



Università della Terza Età "Cardinale
Giovanni Colombo" – Milano

A. A. 2022 - 2023
Corso di Astrofisica

Docente:
Adriano Gaspani

La Velocità della Luce

SUPERAMENTO DELLA FISICA CLASSICA

I concetti di **SPAZIO** e **TEMPO** assoluti furono oggetto di un lungo dibattito, fino a quando evidenze sperimentali determinarono il superamento della fisica classica come teoria capace di spiegare qualsiasi fenomeno naturale.

La Fisica Galileana e Newtoniana nonostante i brillanti successi raggiunti a cavallo tra 800/900 comincia a manifestare alcune criticità concettuali che, nell'avvio del nuovo secolo, trovano riscontro positivo in due nuove teorie molto avanzate: la Relatività Ristretta e la Meccanica Quantistica.

QUALI SONO QUESTI LIMITI

1. SPAZIO E TEMPO ASSOLUTI
2. DETERMINISMO
3. LE AZIONI A DISTANZA
4. LA QUESTIONE DELLA LUCE
5. LA VELOCITA' DELLA LUCE
6. ETERE SI ETERE NO



LIMITI DELLA FISICA CLASSICA: SPAZIO E TEMPO ASSOLUTI

Nella meccanica classica SPAZIO e TEMPO sono considerati ASSOLUTI. I fenomeni meccanici, velocità, accelerazione, azione a distanza tra i corpi (gravità) si manifestano nell'ambito di questi due enti assoluti. Più in dettaglio:

❖ Lo SPAZIO è ISOTROPO. Questo significa che non esistono direzioni privilegiate (isotropia dello spazio) o punti privilegiati nello spazio (omogeneità dello spazio). Tutti i punti dello spazio vuoto sono equivalenti. Un grande contenitore di raggio infinito dove è valida la geometria Euclidea

❖ Il TEMPO è UNIFORME, scorre uniformemente indipendentemente dai fenomeni e dalle loro osservazioni in qualunque sistema di riferimento. È come immaginare che tutti i punti dello spazio siano associati a degli orologi **SINCRONIZZATI** che segnano tutti lo stesso tempo. Noi, infatti, siamo portati naturalmente ad assumere che il tempo sia qualcosa di assoluto uguale per tutti e indipendente dal riferimento in cui esso viene misurato.

Nel suo famoso articolo del 1905. Einstein propose un punto di vista del tutto rivoluzionario. Partendo da un numero estremamente limitato di Postulati egli riuscì a formulare una nuova Meccanica, detta

Teoria della Relatività Ristretta,

in grado di spiegare compiutamente tutte le osservazioni sperimentali sul Spazio e Tempo non più entità assolute ma RELATIVE

Tralasciando le teorie antecedenti, nel XVII due scuole di pensiero predominanti:

Teoria corpuscolare (Newton 1642-1727):

"Possiamo immaginarla[la luce] come una moltitudine di corpuscoli incredibilmente piccoli e veloci, di diverse dimensioni che si sprigionano dai corpi luminosi a grande distanza l'uno dall'altro, ma tuttavia senza un sensibile intervallo di tempo, e vengono continuamente proiettati in avanti da un principio di movimento che all'inizio li accelera". (reazione di Newton alla Royal Society, 1675)

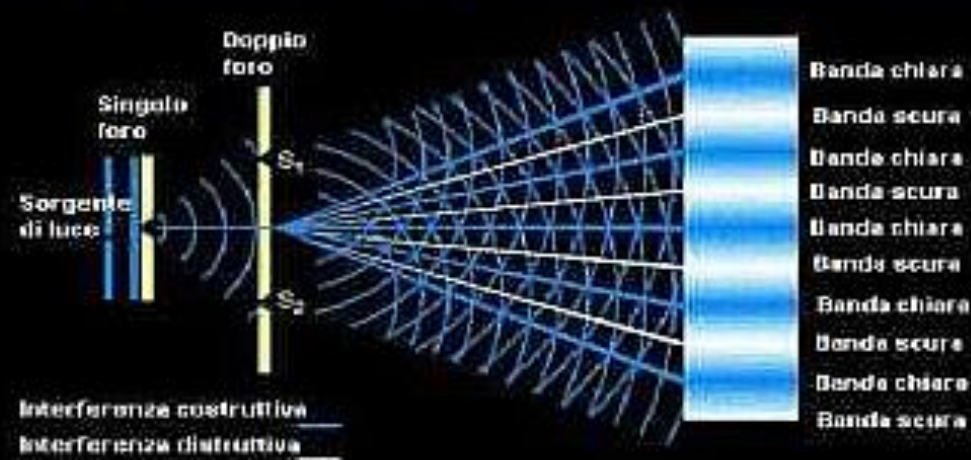


Teoria ondulatoria (Huygens 1596-1648):

“...se oltre ciò, il passaggio della luce richiede tempo, il che non tarderemo a vedere, ne conseguirà che questo movimento impresso alla materia interposta sarà progressivo e pertanto si propagherà come fa il suono per superfici sferiche e per onde; le chiamo onde per la loro somiglianza con quelle che vediamo formarsi nell'acqua allorchè vi si getta un sasso[..]”. (C.Huygens, “trattato sulla luce”, 1690)

LIMITI DELLA FISICA CLASSICA: LA QUESTIONE DELLA LUCE

Il dibattito sulla natura ondulatoria o corpuscolare continua per lungo tempo. All'inizio del 1800, grazie al contributo di **Thomas Young**, realizza un esperimento che gli consente di osservare un fenomeno di interferenza con la luce (tipicamente ondulatorio)



Nonostante questi successi della teoria ondulatoria sorgono molte domande cui bisognava dare una risposta. In particolare:

- ❖ Se la luce è di tipo ondulatorio, di che onda si tratta ?
- ❖ Con quale velocità si muove ?
- ❖ Poiché la luce arriva dallo spazio, quale mezzo utilizza per propagarsi ?
- ❖

LIMITI DELLA FISICA CLASSICA: LA QUESTIONE DELLA LUCE

A molte di queste domande risponde la Fisica dell'800, soprattutto per opera di Maxwell. Le risposte più persuasive furono:

- ❖ La luce è un'ONDA ELETTROMAGNETICA cioè un ente immateriale ma dotato di energia che, una volta creato, si mantiene nel tempo dimenticando le cause che lo hanno generato, propagandosi nello spazio a velocità finita, quella della luce, sotto forma di onda.
- ❖ Le onde elettromagnetiche si muovono nello spazio alla velocità della luce, cioè 300.000 Km/sec.
- ❖ Per far rientrare la *luce e tutte le onde elettromagnetiche nella più generale classe delle onde meccaniche viene ipotizzata l'esistenza di un mezzo, l'etere*, come supporto materiale per la loro propagazione, esattamente come avviene per il suono attraverso l'aria.

The Electromagnetic Spectrum

$k_B T_R$ -The thermal energy at room temperature



LIMITI DELLA FISICA CLASSICA: LA VELOCITA' DELLA LUCE

Nella fisica relativistica la Luce e la sua velocità hanno un ruolo determinante nella formulazione della teoria di Einstein. Lo scienziato, facendo delle riflessioni molto acute sul significato di accadimento di un evento nello spazio e nel tempo, giunse a formulare una teoria che scombussolò profondamente l'apparato della fisica classica.

Naturalmente, non tutto può essere legato allo straordinario talento di Einstein. Lo sviluppo singolare della fisica di fine ottocento, in modo particolare lo sviluppo dell'elettromagnetismo per opera di Maxwell, e tutti i contributi precedenti, hanno concorso a fertilizzare il terreno scientifico coltivato da Einstein.

VEDIAMO LE PRINCIPALI TAPPE

1) Velocità della luce

Nell'antichità era opinione comune che la luce avesse velocità infinita: Erone, nel IV secolo a.C., argomenta che "quando apriamo gli occhi e guardiamo il cielo, non è necessario alcun intervallo di tempo perché i raggi visuali lo raggiungano, così come vediamo immediatamente le stelle, che, come è noto, sono a distanza infinita dalla Terra".

Il Primo passo avanti è dovuto attendere Galileo, che per primo, intorno al 1600, tentò di misurare la velocità della luce.



Il metodo era approntato sul ritardo di tempo misurato tra due osservatori posti a una certa distanza con due lampade che si accendono in sequenza. L'esperimento non portò a nessun risultato



Ole Rømer (1644 – 1710)

Astronomo danese. A lui si deve la prima misura quantitativa della velocità della luce nel 1676

Ole Rømer nel 1676 intuì di dover ricorrere alle enormi distanze **s** tra i corpi celesti nello spazio (in tal modo **t** poteva essere misurato con facilità)

Il metodo consiste in osservazioni astronomiche attraverso cui studiare le eclissi dei satelliti di Giove, cioè il fenomeno per cui periodicamente il satellite scompare dall'osservazione terrestre, nascosto dal cono d'ombra di Giove.

La velocità della luce è finita

$$C = 300.000 \text{ Km / Sec}$$



2) La questione dell'Etere

Con la teoria del campo elettromagnetico di Maxwell , la luce rientrava tra le OEM che si propagano nello spazio alla velocità C . I primi tentativi dei fisici furono improntati a fare rientrare questi nuovi fenomeni all'interno di una visione meccanicistica della realtà. Per far rientrare la *luce e tutte le onde elettromagnetiche nella più generale classe delle onde meccaniche venne ipotizzata l'esistenza di un mezzo, l'etere, come supporto materiale per la loro propagazione, esattamente come avviene per il suono attraverso l'aria.*

Si sviluppo una grande discussione su questa fantomatica sostanza, sulle sue proprietà. Discussione che parte da molto lontano. I greci ritenevano che il VUOTO non esiste e quindi lo spazio intercorrente tra i corpi doveva essere occupato da questa quintaessenza: ETERE

Le discussioni e gli esperimenti fatti indussero a porsi delle domande:

Ma esiste realmente l'etere cosmico?

E se esiste non potrebbe essere pensato come quel sistema di riferimento assoluto, ipotizzato da Newton(1642-1727), rispetto al quale valutare il moto assoluto dei corpi?

Vale ancora il principio di composizione delle velocità galileiano quando si ha a che fare con la velocità di propagazione della luce?

LIMITI DELLA FISICA CLASSICA: ETERE SI ETERE NO

L'esperimento di Michelson – Morley

Alle domande precedenti una risposta efficace e memorabile fu data alla fine del secolo scorso da due fisici americani Michelson (1852-1931) e Morley (1838-1923)

In particolare, con il loro esperimento, Michelson e Morley tentarono di verificare se la Terra avesse una sua velocità rispetto all'etere, pensato come riferimento assoluto.

Per verificare la bontà o meno dell'ipotesi di un moto assoluto della Terra rispetto all'etere, Michelson e Morley si servirono di uno strumento, denominato interferometro, di cui riportiamo lo schema assieme al ragionamento di supporto.

Il risultati dell'esperimento furono un clamoroso FALLIMENTO che presto si tramutò in un grande contributo per lo sviluppo della fisica relativistica.

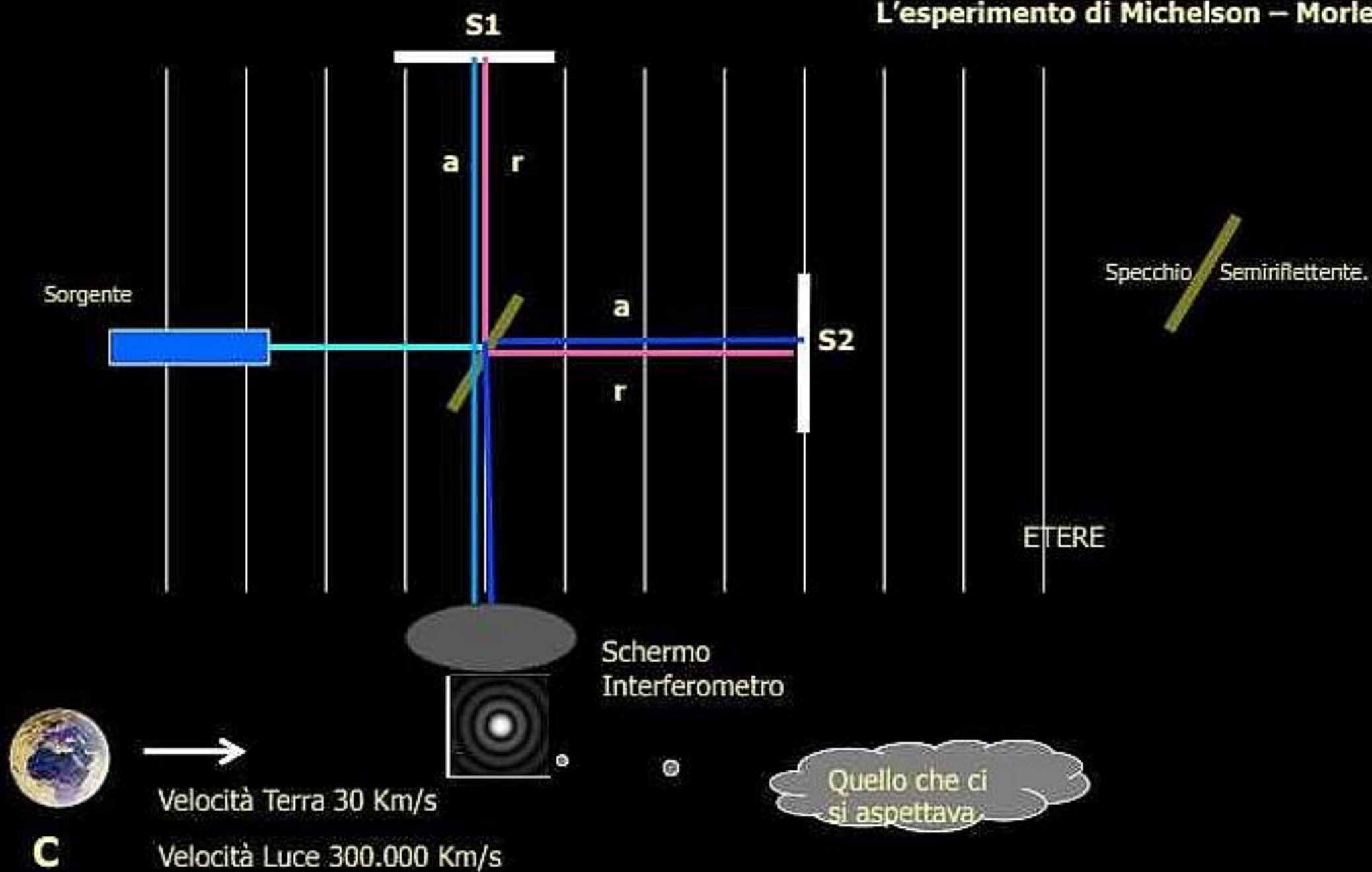
Occorre ricordare che, negli anni successivi al celebre esperimento, molti altri, con mezzi più raffinati e con tecnologie più avanzate, tentarono l'esperimento, con risultati sempre fallimentari ma di successo.



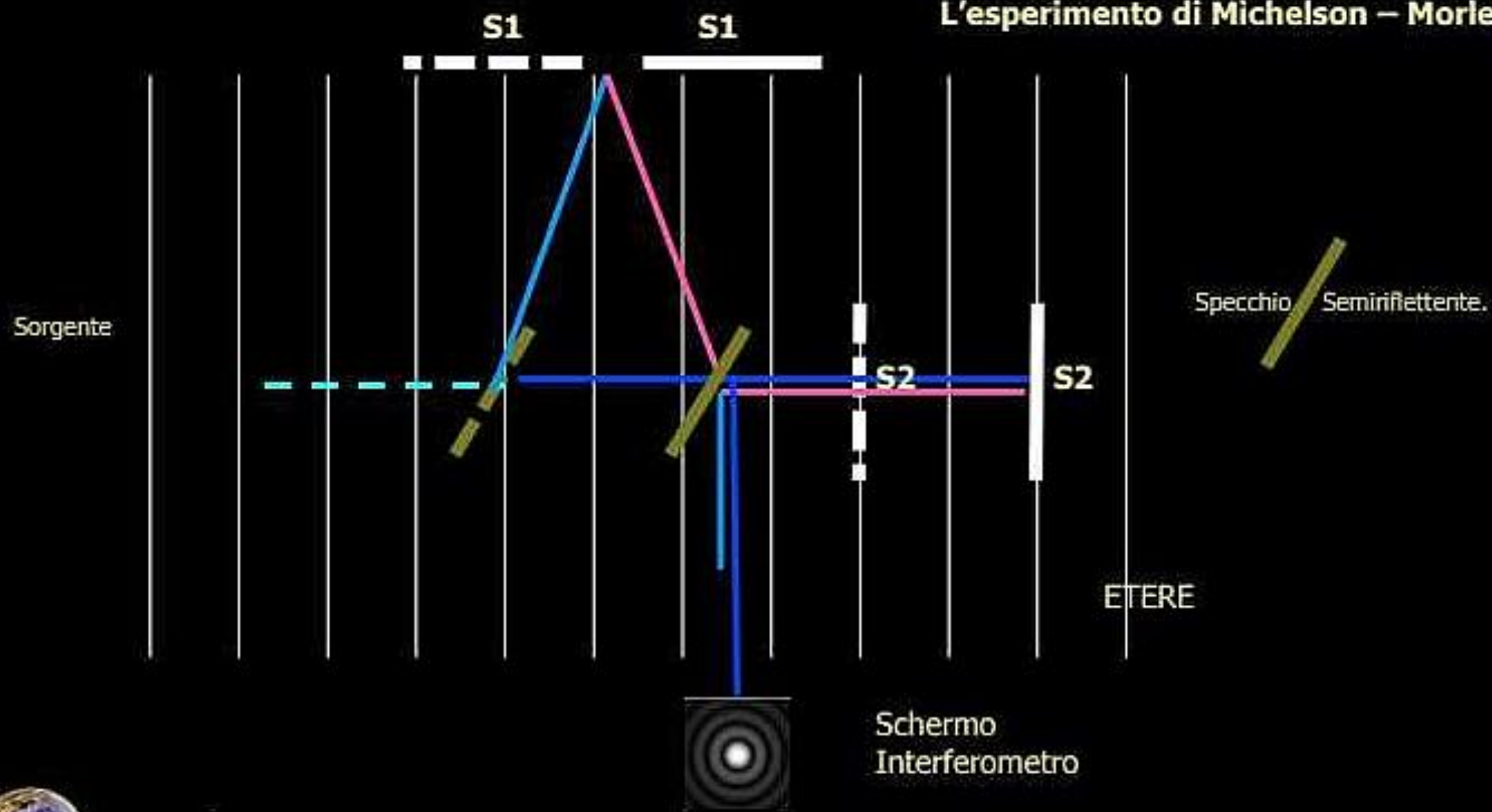
A. A. Michelson
1852 - 1931

E. W. Morley
1838 - 1923

L'esperimento di Michelson – Morley



L'esperimento di Michelson – Morley

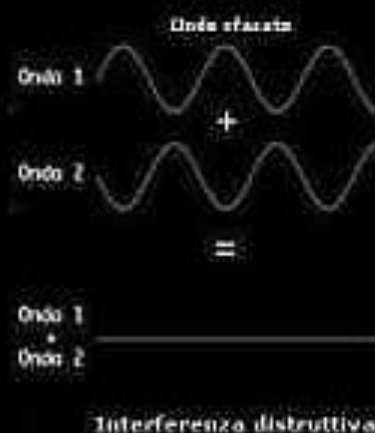
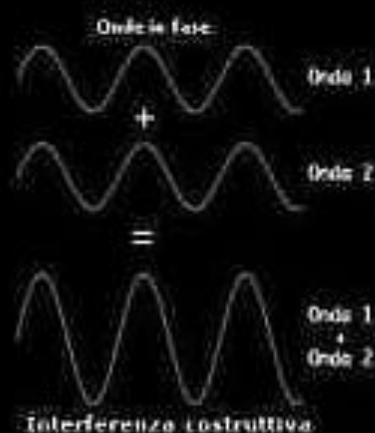


Velocità Terra 30 Km/s

C

Velocità Luce 300.000 Km/s

Quello che i due fisici si aspettavano dall'esperimento era la comparsa di **righe di interferenza al cannocchiale dove si trova l'osservatore**.



Questo effetto non viene osservato nè da Michelson, nè da altri sperimentatori: è come se la Terra trascinasse l'etere nel suo movimento o in alternativa come se il suo moto non avesse alcuna influenza sulla velocità della luce.

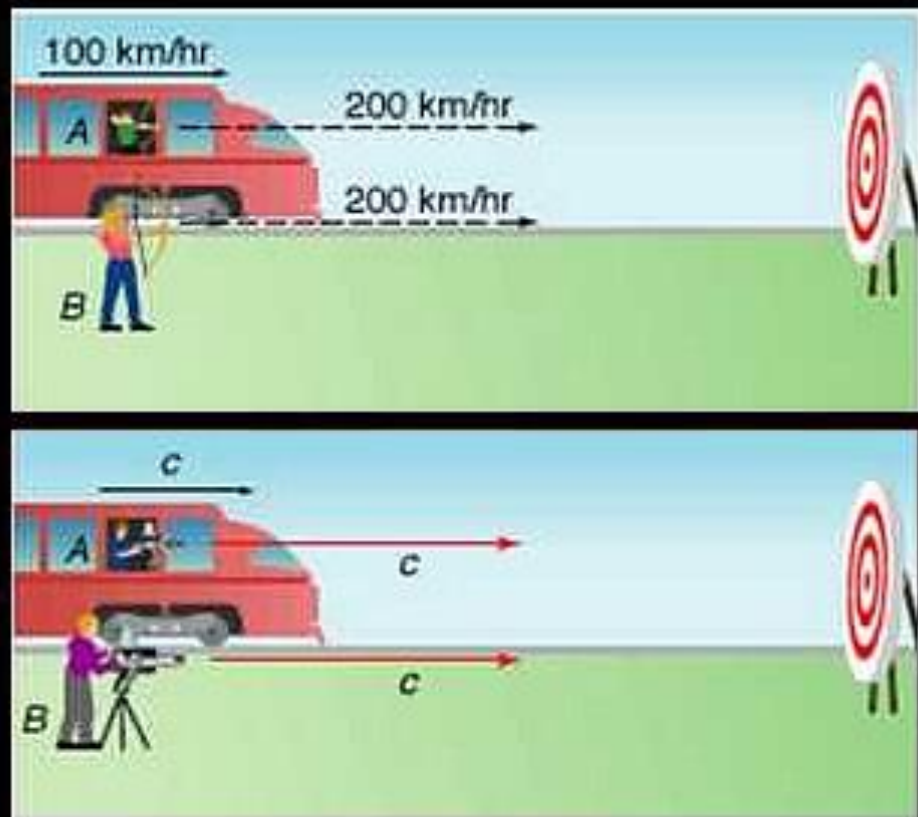
Nell'arco di un ventennio l'esperimento viene più volte ripetuto sempre con risultati negativi, anche facendo ruotare l'interferometro di 90° in modo da ottenere eventuali righe di interferenza scambiate con le precedenti.

Le naturali conseguenze dell'esperimento di Michelson e Morley sono:

- a) la velocità della luce è indipendente dalla velocità della sorgente e non si compone secondo il principio galileiano delle velocità ;
- b) la costanza della velocità della luce :
- c) l'impossibilità di provare l'esistenza del moto assoluto della Terra rispetto all'etere.

Dunque, **L'ETERE NON ESISTE**

Un esempio per comprendere l'indipendenza della velocità della luce rispetto alla sorgente.



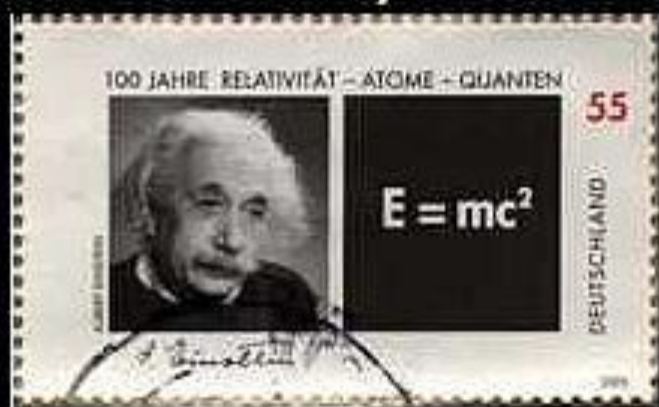
Una freccia lanciata da un treno in corsa e da una postazione fissa raggiungerà il bersaglio a differente velocità; in questo caso 300 e 200 Km/h, rispettivamente.

Questa ovvia regola di addizione delle velocità non la si applica alle onde elettromagnetiche. I fasci di luce emessi da due laser, uno sul treno e l'altro a terra raggiungeranno il bersaglio con la stessa velocità c . La radiazione elettromagnetica ha velocità costante e indipendente dalla velocità della sorgente da cui è stata emessa.

LA RELATIVITA' RISTRETTA

I risultati dell'esperimento impongono la revisione di un quadro teorico che sembrava assolutamente definito e inattaccabile, l'unità del pensiero fisico classico deve cedere il passo ad una serie di considerazioni del tutto nuove e rivoluzionarie.

L'artefice di questa rivoluzione è **A. Einstein (1879-1955)** che nell'anno *del 1905*, pubblica sulla rivista scientifica *Annalen der Physik* tre articoli di portata storica tra cui quello relativo alla *relatività ristretta (Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento)*.



Postulati della relatività ristretta

Einstein fonda la sua teoria sui seguenti assunti

- a) **invarianza delle leggi della fisica (leggi di Newton e Maxwell) rispetto ad osservatori inerziali, cioè in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro.**

- b) **invarianza, nel vuoto, della velocità della luce rispetto a qualunque osservatore.**

RELATIVITA' RISTRETTA: SPAZIO E TEMPO NON PIU' ASSOLUTI

EVENTI SIMULTANEI

È bene precisare che quando si parla di Osservatore occorre sempre immaginare un osservatore rispetto a un sistema di riferimento. A tal riguardo è interessante l'osservazione di due eventi simultanei osservati da due sistemi di riferimento in moto relativo uniforme uno rispetto all'altro. Esempio la Stazione e un treno che procede a velocità V costante.

Inizialmente immaginiamo un osservatore O fermo posto al centro tra i punti A e B dove sono poste due lampadine che si accendono contemporaneamente. Per l'osservatore O , dovendo la luce percorrere lo stesso intervallo, il segnale di accensione è simultaneo.

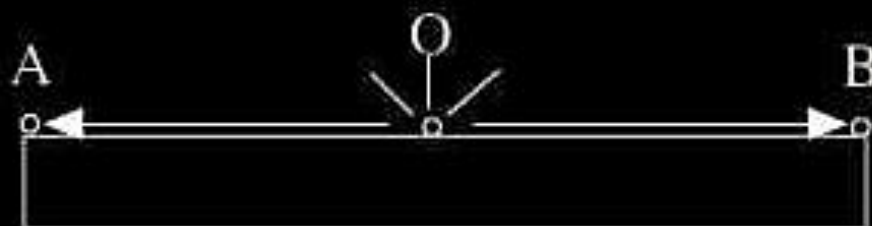


Figura 1

Ma cosa succede se il fenomeno lo eseguiamo su un treno che si muove a velocità V rispetto a un altro osservatore posto lungo la banchina della stazione?

LA RELATIVITA' RISTRETTA: SPAZIO E TEMPO NON PIU' ASSOLUTI

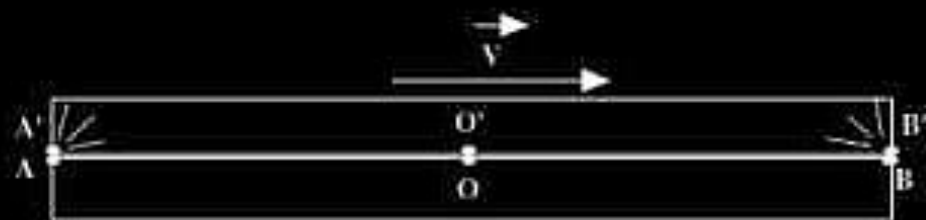


Figura 2a



Figura 2b

- ❖ Per l'osservatore O' posto sul treno le due lampadine si accendono contemporaneamente;
- ❖ Per l'osservatore O si accende prima A e poi la lampadina B ;
- ❖ La luce ha velocità pari a 300.000 Km/sec che si aggiunge alla velocità V del treno.

QUINDI: Due eventi simultanei in un riferimento non è detto che siano simultanei in un altro sistema di riferimento. Con riferimenti Inerziali, uno un moto relativo rispetto a un altro

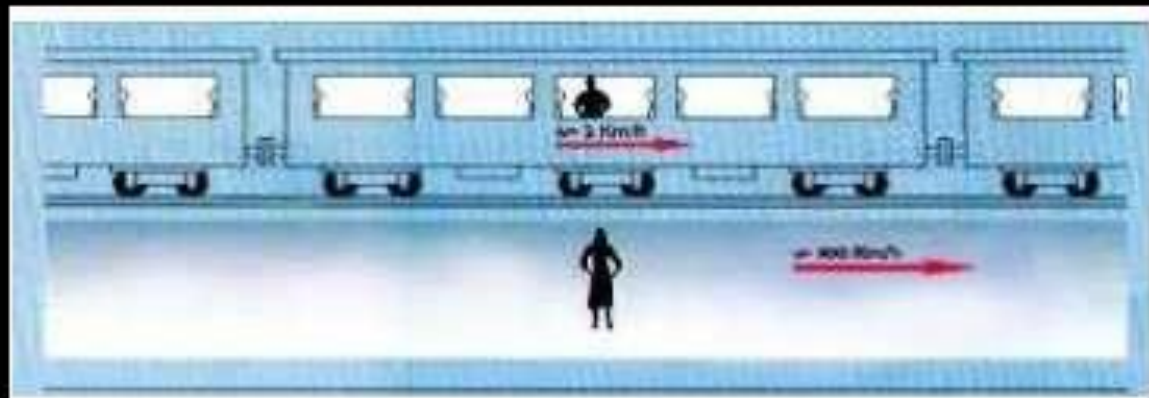
LA RELATIVITA' RISTRETTA: DILATAZIONE DEI TEMPI

Dagli esperimenti e dalle conclusioni elaborate da EINSTEIN, abbiamo capito che:

LA VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTRROMAGNETICHE (LUCE COMPRESA) E' INVARIANTE RISPETTO A QUALUNQUE CAMBIAMENTO DI SISTEMA DI RIFERIMENTO INERZIALE.

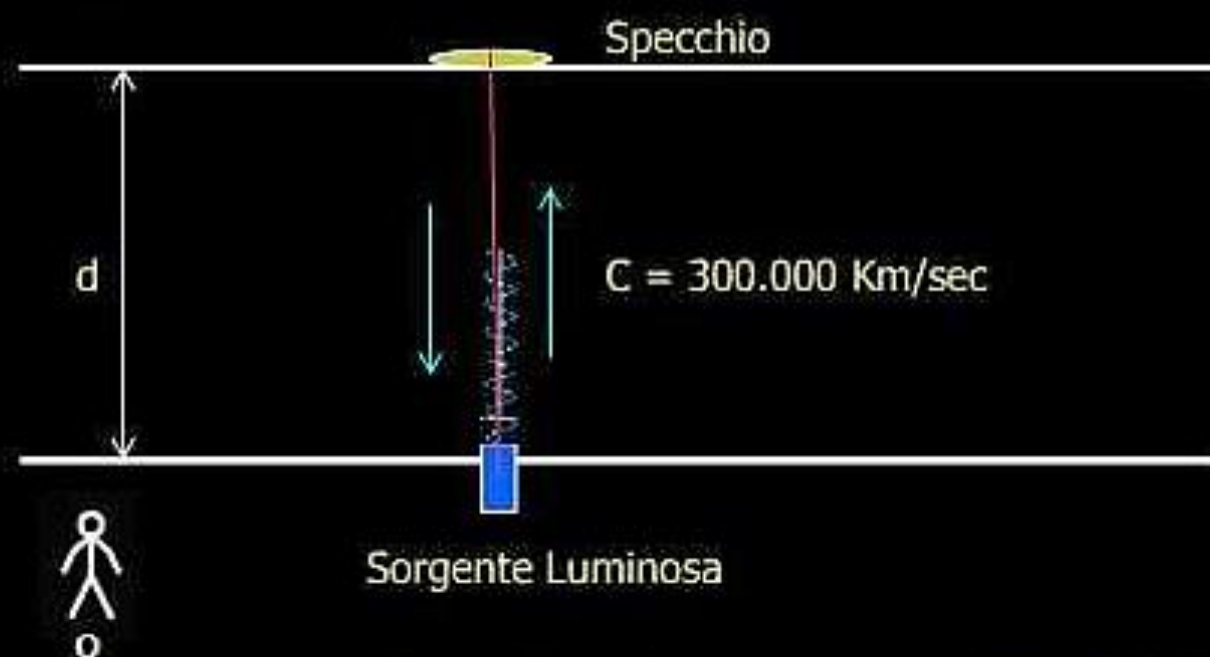
Tra le conseguenze più interessanti osserviamo che tra due sistemi di riferimento, uno in quiete e l'altro in moto rettilineo uniforme (velocità Costante), per l'osservatore in quiete, i tempi dell'altro sistema si allungano e le lunghezze si accorciano.

Questo significa che non ha più senso parlare di TEMPO ASSOLUTO e di SPAZIO ASSOLUTO, i tempi e le lunghezze coinvolti in un fenomeno fisico possono essere diversi per due osservatori che sono in moto relativo uno rispetto all'altro.



LA RELATIVITA' RISTRETTA: DILATAZIONE DEI TEMPI

Immaginiamo questa situazione in laboratorio , dove c'è un Osservatore O fermo rispetto al bancone dove si sta svolgendo il fenomeno.

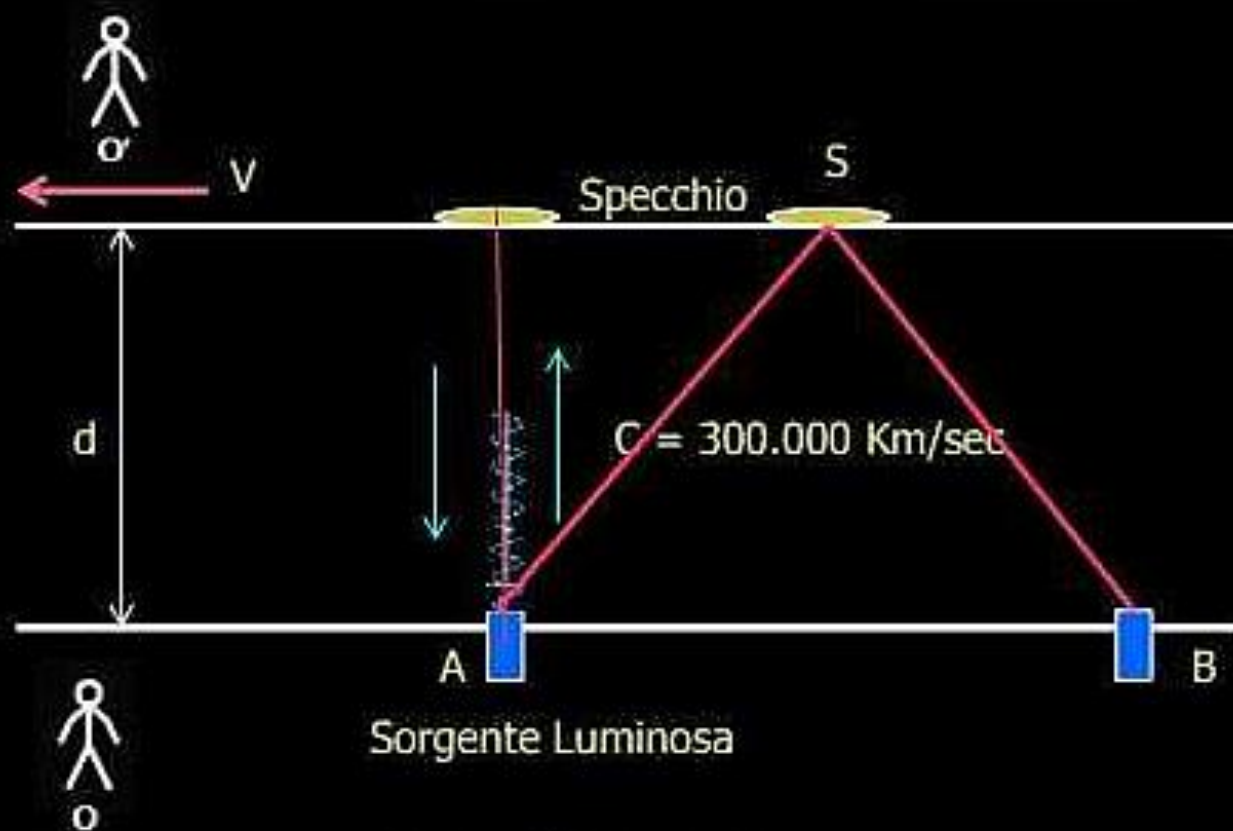


L'intervallo di tempo osservato per il segnale luminoso di andata e ritorno dall'Osservatore O fermo rispetto al bancone di prova è

$$Dt = 2d / C$$

Lo stesso fenomeno come lo vedrebbe un osservatore O' che si muove a velocità V rispetto ad O

LA RELATIVITA' RISTRETTA: DILATAZIONE DEI TEMPI



$$Dt' = (AS + SB) / C$$

$$Dt = 2d / C$$

Dunque $Dt' > Dt$

Notare che C , velocità della luce è la stessa per i due osservatori.

Questa relazione $Dt' > Dt$

Se la sviluppiamo con semplici calcoli geometrici e algebrici , dove coinvolgiamo la velocità V relativa tra i due osservatori e la velocità C della luce si ottiene:

$$Dt' = \frac{Dt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

È difficile accettare questo risultato, cioè che il tempo scorre diversamente per i due osservatori. In ogni caso occorre precisare che per le velocità nostre , anche del supersonico più veloci, il valore della radice quadrata tende a 1, pertanto Dt' è quasi uguale a Dt .

GLI EFFETTI RELATIVISTICI SI OSSERVANO QUANDO LA VELOCITA' V tende a diventare paragonabile alla velocità della luce

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t \quad . \quad \text{il termine } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ è detto } \textbf{fattore relativistico}.$$

Dalla relazione si evince che per basse velocità il termine frazionario a denominatore risulta trascurabile rispetto ad 1, in tal caso si ha $\Delta t' \approx \Delta t$ in accordo con ciò che classicamente ci aspettiamo.

Visto che $\gamma > 1$ $\Delta t' > \Delta t$, si potrebbe pensare che il tempo per un osservatore in moto scorra più lentamente rispetto ad un osservatore fermo.

In effetti molte volte si sente dire :

“ per l'osservatore in movimento il tempo scorre più lentamente ”

Questa affermazione non è corretta,

se O' è fermo ed A è in moto allora $\Delta t' = \gamma \Delta t$, ma d'altra parte dal punto di vista di O è O' che si muove per cui $\Delta t = \gamma \Delta t'$, entrambi gli osservatori hanno ragione nell'affermare che nell'altro sistema di riferimento il tempo scorre più lentamente, tuttavia se l'intervallo di tempo è riferito a due eventi allora tutti gli osservatori sono d'accordo nel dire che l'osservatore che vede gli eventi avvenire nello stesso luogo misura anche il tempo minore. Ovvero,

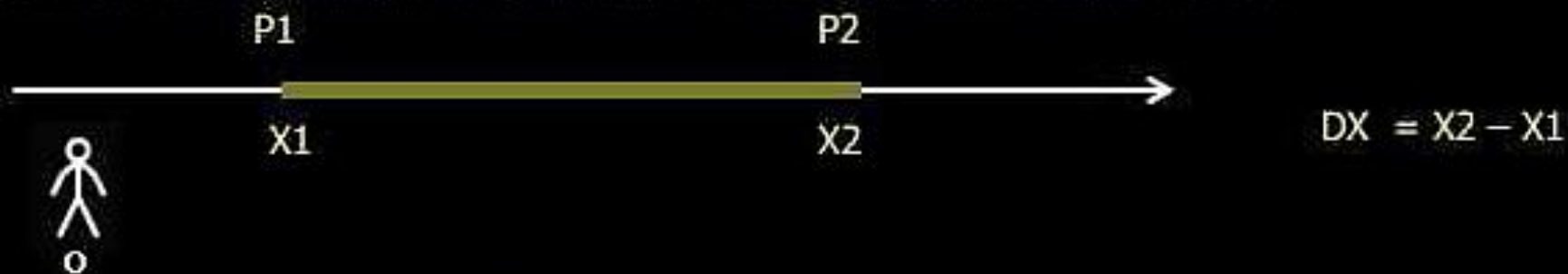
il tempo tra due eventi è minore per l'osservatore che vede gli eventi avvenire nello stesso luogo

In effetti l'osservatore O vede gli eventi “partenza della luce”, “ arrivo della luce” avvenire nello stesso luogo (sulla torcia elettrica), mentre l'osservatore O' vede i due eventi avvenire in luoghi diversi. Il tempo minore è detto **tempo proprio**

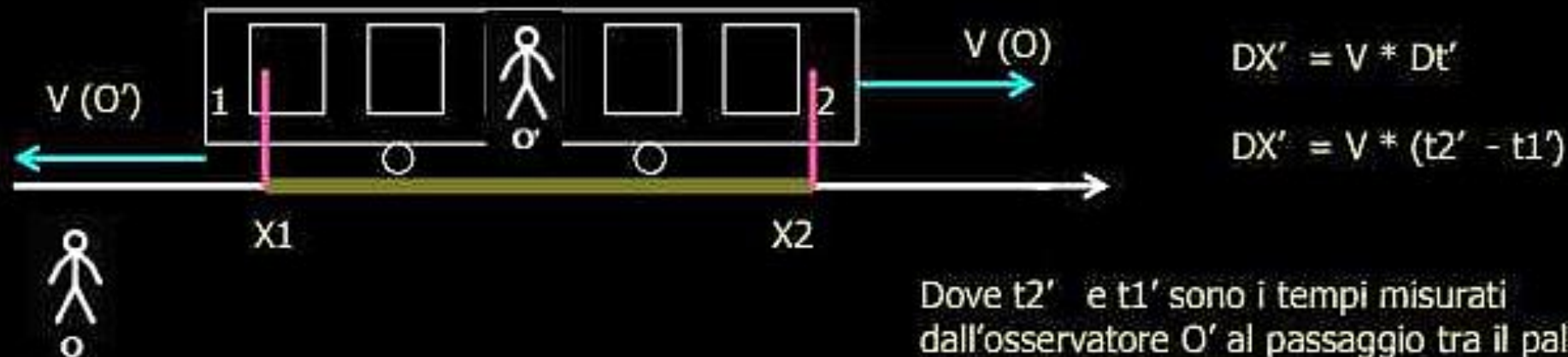
LA RELATIVITA' RISTRETTA: CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

(Può essere Saltata)

- 1) Un osservatore O fermo sul marciapiede vuole misurare il segmento P1P2

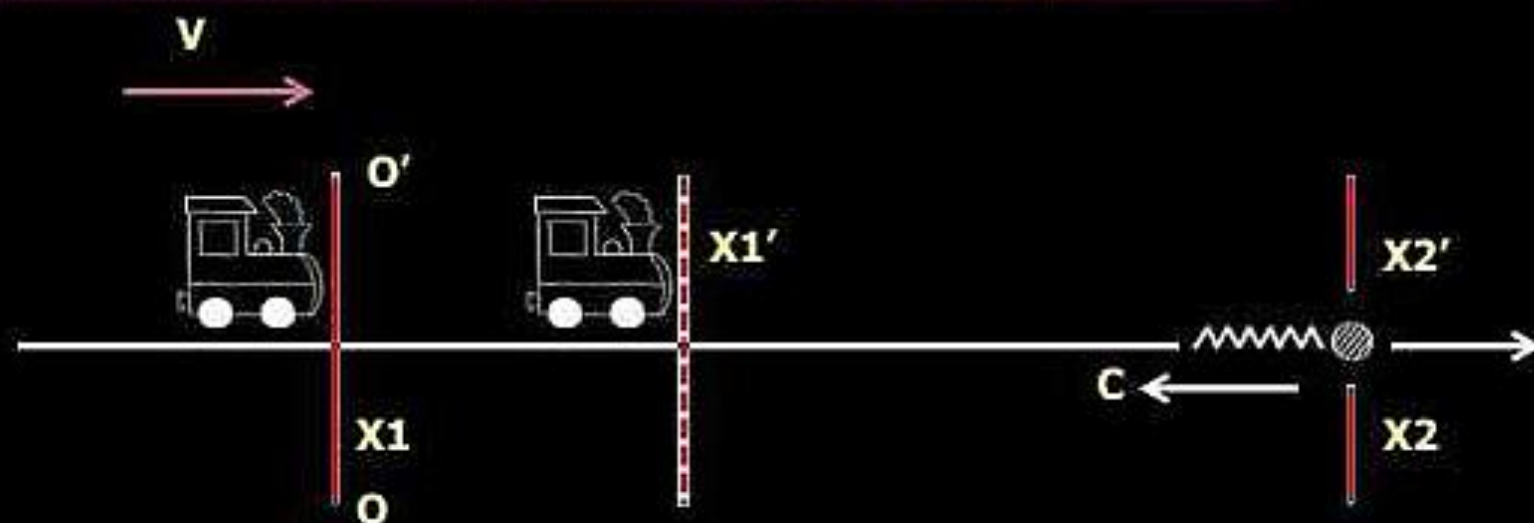


- 2) Un osservatore O' su un treno a velocità V rispetto ad O, vuole misurare il segmento P1P2, la situazione può essere questa. Si tenga presente che per O' è il marciapiedi che si muove nella direzione opposta, lui, dal suo punto di osservazione (il treno) è fermo



Dove $t2'$ e $t1'$ sono i tempi misurati dall'osservatore O' al passaggio tra il paletto 1 e il paletto 2

LA RELATIVITA' RISTRETTA: CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE



$$DX = X2 - X1$$

$$DX = C \cdot DT$$

$$DX' = X2' - X1'$$

$$DX' = C \cdot DT'$$

$$\Rightarrow DX / DT = DX' / DT' \Rightarrow DX' = DX \cdot DT' / DT$$

Stiamo cercando di misurare la lunghezza tra le due barre rosse viste da O' , che dal suo punto di vista è fermo, mentre è O che si muove a velocità V , quindi nel tempo DT dell'osservatore O occorre inserire il fattore relativistico, cioè: $DT' / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

$$DX' = DX \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

LA RELATIVITA' RISTRETTA: CONCLUSIONI

Dunque, partendo dai Postulati della relatività ristretta (Einstein)

- a) invarianza delle leggi della fisica (leggi di Newton e Maxwell) rispetto ad osservatori inerziali, cioè in moto rettilineo ed uniforme uno rispetto all'altro.
- b) invarianza, nel vuoto, della velocità della luce rispetto a qualunque osservatore.

DEDUCIAMO CHE:

- ❖ Due eventi simultanei in un riferimento inerziale possono non essere simultanei in un altro sistema di riferimento in moto relativo rispetto al primo;
- ❖ I tempi misurati con i propri orologi da un sistema di riferimento inerziale in movimento rispetto ad un altro in quiete si **dilatano**. L'affermazione ricordiamo che è ribaltabile;
- ❖ Le lunghezze misurate in un sistema di riferimento inerziale in movimento rispetto ad un altro in quiete si **accorciano**. L'affermazione ricordiamo che è ribaltabile.

QUESTE SONO LE CONCLUSIONI RIVOLUZIONARIE PUBBLICATE DA EINSTEIN
NEL 1905 IN UN FAMOSO ARTICOLO CHE COSTITUISCE LA
RELATIVITA' RISTRETTA

LA RELATIVITA' RISTRETTA: TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

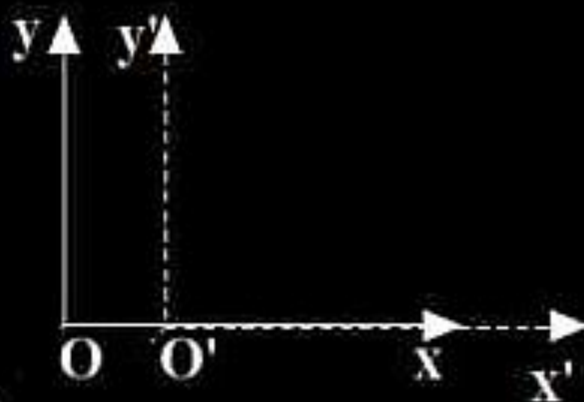
La trasformazione di Galileo fra due sistemi inerziali in moto relativo era stata dedotta facendo l'assunzione implicita che il tempo misurato e le lunghezze siano le stesse in ogni riferimento. Per quanto detto prima le trasformazioni di Galileo diventano un caso particolare delle trasformazioni di Lorentz, quando v è bassa rispetto a C . Nei casi in cui V sia avvicina a C le trasformate diventano:

TRASFORMATE DI LORENTZ

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

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



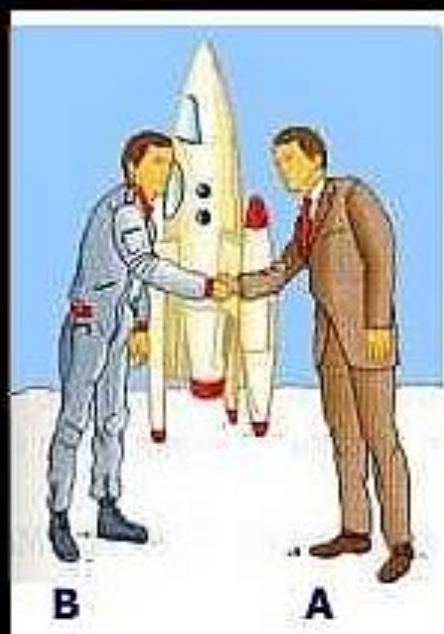
TRASFORMATE DI GALILEO

$$X' = X - Vt$$

$$Y' = Y$$

$$t' = t$$

LA RELATIVITA' RISTRETTA: PARADOSSO DEI GEMELLI



- ❖ Supponiamo che vi siano due gemelli, che chiameremo A e B, di cui uno, mettiamo B, un giorno, parte per un viaggio spaziale alla velocità $V=9/10 \cdot C$;
- ❖ B, che viaggia a una velocità prossima a quella della luce, secondo i suoi orologi sull'astronave misura un tempo proprio, supponiamo, di **10 anni**.
- ❖ Per il fratello A, che è rimasto a terra, i suoi orologi misurano un tempo dilatato pari a $DT' = DT / \sqrt{1-v^2/C^2}$. A conti fatti gli orologi di A misurano un tempo pari a **23 anni**;

Tutto questo farebbe presagire che in un eventuale ritorno del fratello astronauta (B), troverebbe il fratello gemello (A) più vecchio di 13 anni.

MA QUESTO E' UN PARADOSSO
CHE SI SPIEGA COSI'



LA RELATIVITA' RISTRETTA: PARADOSSO DEI GEMELLI



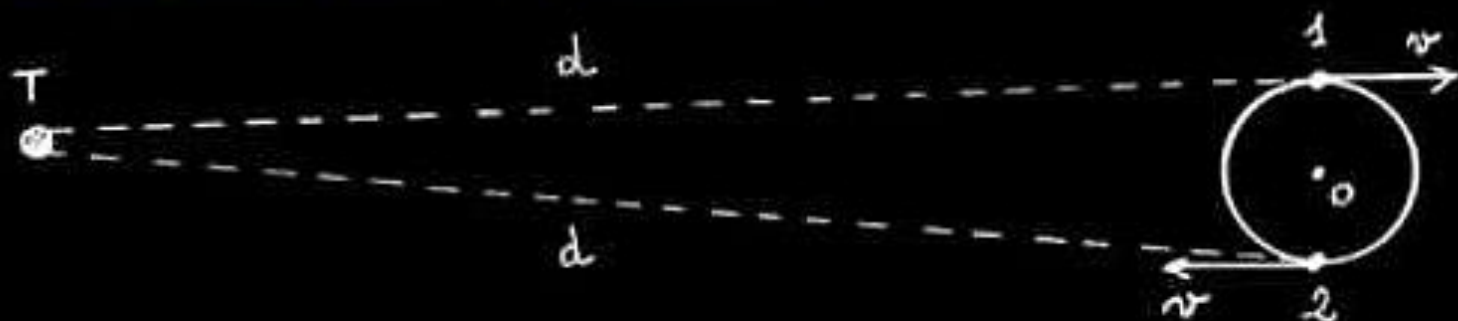
- ❖ A dirà : io ho visto il tuo orologio andare più lentamente del mio, per cui tu dovresti essere più giovane di me (il tuo viaggio per me è durato più di 23 anni mentre per te è durato 10 anni);
- ❖ B dirà : io ho visto il tuo orologio andare più lentamente del mio, per cui tu dovresti essere più giovane di me (il tuo viaggio per me ha durato più di 23 anni mentre per te ha durato 10 anni);
- ❖ Il paradosso, però, non sussiste perché il problema è **mal posto**. Quando il gemello B inizia il viaggio e quando, ritornando, lo finisce, il suo sistema di riferimento non è un SDRI perché esso non si muove rispetto all'altro di moto rettilineo uniforme, bensì accelera ; per tornare a terra il fratello B deve cambiare direzione alla velocità, quindi il moto non è più uniforme;
- ❖ La teoria della **relatività ristretta** vale solo per i SDRI per cui un tale problema deve essere visto nell'ottica della teoria della **relatività generale** che si occupa appunto di sistemi di riferimento accelerati.

LA RELATIVITA' RISTRETTA: CONFERME SPERIMENTALI



- ❖ **MUONI:** Sono particelle fondamentali, instabili, poiché vivono per un tempo medio di circa 1,5 microsecondi(μs) per poi decadere in un elettrone e in una coppia neutrino-antineutrino;
- ❖ I muoni si muovono alla velocità altissima prossima a quella della luce. Se non consideriamo gli effetti relativistici la loro vita media dovrebbero consentirgli di percorrere appena 450 metri;
- ❖ Eppure , dallo spazio percorrono circa 15 Km dell'atmosfera e arrivano ad essere rilevati a terra;
- ❖ Considerando gli effetti relativistici per il muone, vista da terra, si dilatano i tempi e si contraggono le lunghezze.

LA COSTANZA DELLA VELOCITA' DELLA LUCE



- ❖ La luce proveniente sulla Terra da un sistema binario di stelle, in rotazione intorno al loro baricentro O , dovrebbe comporsi con la velocità v delle stelle.;
- ❖ Dalla posizione 1 la luce dovrebbe arrivare sulla Terra, secondo la composizione di Galileo, con velocità $c - v$, mentre nella posizione 2 con velocità $c + v$. Se ciò fosse vero, data la differenza dei tempi d'arrivo della luce da 1 e 2, l'orbita delle due stelle (che nella nostra esemplificazione è supposta circolare) dovrebbe apparire eccentrica.;
- ❖ I dati sperimentali non mostrano l'eccentricità in oggetto. Una conclusione possibile è che c sia indipendente dalla velocità della sorgente, in accordo con il secondo postulato di Einstein..

LA RELATIVITA' RISTRETTA: SPAZIO – TEMPO CONI DI LUCE



Hermann Minkowski (1864 - 1909) è stato un matematico lituano naturalizzato tedesco. Sviluppò la teoria geometrica dei numeri ed utilizzò metodi geometrici per risolvere impegnativi problemi della teoria dei numeri,

Minkowski, dopo le teorie di Einstein, introdusse il concetto che lo spazio e il tempo non vanno più interpretati come **categorie separate ma come entità inscindibili**:

"D'ora innanzi, lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, sono condannati a svanire come pure ombre, e solo una sorta di unione tra i due conserverà una realtà indipendente";

Minkowski definisce la struttura dello spazio tempo con questa frase:

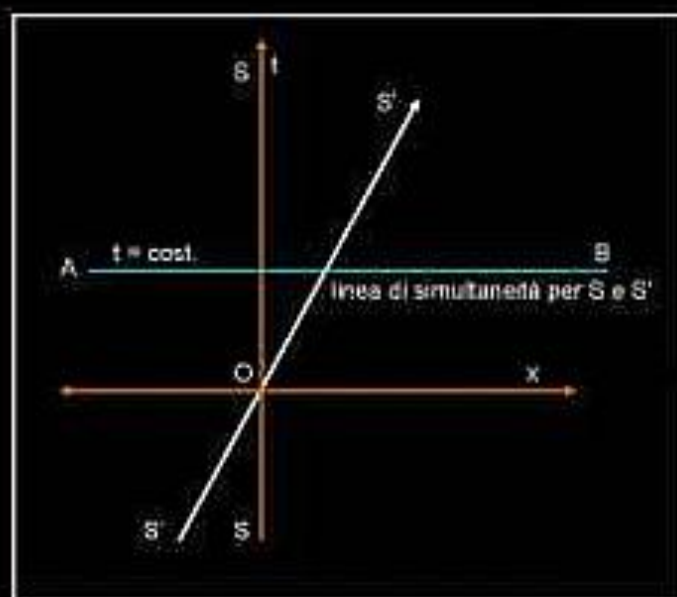
Un punto dello spazio ad un punto del tempo, cioè, un sistema di valori x, y, z, t lo chiamerò un punto dell'universo. La molteplicità di tutti i pensabili sistemi di valori x, y, z, t , la battezziamo universo.

Secondo Minkowski la relatività di Einstein, con i suoi effetti legati alla *dilatazione del tempo* e alla *contrazione delle lunghezze* è ancora troppo legata al pensiero newtoniano, dal momento che, come lo scienziato inglese, tiene separate le categorie spazio e tempo. Lo spazio-tempo per il matematico lituano è invece un intreccio indissolubile tra fisica, geometria e fenomeni naturali, è un concetto che deriva dal mondo dei fenomeni, è reale ed è indipendente dall'osservatore.

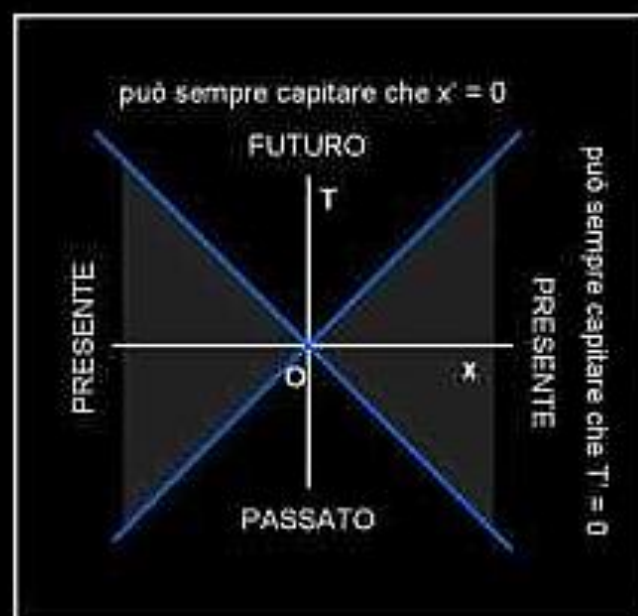
LA RELATIVITA' RISTRETTA: SPAZIO – TEMPO CONI DI LUCE

Fino all'epoca pre-einsteiniana lo spazio tridimensionale era tenuto ben distinto dal tempo ed entrambi erano considerati assoluti. La relatività speciale di Albert Einstein dimostrò che invece lo spazio ed il tempo sono indissolubilmente legati tra loro. Il nostro universo, che era rappresentato da uno spazio a 3 dimensioni e dal tempo, diviene, con l'avvento della relatività speciale, uno spazio-tempo a 4 dimensioni.

Per potere descrivere un qualsiasi fenomeno fisico occorre partire dal fatto che un certo fenomeno è avvenuto, a un dato istante, in un certo punto dello spazio. Una volta introdotto un sistema di riferimento, tale informazione è data da quattro numeri (ct, x, y, z) che sono le coordinate spazio-temporali del fenomeno. La quaterna ordinata (ct, x, y, z) prende il nome di evento.

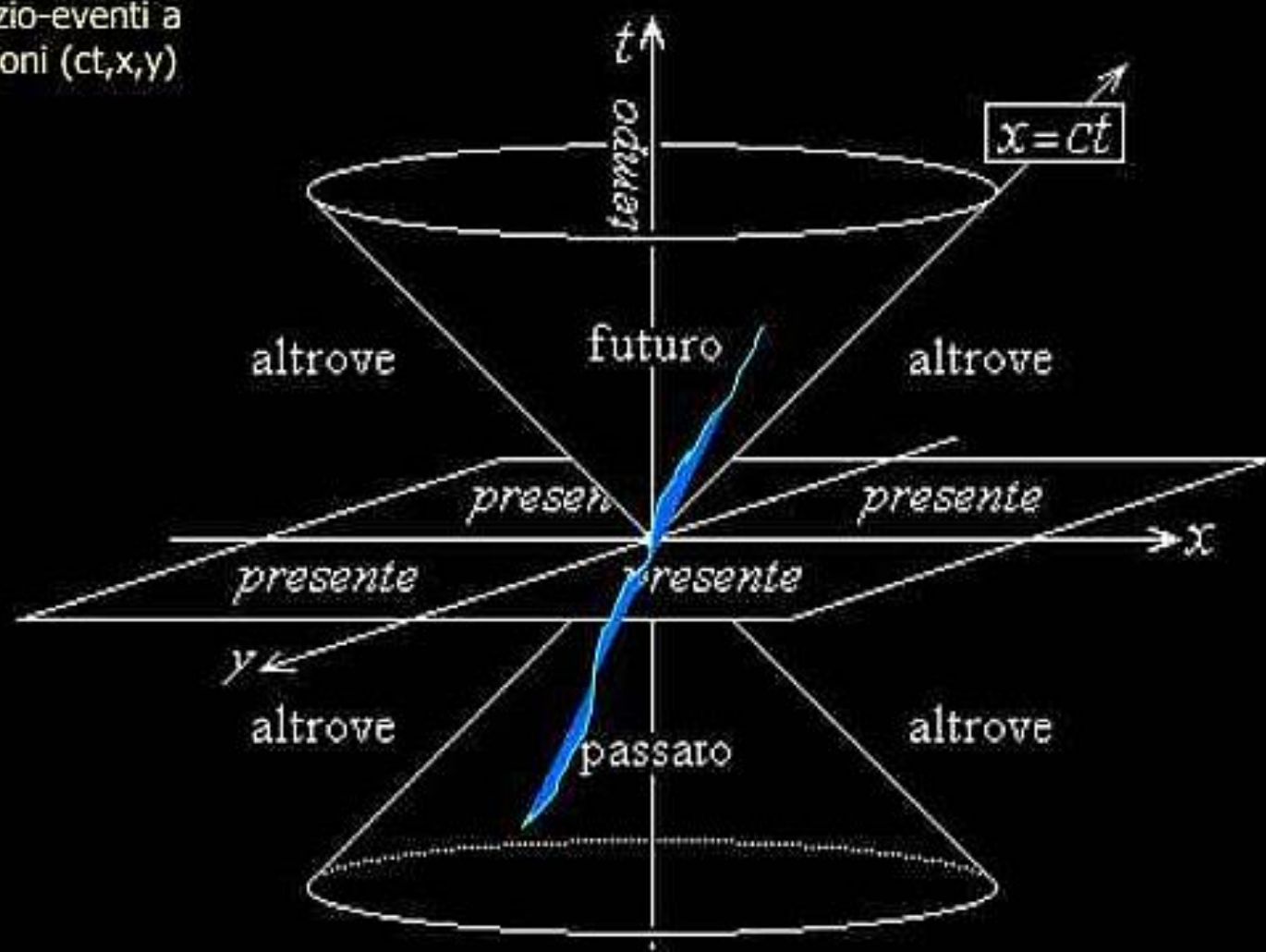


In uno
spazio-eventi
a due
dimensioni
 (ct, x)



LA RELATIVITA' RISTRETTA: SPAZIO – TEMPO CONI DI LUCE

In uno spazio-eventi a tre dimensioni (ct, x, y)



Gli eventi naturali sono ingabbiati dai due coni luce, nella loro evoluzione non possono manifestarsi fuori dai coni luce del passato, istante presente e futuro



Grazie per l'attenzione!!