo proveniente dalla parte anteriore.

Ma la donna presenta valide argomentazioni quando sostiene i quattro punti precedentemente illustrati, infatti, i due fulmini viaggiando alla stessa velocità., visto che la velocità della luce non segue le leggi di composizione delle velocità classiche, il lampo che ha colpito la testa del treno deve percorrere una distanza minore (poiché il treno procede nel verso della testa del treno), mentre il lampo che ha colpito la coda del treno deve percorrere una distanza maggiore per raggiungerla. Quindi lei "vedrà" prima il lampo di testa e poi quello di coda.

N.B. se la velocità del fenomeno in esame non fosse la velocità della luce il problema non si porrebbe perché la legge di composizione classica delle velocità renderebbe simultanei entrambi i fenomeni. Pensa a due *segnali sonori* che partano da testa e coda del treno, (sempre *solidali* con il sistema di riferimento dei binari).

Poniamo che il treno viaggi ad una velocità V (stabiliamo come verso positivo per il moto, il verso sinistra-destra, come di consueto) e che sia lungo $2S$. Supponiamo che le origini dei due sistemi di riferimento, stazione e treno, coincidano nella coda del treno, e che nell'istante $t_0=0$ coincida l'inizio dell'osservazione del moto (stiamo pensando ad un moto ideale, ovviamente, che prenda il via "già alla velocità di regime" e che proceda con tale velocità costante: ignoriamo la fase di accelerazione iniziale che si verificherebbe nella realtà) e il momento in cui i lampi lasciano il loro segno.

Per l'uomo posto a metà dei binari i due segnali viaggiano alla stessa velocità in modulo ma con segno opposto: v (quello che parte dalla coda) e $-v$ (quello che parte dalla testa) e giungono a lui nello stesso tempo t , simultaneamente pertanto.

In tale tempo t i segnali percorrono ciascuno una distanza pari a metà del treno: $S = v \cdot t$

In tale tempo t ciascun punto del treno, nel sistema di riferimento della stazione, percorre una distanza $d = V \cdot t$. Per la donna il treno è fermo e i binari si muovono con velocità $-V$, perciò, nel tempo t , i binari percorrono una distanza d nel verso opposto a quello convenzionalmente scelto come positivo; indicheremo pertanto lo *spostamento dei binari rispetto al treno* con $-d$.

Abbiam detto che per la donna il treno è fermo e i binari si muovono con velocità $-V$. La velocità dei segnali nel sistema di riferimento del treno è data pertanto dalla **somma algebrica** (cioè con segno) fra la velocità relativa segnali/treno (perché i segnali sono

solidali con il sistema di riferimento dei binari), che corrisponde alla *velocità dei binari*, e quella che i segnali hanno nel sistema di riferimento dei binari.

Il segnale che è partito in corrispondenza della testa (all'istante $t_0=0$) viaggia ad una velocità $-(v+V)$ mentre quello che è partito in corrispondenza della coda (all'istante $t_0=0$) viaggia con velocità $v-V$. Pertanto, al suddetto tempo t , per la donna:

- il segnale "di testa" (cioè partito nella posizione $2S$) si trova nella *posizione* $s_2=2S-(V+v)\cdot t = 2S-V\cdot t-v\cdot t=2S-d-S=S-d$

- il segnale "di coda" si trova nella posizione $s_1=(v-V)\cdot t = S-d$

Cioè, come ti avevo preannunciato per entrambi i segnali, in entrambi i sistemi di riferimento percorrono stesse distanze in tempi uguali, quindi sono simultanei!

Cosa cambia fra i due esperimenti? Un fatto sorprendente, dimostrato sperimentalmente già ai tempi di Einstein: **la velocità della luce è invariante per trasformazioni di Galileo**. Cioè in qualunque sistema di riferimento inerziale la luce mantiene sempre la sua velocità: non si somma né si sottrae.

Cosa concludiamo per l'esperimento dei segnali luminosi? Per quanto possa sembrare strano non esiste una soluzione univoca: i due eventi sono simultanei per l'osservatore a terra e non simultanei per l'osservatore sul treno: la **simultaneità degli eventi è relativa!**