Conseguenze dell'esperimento di Michelson e Morley

L'esito negativo dell'esperimento di Michelson e Morley, confermato al di la di ogni dubbio nel 1887, condusse la fisica in una situazione assai complessa che si risolse solo con la formulazione della teoria della relatività ristretta nel 1905 da parte di A. Einstein.

Premesso che anche il risultato sperimentale più limpido sotto il profilo logico non è mai conclusivo, in quanto sempre passibile di diverse interpretazioni (è inevitabile nella scienza un ruolo 'attivo' e 'costruttivo' del pensiero), la verità di questa affermazione fu pienamente confermata dalla varietà di idee e proposte che seguirono l'esperimento.

Da un punto di vista strettamente di principio *l'esito negativo dell'esperimento mostrava che la rotazione dell'interferometro non produceva alcun spostamento delle frange di interferenza* per cui, ogni ipotesi capace di rendere conto di questo fatto, doveva essere presa in esame.

Notiamo subito che è possibile spiegare l'esito sia escludendo che ammettendo l'esistenza dell'etere.

Non esiste l'etere luminifero : allora, posto che l'elettromagnetismo sia giusto, il significato della velocità c non può che essere quello di rappresentare la velocità dell'onda elettromagnetica rispetto ad un qualunque osservatore inerziale, una strada che comporta, come vedremo, una radicale revisione dei concetti di spazio e tempo.

Esiste l'etere luminifero: si possono allora immaginare varie possibilità.

1) La terra nel suo moto orbitale *trascina l'etere* per cui il laboratorio e l'interferometro si trovano in realtà in quiete nell'etere e non in movimento come supposto per cui, pur esistendo l'etere, non si deve osservare lo spostamento delle frange (nonostante la sua plausibilità tale ipotesi fu poco sostenuta poiché non riusciva a spiegare il fenomeno dell'aberrazione stellare). Tale ipotesi preserva la concezione Galileiana dello spazio e del tempo.
2) L'etere esiste e non viene trascinato per cui la terra è davvero in moto rispetto ad esso, tuttavia *il braccio allineato con il moto nell'etere, a causa di tale moto, subisce una modifica della propria lunghezza* (una contrazione) tale da compensare esattamente lo spostamento delle frange atteso che quindi non si osserva.

   Si spiega l'esito dell'esperimento, ma si introduce comunque un nuovo effetto fisico, detto contrazione di Lorentz Fitzgerald, che oltre ad essere spiacevolmente 'ad-hoc', modifica la concezione galileiana dello spazio. Inoltre per spiegare il fenomeno dell'aberrazione stellare, Lorentz fu costretto anche ad intervenire in modo drastico sul concetto di tempo. *Lorentz in sostanza mostrò che dopo l'esperimento di Michelson e Morley il concetto di etere non era comunque più capace di salvare le concezioni di spazio e tempo della fisica classica.* Altri, non lui che difese ad oltranza questo concetto, ritennero che forse era giunto il momento di abbandonarlo.

La Teoria della Relatività Ristretta

A. Einstein, in un famoso lavoro pubblicato nel 1905 in una rivista specializzata tedesca (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper* , *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento, Zeitschrift für Physik*) prende la direzione che tutti gli esperimenti a seguire dimostreranno essere quella giusta.
Le ragioni che ispirarono la scelta sono state analizzate a fondo e da lui stesso spiegate in opere di carattere anche divulgativo.
E' interessante sapere che A. Einstein dichiarò che quando formulò la TRR non era al corrente dell'esperimento di Michelson e Morley per cui *ciò che lo spinse ad abbandonare il concetto di etere fu soprattutto la possibilità di recuperare la completa equivalenza di tutti gli osservatori inerziali anche nel caso dei fenomeni elettromagnetici.*
Questa possibilità era in accordo con l'intuizione che il principio di relatività Galileiano non fosse qualcosa di accidentale valido nel solo contesto meccanico ma espressione di un *principio generale della fisica valido per tutti i fenomeni naturali* e quindi anche per quelli elettromagnetici.
All'interpretazione del principio di relatività come principio universale della fisica unì la convinzione della assoluta correttezza delle equazioni di Maxwell. Avendo rinunciato al concetto di etere per recuperare il principio di relatività, questa convinzione lo portò ad ammettere che *la velocità c, che emergeva in modo naturale dalle equazioni di Maxwell, dovesse essere la velocità dell'onda elettromagnetica rispetto ad un qualunque osservatore inerziale.*
Il prezzo di tali assunzione fu, come vedremo, una *totale revisione dei concetti di spazio e tempo.* E' molto importante sottolineare che, al di la delle intuizioni profonde di A. Einstein, la TRR si è affermata per il semplice fatto che da quando fu formulata ha superato indenne una quantità innumerevole di prove dirette ed indirette e fino ad ora non è mai caduta in difetto.
Fatte queste premesse possiamo formulare i due principi o postulati, che A. Einstein assunse come veri, dai quali, in modo deduttivo, si ottengono tutte le conseguenze della TRR:

Primo postulato : *in tutti i riferimenti inerziali valgono le stesse leggi fisiche*

Secondo postulato: *in tutti i riferimenti inerziali la velocità della luce assume lo stesso valore*

La modifica delle Trasformazioni di Galileo

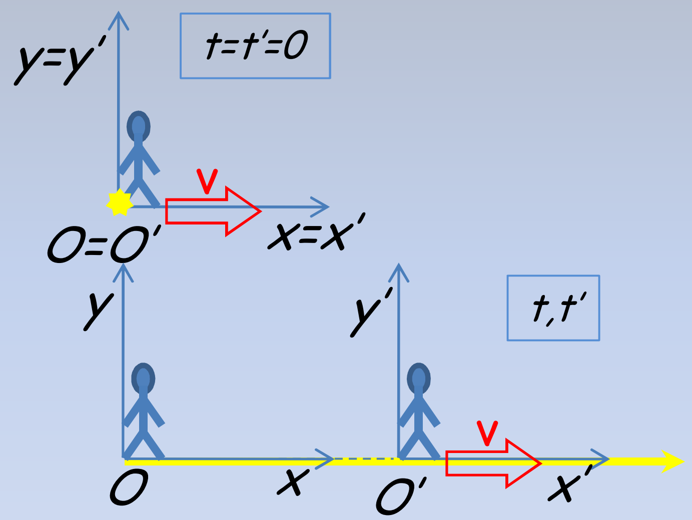
Mostreremo ora che *le trasformazioni di Galileo contraddicono il secondo postulato* per cui risulta necessario procedere ad una loro modifica.

Per evidenziare questo fatto consideriamo i due soliti riferimenti O ed O' ed immaginiamo che nel momento in cui le origini coincidono della origine del riferimento mobile O' venga emesso un raggio di luce nella direzione delle x' positive. La posizione in funzione del tempo del fronte del raggio per l'osservatore O' vale

$$x' = ct'$$

Richiamando le Trasformazioni di Galileo e sostituendo otteniamo

$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ t = t' \end{cases} \quad \begin{cases} x = ct' + vt' \\ t = t' \end{cases} \quad \begin{cases} x = ct + vt \\ - \end{cases} \quad \begin{cases} x = (c+v)t \\ - \end{cases}$$

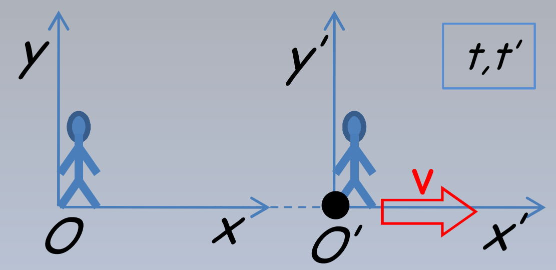


Il risultato mostra che l'osservatore O vede un raggio luminoso che si propaga nella direzione delle x positive con velocità *c'=(c+v)* *in completo disaccordo con il secondo principio che invece richiede che anche per l'osservatore O la velocità del raggio luminoso valga c!*

NOTA: Vale la pena sottolineare quanto il secondo principio sia in conflitto con il senso comune: dal punto di vista dell'osservatore O, il raggio luminoso ha seguito un percorso più lungo rispetto al riferimento O che rispetto al riferimento O'. Ciononostante il raggio si muove con la stessa velocità rispetto ad entrambi i riferimenti ! Ciò è possibile solo se sui ammette che i due osservatori misurino le durate degli stessi fenomeni in modo diverso.

Benchè necessarie, le modifiche delle Trasformazioni di Galileo *devono comunque preservare i seguenti requisiti fisici generali:*

i) *Un corpo materiale in quiete nel riferimento O' deve apparire in moto con velocità **v** all'osservatore O:*



$$\begin{cases} x' = 0 \\ x = vt \end{cases}$$

Evidentemente tale condizione può essere soddisfatta solo se la trasformazione di Galileo viene modificata nel modo seguente

$$x' = x - vt \quad \rightarrow \quad x' = \alpha(x - vt)$$

dove α *è una costante da determinare.*

Inoltre si deve anche avere che se *il corpo materiale è in quiete nel riferimento O esso deve apparire in moto con velocità **–v** all'osservatore O'*:

$$\begin{cases} x = 0 \\ x' = -vt' \end{cases}$$

Tale condizione può essere condizione soddisfatta solo se la trasformazione di Galileo viene modificata nel modo seguente

$$x = x' + vt' \quad \rightarrow \quad x = \alpha(x' + vt')$$

con *la stessa costante* α dato che i due osservatori sono equivalenti dal punto di vista della fisica. Questa proprietà vale non solo in questo caso ma in generale per cui:

ii) *dato che gli osservatori O ed O' sono equivalenti e differiscono solo nel segno che attribuiscono alla velocità del riferimento che vedono muoversi, dobbiamo richiedere che le nuove trasformazioni da O ad O' e da O' ad O differiscano al più nel solo segno della velocità.*

NOTA: è facile verificare che queste proprietà sono soddisfatte dalle trasformazioni di Galileo.

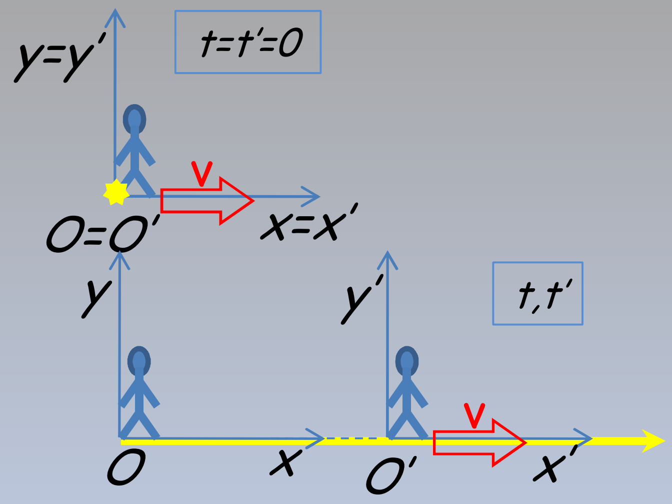
iii) Sia dato un raggio luminoso che nel momento in cui le origini coincidono viene emesso nella direzione delle *x* o *x'* positive. *In accordo con il secondo principio, la posizione del suo fronte e data dalla relazione*

$$x = ct$$

per l'osservatore O, e dalla relazione

$$x' = ct'$$

per l'osservatore O'.



Ragionando, per cominciare, sulla modifica delle trasformazioni dal riferimento O al riferimento O' sappiamo sulla base del punto i) che per le posizioni lungo l'asse x' si deve avere $x'=\alpha(x-vt)$.
Per quanto riguarda la variabile tempo t non potrà certo essere $t'=t$ altrimenti si ricade nella addizione galileiana delle velocità in contrasto con il secondo principio (vedi esempio iniziale). Per soddisfare questo principio *dobbiamo immaginare una trasformazione più complicata ma comunque sempre lineare* (altrimenti entra nelle formule il problema della origine dei tempi!). La trasformazione lineare più generale è del tipo $t'=at+bx$ che per simmetria con quella relativa alle posizioni prenderemo nella forma $t'=\beta(t+\gamma x)$. Avremo allora per le trasformazioni da O ad O'

$$1)\ \begin{cases} x' = \alpha(x - vt) \\ t' = \beta(t + \gamma x) \end{cases}$$

dalle quali è immediato ricavarsi anche le trasformazioni inverse da O' ad O

$$2)\ \begin{cases} x = \dfrac{1/\alpha}{1+\gamma v}\left(x' + \dfrac{\alpha}{\beta} v t'\right) \\ t = \dfrac{1/\beta}{1+\gamma v}\left(t' - \dfrac{\beta}{\alpha}\gamma x'\right) \end{cases}$$

Riscriviamo le formule

$$1)\begin{cases} x' = \alpha(x - vt) \\ t' = \beta(t + \gamma x) \end{cases} \qquad 2)\begin{cases} x = \dfrac{1/\alpha}{1+\gamma v}\left(x' + \dfrac{\alpha}{\beta} v t'\right) \\ t = \dfrac{1/\beta}{1+\gamma v}\left(t' - \dfrac{\beta}{\alpha}\gamma x'\right) \end{cases}$$

Dal requisito ii) otteniamo immediatamente che devono essere soddisfatte le condizioni

$$3)\left\{ \frac{\alpha}{\beta} = 1 \right. \qquad 4)\begin{cases} \alpha = \dfrac{1/\alpha}{1+\gamma v} \\ \beta = \dfrac{1/\beta}{1+\gamma v} \end{cases}$$

Dal requisito iii), sostituendo nelle 1) *x'=ct'* e *x=ct* otteniamo invece

$$5)\begin{cases} x' = \alpha(x - vt) \\ t' = \beta(t + \gamma x) \end{cases} \quad \begin{cases} ct' = \alpha(ct - vt) \\ t' = \beta(t + \gamma ct) \end{cases} \quad \begin{cases} ct' = \alpha(c - v)t \\ t' = \beta(1 + \gamma c)t \end{cases} \quad c = \frac{\alpha(c-v)}{\beta(1+\gamma c)}$$

Ora dalle 3) e dalle 4) otteniamo facilmente che $\beta = \alpha \quad \alpha = 1/\sqrt{1+\gamma v}$ mentre, tenendo conto che $\alpha=\beta$, dalla 5) si ottiene $\gamma = -v/c^2$. Riassumendo *abbiamo allora i seguenti valori dei parametri*

$$\alpha = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad \beta = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad \gamma = -v/c^2$$

i quali sostituiti nelle 1) e 2) forniscono le nuove trasformazioni di coordinate per le coordinate *x* e *t*.

$$6)\quad O \rightarrow O' \quad \begin{cases} x' = \dfrac{(x - vt)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ t' = \dfrac{(t - \frac{v}{c^2}x)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} \qquad 7)\quad O' \rightarrow O \quad \begin{cases} x = \dfrac{(x' + vt')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ t = \dfrac{(t' + \frac{v}{c^2}x')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

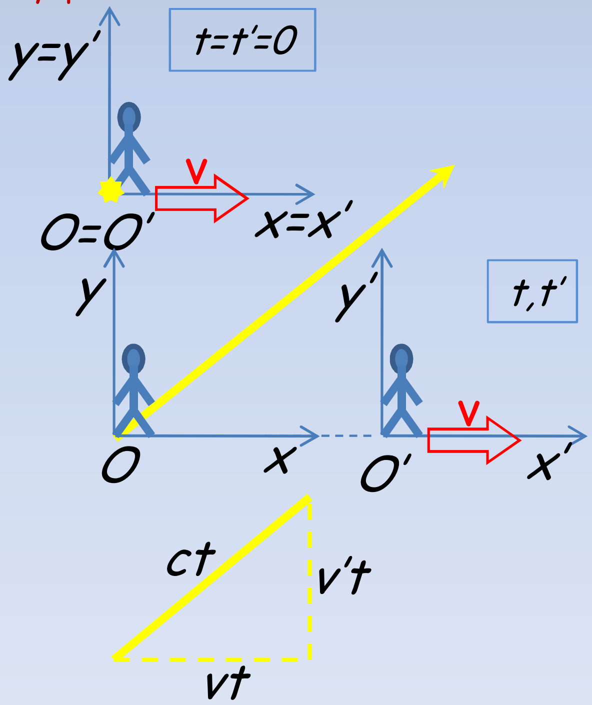
Ora dobbiamo affrontare il problema delle trasformazioni delle coordinate *y* e *z* che nel caso delle trasformazioni di Galileo sono fornite dalle semplici leggi *y'=y* e *z'=z*. Continueranno ad essere valide? Ragioniamo come segue.

Si immagini una variante dell'esempio esaminato all'inizio nel quale, il raggio luminoso (nell'istante in cui le origini coincidono), viene indirizzato, nel riferimento in moto O', lungo l'asse delle y' positive.

Mentre il raggio viaggia in direzione verticale verso l'alto per l'osservatore O' viaggia in diagonale per quello O. Dopo un certo intervallo di tempo la traiettoria percorsa nel riferimento O potrebbe essere quella tracciata nella figura.

La posizione del fronte nei due riferimenti è data dalle equazioni

$$8)\begin{cases} y' = ct' \\ x' = 0 \end{cases} \qquad 9)\begin{cases} y = v't \\ x = vt \end{cases}$$



Si noti che O vede un raggio luminoso che si propaga in direzione diagonale con una velocità che deve valere *c* (in accordo con il secondo principio) per cui si deve avere dal teorema di pitagora

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (v't)^2$$

$$v' = (c\sqrt{1 - v^2/c^2}\,)t$$

sostituendo nelle 9) otteniamo

$$10)\begin{cases} y' = ct' \\ x' = 0 \end{cases} \qquad 11)\begin{cases} y = (c\sqrt{1-v^2/c^2}\,)t \\ x = vt \end{cases}$$

Ora si deve richiamare la trasformazione del tempo data dalla seconda delle 6) e sostituirla nella prima delle 10). Si ottiene

$$12)\begin{cases} y' = c\dfrac{(t-\dfrac{v}{c^2}x)}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ x' = 0 \end{cases} \qquad 13)\begin{cases} y = (c\sqrt{1-v^2/c^2}\,)t \\ x = vt \end{cases}$$

sostituendo la seconda delle 13) nella prima delle 12) abbiamo poi

$$14)\begin{cases} y' = c\dfrac{(t-\dfrac{v}{c^2}vt)}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = (c\sqrt{1-v^2/c^2})t \\ x' = 0 \end{cases} \qquad 15)\begin{cases} y = (c\sqrt{1-v^2/c^2}\,)t \\ x = vt \end{cases}$$

Confrontando ora la prima delle 14) con la prima delle 15) possiamo verificare che y'=y. Dunque *le leggi di trasformazione delle coordinate perpendicolari alla direzione del moto (considerazioni analoghe conducono allo stesso risultato per la coordinata z) non necessitano di alcuna correzione* per cui

$$\boxed{16)\begin{cases} y' = y \\ z' = z \end{cases}}$$

possiamo ora richiamare l'insieme delle nuove trasformazioni delle coordinate riscrivendo le 6), 7) e 16).

Le nuove trasformazioni delle misure di posizione e tempo tra due osservatori inerziali :

le Trasformazioni di Lorentz

Nelle pagine precedenti abbiamo mostrato che i due principi posti a fondamento della TRR, certamente in conflitto con le trasformazioni di Galileo, hanno un forte valore costruttivo conducendo ad *un nuovo insieme di trasformazioni delle misure di posizione e tempo tra osservatori inerziali dette* ***Trasformazioni di Lorentz***

Se l'osservatore O misura un certo evento fisico nella posizione spaziale *(x,y,z)* e temporale *t* allora O' misurerà quello stesso evento nella posizione spaziale *(x',y',z')* e temporale *t'* secondo le formule qui a lato.

$$O \rightarrow O' \begin{cases} x' = \dfrac{(x - vt)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \dfrac{(t - \frac{v}{c^2}x)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} \qquad O' \rightarrow O \begin{cases} x = \dfrac{(x' + vt')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \dfrac{(t' + \frac{v}{c^2}x')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

NOTA: Queste trasformazioni furono trovate già nel 1887 da diversi fisici, G. Fitzgerald, J. Larmor, H. Lorentz e W. Voigt essenzialmente per spiegare l'esito nullo dell'esperimento di Michelson e Morley. Pare che J. Larmor avesse compreso l'effetto della dilatazione del tempo in esse nascosto e Lorentz la loro proprietà di lasciare invarianti le equazioni dell'elettromagnetismo, ma fu A. Einstein che per primo chiarì fino in fondo il loro vero significato fisico.

Le Trasformazioni di Galileo sono sempre sbagliate?

Premesso che le corrette trasformazioni delle misure di posizione e tempo sono quelle di Lorentz è comunque vero che in certi contesti fisici queste sono molto ben approssimate dalle trasformazioni di Galileo. Richiamando le trasformazioni di Lorentz è facile rendersi conto quando questo accade

$$O \to O' \begin{cases} x' = \dfrac{(x - vt)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \sim (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \dfrac{(t - \frac{v}{c^2}x)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \sim t \end{cases} \qquad O' \to O \begin{cases} x = \dfrac{(x' + vt')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \sim (x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \dfrac{(t' + \frac{v}{c^2}x')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = t' \end{cases}$$

Si osservi che nel caso in cui si possa trascurare il rapporto v^2/c^2 nelle radici quadrate e vx/c^2 nelle trasformazioni del tempo si ottengono esattamente le Trasformazioni di Galileo. Ora il termine v^2/c^2 è trascurabile quando la velocità di traslazione relativa dei due riferimenti è piccola rispetto alla velocità della luce. Per quanto riguarda il termine vx/c^2 si osservi che x rappresenta la posizione dell'evento fisico rispetto al riferimento O. Se l'evento è connesso ad un qualche moto di velocità v' lungo x avremo $x=v't$ per cui si ha $vx/c^2 = vv'/c^2$ che è trascurabile se anche questa velocità rispetto ad O è piccola rispetto alla velocità della luce. Dunque riassumendo ***le Trasformazioni di Galileo possono essere assunte valide quando la velocità di traslazione dei riferimenti e le velocità in gioco sono piccole confronto alla velocità della luce.***

NOTA: Un primo risultato della TRR è quindi quello di stabilire che in fisica i concetti di 'velocità grande' o 'velocità piccola' hanno un senso assoluto poiché ogni velocità deve essere riferita a quella della luce ovvero che *in fisica esiste una scala assoluta delle velocità.*

Effetti relativistici

Le trasformazioni di Lorentz sono profondamente diverse da quelle di Galileo. Esse comportano una così radicale modifica dei concetti di spazio, tempo e poi di tutte le grandezze dinamiche, che si suole dare il nome di *effetti relativistici* a tutti quei fenomeni che si differenziano in modo clamoroso da quello che succede nella fisica classica con le trasformazioni di Galileo. Certamente l'ambito classico è più vicino alla nostra intuizione ma questo è solo dovuto al fatto che la nostra esperienza matura in contesti caratterizzati da velocità piccole rispetto a quella della luce. *I cosiddetti effetti relativistici non sono effetti sono semplicemente la realtà che noi stessi sperimenteremmo qualora ci muovessimo con velocità rilevanti rispetto a c.*

Prima di iniziare la nostra analisi vogliamo porre le trasformazioni di Lorentz in una forma equivalente ma più utile per le considerazioni che seguiranno. Immaginiamo che l'osservatore O, ad esempio, misuri due eventi fisici nelle posizioni spaziali e temporali (x_1, y_1, z_1), t_1 e (x_2, y_2, z_2), t_2. L'osservatore O' li misurera allora nelle posizioni spaziali e temporali

$$x_1' = \frac{(x_1 - vt_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad y_1' = y_1 \quad z_1' = z_1 \quad t_1' = \frac{(t_1 - \frac{v}{c^2}x_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad x_2' = \frac{(x_2 - vt_2)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad y_2' = y_2 \quad z_2' = z_2 \quad t_2' = \frac{(t_2 - \frac{v}{c^2}x_2)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

E' allora evidente che possiamo sottrarre membro a membro le coordinate corrispondenti per ottenere (si ragioni in modo analogo con le trasformazioni da O' ad O) le **Trasformazioni di Lorentz degli intervalli spaziali e temporali**

$$O \rightarrow O' \quad \begin{cases} x_2' - x_1' = \dfrac{(x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ (y_2' - y_1') = (y_2 - y_1) \\ (z_2' - z_1') = (z_2 - z_1) \\ (t_2' - t_1') = \dfrac{(t_2 - t_1) - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} \qquad O' \rightarrow O \quad \begin{cases} x_2 - x_1 = \dfrac{(x_2' - x_1') + v(t_2' - t_1')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ (y_2 - y_1) = (y_2' - y_1') \\ (z_2 - z_1) = (z_2' - z_1') \\ (t_2 - t_1) = \dfrac{(t_2' - t_1') + \frac{v}{c^2}(x_2' - x_1')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

La trasformazione degli intervalli temporali

Esaminiamo la trasformazione degli intervalli temporali da O' ad O. Rispetto alla trasformazione di Galileo $(t_2 - t_1) = (t_2^{'} - t_1^{'})$ compaiono differenze essenziali nei punti indicati

$$1) \qquad (t_2 - t_1) = \frac{(t_2^{'} - t_1^{'}) + \frac{v}{c^2}(x_2^{'} - x_1^{'})}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

A

B

Quale è il significato fisico di queste differenze ?

Per saggiare il significato del ***termine B*** immaginiamo un raggio luminoso che, nel riferimento O', parte dal punto x1',y1' al tempo t1', si propaga in direzione verticale per un tratto h, incontra uno specchio che lo riflette fino a tornare nello stesso punto x1', y1' al tempo t2'. Gli eventi fisici '*partenza del raggio luminoso*' e '*ritorno del raggio luminoso*' hanno una separazione spaziale nulla (e quindi annullano il termine A)

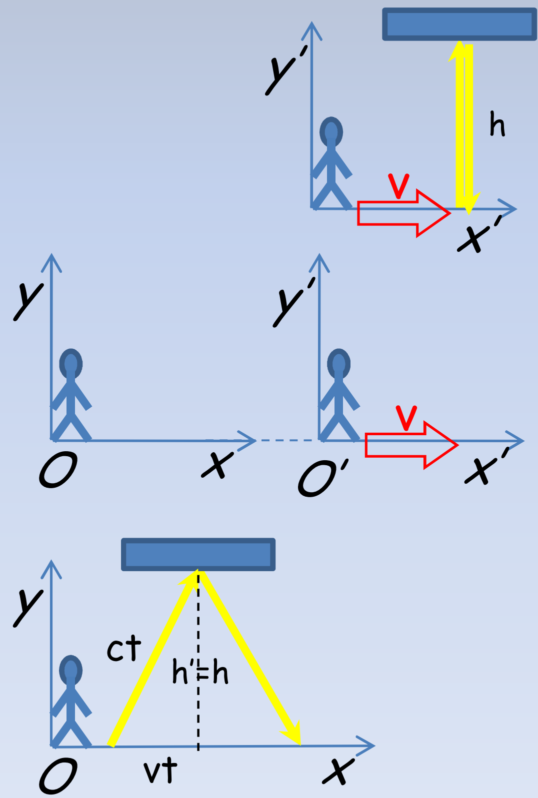
$$2) \qquad (x_2^{'} - x_1^{'}) = 0$$

mentre hanno una separazione temporale non nulla pari a

$$3) \qquad (t_2^{'} - t_1^{'}) = 2h/c$$

Quale separazione temporale misura invece O ? Sostituendo le 2) e 3) nella 1) otteniamo

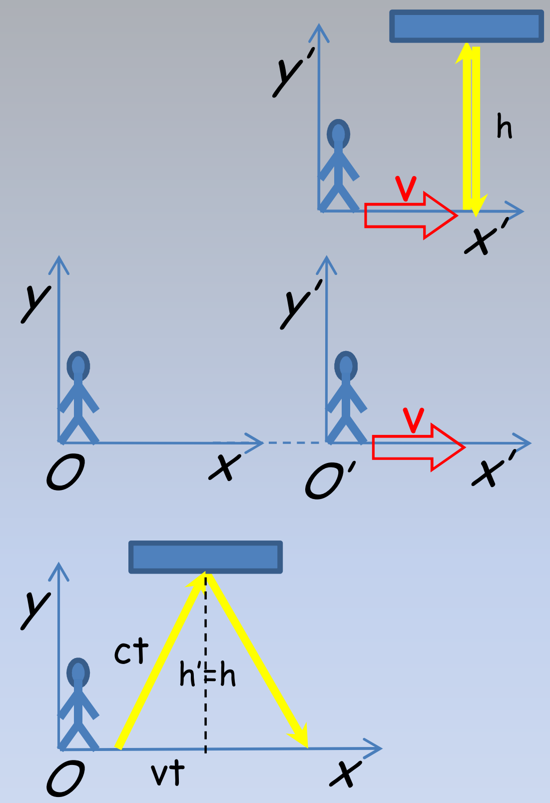
$$4) \qquad \boxed{(t_2 - t_1) = \frac{(t_2^{'} - t_1^{'})}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$



4) $$\boxed{(t_2 - t_1) = \frac{(t_2^{'} - t_1^{'})}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$

per cui concludiamo che ***due eventi che hanno una distanza temporale $\Delta t'$ per l'osservatore in quiete O' sono misurati con una distanza temporale Δt più lunga dall'osservatore in movimento O.***

Tale effetto, formalmente dovuto al termine B della 1), viene detto ***dilatazione degli intervalli temporali*** o ***dilatazione del tempo*** e mostra che ***secondo le trasformazioni di Lorentz ogni osservatore inerziale misura una propria durata degli eventi fisici***. Formulato in altri termini questo fatto significa che, diversamente da quanto accade con le trasformazioni di Galileo, ***la durata di un evento fisico è una grandezza relativa*** e non assoluta.



E' utile arrivare allo stesso risultato ragionando direttamente con i raggi luminosi !

L'osservatore O' osserva un raggio luminoso che compie un moto di andata e ritorno con velocità ***c*** lungo la verticale. Dato che lo spazio percorso vale *2h*, la durata del fenomeno vale

$$5) \qquad \Delta t' = 2h/c$$

Cosa vede invece l'osservatore O? Tenendo presente il principio della costanza della velocità della luce, da semplici considerazioni cinematiche si ottiene immediatamente la figura a lato. Il tempo ***t*** impiegato a raggiungere lo specchio soddisfa la relazione

$$ct = \sqrt{h^2 + (vt)^2}$$

e vale dunque

$$t = \frac{h/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

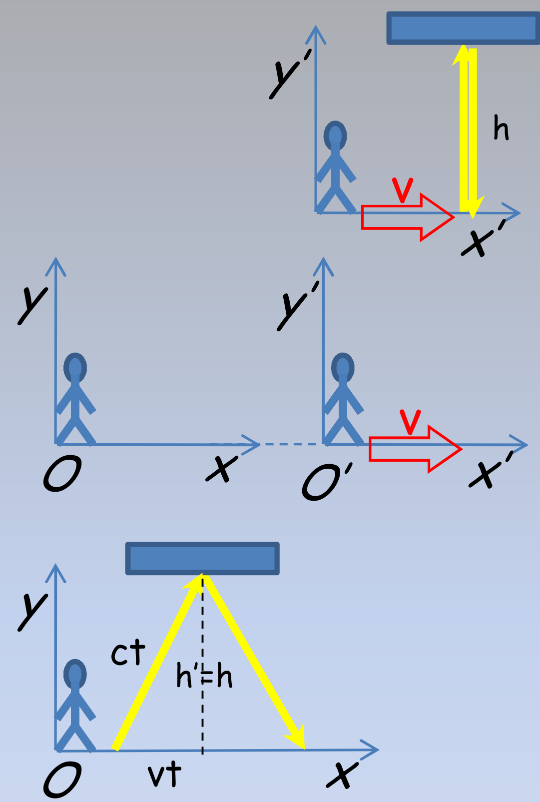
per cui il tempo di andata e ritorno, che è il doppio di tale tempo, vale

$$\Delta t = \frac{2h/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

se in tale espressione sostituiamo la 5) otteniamo [confronta con la 4)]

$$6) \qquad \boxed{\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}$$

la quale chiarisce che ***l'osservatore O misura un intervallo temporale più lungo di quello misurato da O' perché il raggio luminoso, che anche per lui si muove con velocità c, deve compiere un percorso più lungo*** .



Fine della lezione di Mercoledì 21 Aprile 2010