



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Relatività, Energia e Ambiente

Prof. Domenico Galli

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Introduzione alla Relatività Ristretta II parte

<http://www.fondazioneocchialini.it>

Polo Scolastico "L. Donati" Fossombrone, 12 Aprile 2010



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La Crisi della Fisica Classica

La Misura della Velocità della Terra Rispetto all'"Etere Luminifero": il più grande Esperimento Fallito

Introduzione alla Relatività
Ristretta. II parte. 2
Domenico Galli

La Velocità della Terra Rispetto all'"Etere Luminifero"

- La Terra si muove, nella sua orbita attorno al Sole, a una velocità di circa **30 km/s** (108000 km/h) **cambiando continuamente direzione** fino a riacquistare la direzione iniziale dopo un anno.
 - Per paragone, la velocità di un punto della superficie terrestre dovuta alla rotazione della terra attorno al proprio asse è meno di **0.5 km/s** (18000 km/h) all'**equatore**.
- Se esistesse l'"Etere Luminifero", ci si aspetterebbe un flusso di Etere attorno alla Terra, percepibile come **"vento di Etere"**.
 - La velocità del **"vento di Etere"** dovrebbe **cambiare continuamente direzione**, fino a riacquistare la direzione iniziale dopo un anno.
- Misurando la **velocità della luce** in **diverse direzioni** o in **diversi periodi dell'anno**, dovrebbe essere possibile misurare la **velocità della Terra rispetto all'"Etere Luminifero"**.



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 3
Domenico Galli
Vento di "Etere"

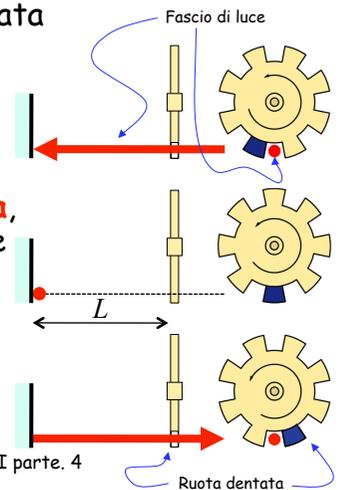


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



L'Esperimento di Fizeau

- La prima misura non astronomica della velocità della luce nell'aria fu effettuata da **Fizeau** nel **1849**.
- La misura utilizzava una ruota dentata rotante come interruttore di luce.
 - La luce può andare oltre la ruota dentata soltanto se **non incontra un dente** sul suo percorso.
- La luce attraversa la **ruota dentata**, percorre una **distanza L**, si riflette su di uno **specchio**, percorre nuovamente una **distanza L** e passa nuovamente attraverso la **ruota dentata**.



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 4
Domenico Galli



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

L'Esperimento di Fizeau (II)

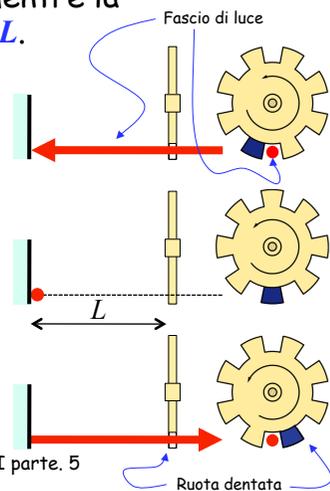
- Per potere **passare** attraverso la ruota dentata sia all'**andata** sia al **ritorno** è necessario che la **ruota avanzi esattamente di un dente** mentre la **luce percorre 2 volte la distanza L** .

- Detto n il numero di denti della ruota dentata, e ω la sua velocità angolare, il tempo necessario per l'avanzamento di un dente è:

$$t_{\text{dente}} = \frac{2\pi}{n\omega}$$

- Il tempo necessario alla luce per percorrere 2 volte la distanza L è:

$$t_{\text{luce}} = \frac{2L}{c}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 5
Domenico Galli

L'Esperimento di Fizeau (III)

- La **condizione** affinché la **luce passi 2 volte** attraverso la ruota dentata è allora:

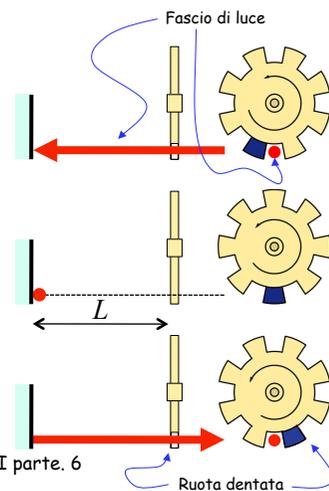
$$t_{\text{dente}} = t_{\text{luce}}$$

$$\frac{2\pi}{n\omega} = \frac{2L}{c}$$

$$c = \frac{n}{\pi} L\omega$$

- In questo modo Fizeau misurò, su una distanza $L = 8633$ m:

$$c = (315.5 \pm 0.5) \times 10^6 \text{ m/s}$$



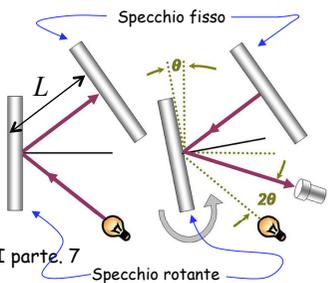
Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 6
Domenico Galli

L'Esperimento di Fizeau-Foucault

- Una successiva misura della velocità della luce fu effettuata da **Foucault** e **Fizeau** nel **1850**.

- L'esperimento utilizzava uno **specchio rotante** invece della ruota dentata.

- La luce si riflette nello **specchio rotante**, percorre la **distanza L** tra i due specchi, si riflette sullo **specchio fisso**, percorre nuovamente la **distanza L** e si riflette nuovamente sullo **specchio rotante**.



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 7
Domenico Galli

L'Esperimento di Fizeau-Foucault (II)

- Il tempo necessario alla luce per percorrere 2 volte la distanza L è:

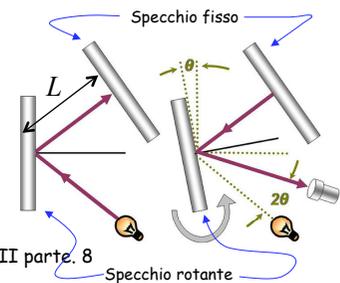
$$t_{\text{luce}} = \frac{2L}{c}$$

- Se lo specchio rotante ruota con velocità angolare ω , nell'**intervallo di tempo** che intercorre tra le **due successive riflessioni** della luce sullo specchio mobile, esso **ruoterà** di un angolo:

$$\theta = \omega t_{\text{luce}} = \frac{2}{c} L\omega$$

- Il **raggio** sarà perciò **deviato** di un angolo:

$$2\theta = \frac{4}{c} L\omega$$



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 8
Domenico Galli

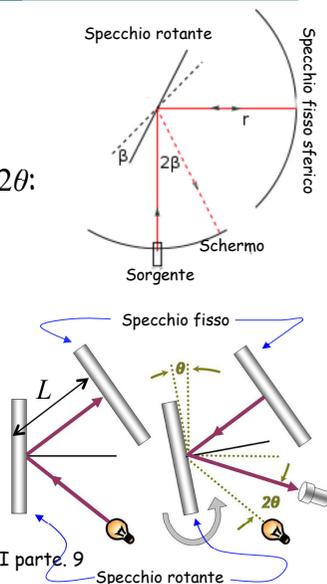
L'Esperimento di Fizeau-Foucault (III)

- La velocità della luce si può quindi ottenere dalla velocità angolare di rotazione dello specchio ω , dalla distanza tra i due specchi L e dall'angolo di deviazione del raggio 2θ :

$$c = \frac{4L\omega}{2\theta}$$

- Con questo apparato Fizeau e Foucault misurarono:

$$c = (298.0 \pm 0.5) \times 10^6 \text{ m/s}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 9
Domenico Galli

L'Esperimento di Mount Wilson (Michelson)

- Un perfezionamento del sistema a specchi rotanti fu usato da **Michelson** nel **1927** su di una distanza di circa **35 km** (tra Monte Wilson e Monte S. Antonio in California).
- Con questo apparato Michelson misurò:
 $c = (299.796 \pm 0.004) \times 10^6 \text{ m/s}$
- La precisione fu molto superiore alle misure precedenti.
- In misure di precisione così elevata è tuttavia necessario considerare l'indice di rifrazione dell'aria per ottenere la velocità nel vuoto.
- La correzione comunque non è precisa a causa dell'incertezza nei valori della pressione e della temperatura dell'atmosfera.



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 10
Domenico Galli

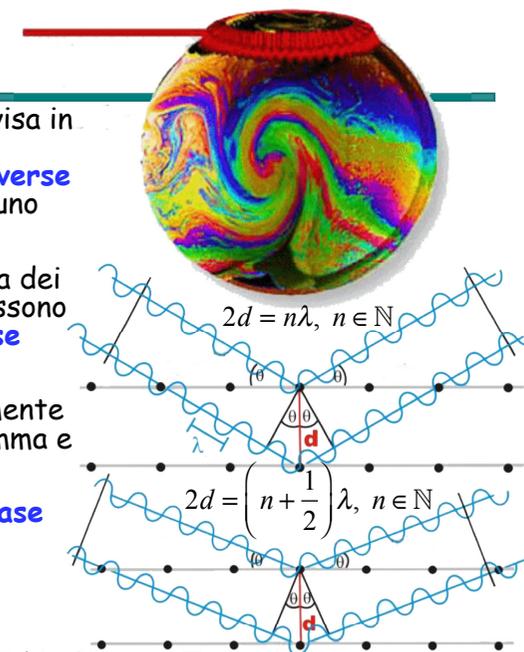
L'Esperimento di Michelson-Morley

- Prima dell'esperimento di Mount Wilson, Albert Abraham **Michelson** collaborò con Edward **Morley** in un esperimento (**1887**) poi passato alla storia:
 - Non** consente di ottenere una **misura** della **velocità della luce**.
 - Consente di osservare eventuali effetti dovuti alla **velocità della superficie terrestre rispetto all'"Etere Luminifero"**.
 - Supponendo che la velocità della luce sia c nel SdR dell'"Etere Luminifero" e che si **componga** secondo le **trasformazioni di Galileo** negli altri SdR.
 - Utilizza un **interferometro**, ovvero un dispositivo per realizzare l'interferenza tra onde di luce coerenti.
 - L'eventuale effetto è segnalato da uno **spostamento delle frange** di interferenza.
 - Oggi noto per essere **"il più importante esperimento fallito"**.

Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 11
Domenico Galli

Interferenza delle Onde

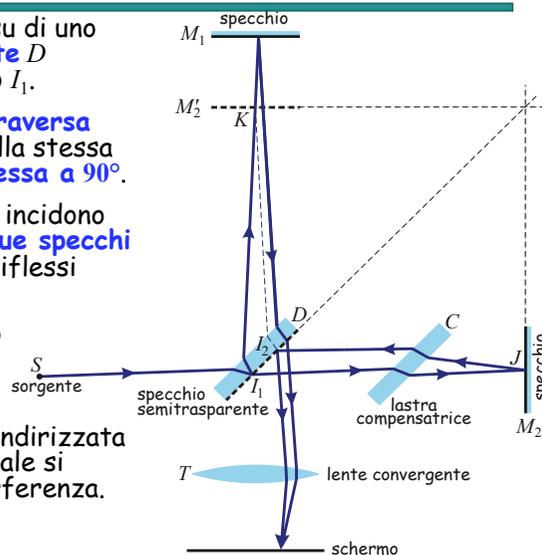
- La stessa onda viene divisa in due parti e le due parti **percorrono distanze diverse** prima di giungere su di uno schermo.
- A causa della differenza dei percorsi le due onde possono essere più o meno in **fase** sullo schermo.
- Se esse sono perfettamente in **fase** l'ampiezza si somma e l'intensità **quadruplica**.
- Se esse sono in **controfase** l'ampiezza si sottrae e l'intensità è **nulla**.



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 12
Domenico Galli

L'Interferometro di Michelson

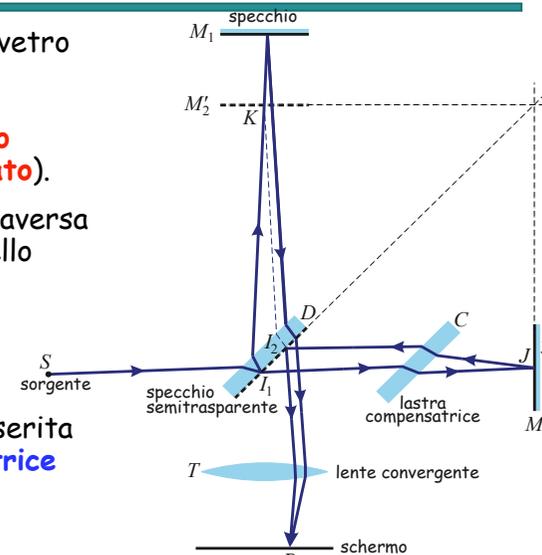
- Un fascio di luce incide su di uno **specchio semitrasparente** D inclinato di 45° , nel punto I_1 .
- Una **parte** della luce **attraversa** lo specchio e procede nella stessa direzione. Il **resto** è **riflessa a 90°** .
- I due raggi così ottenuti incidono perpendicolarmente su **due specchi ordinari** M_1 e M_2 e sono riflessi indietro.
- Entrambi i raggi incidono **nuovamente** sullo **specchio semitrasparente** D e parte di entrambi viene indirizzata su di uno **schermo**, sul quale si osserva la figura di interferenza.



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. P.13
Domenico Galli

L'Interferometro di Michelson (II)

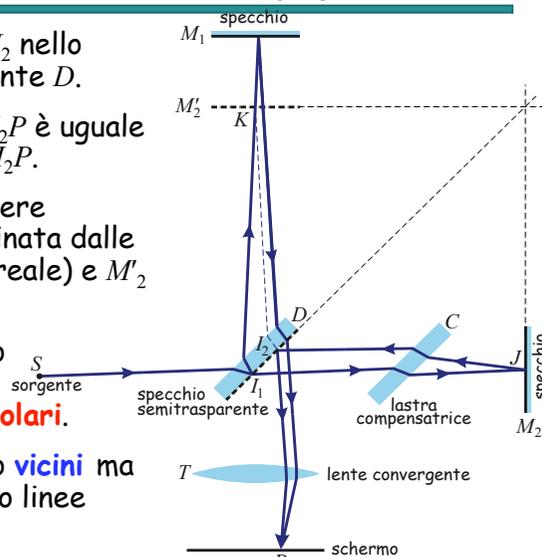
- Utilizza una lastra di vetro avente una superficie **semitrasparente e semiriflettente (vetro parzialmente argentato)**.
- Il raggio riflesso attraversa 3 volte lo spessore dello specchio, quello trasmesso soltanto 1.
- Per eliminare tale asimmetria è stata inserita una **lamina compensatrice trasparente** C .



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. P.14
Domenico Galli

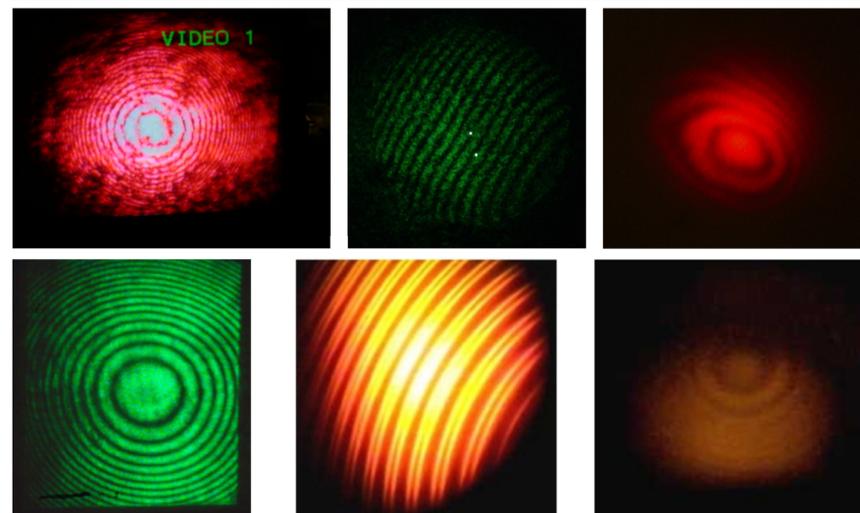
L'Interferometro di Michelson (III)

- Sia M'_2 l'immagine di M_2 nello specchio semitrasparente D .
- Il cammino ottico SI_1I_2P è uguale al cammino ottico $SI_1K'I_2P$.
- L'interferenza può essere considerata come originata dalle sorgenti coerenti M_1 (reale) e M'_2 (virtuale).
- Se i piani M_1 e M'_2 sono **paralleli** le frange di interferenza sono **circolari**.
- Se i piani M_1 e M'_2 sono **vicini ma inclinati**, le frange sono **rette equidistanziate**.



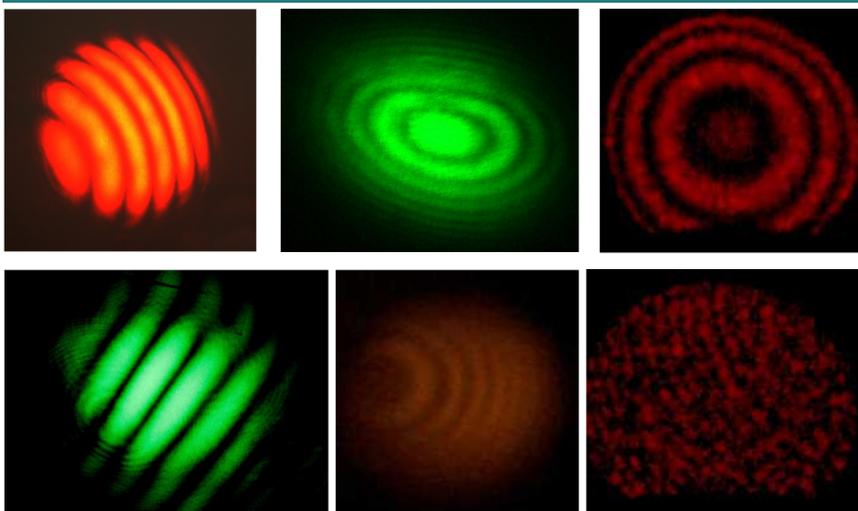
Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. P.15
Domenico Galli

Frange di Interferenza con Luce Monocromatica

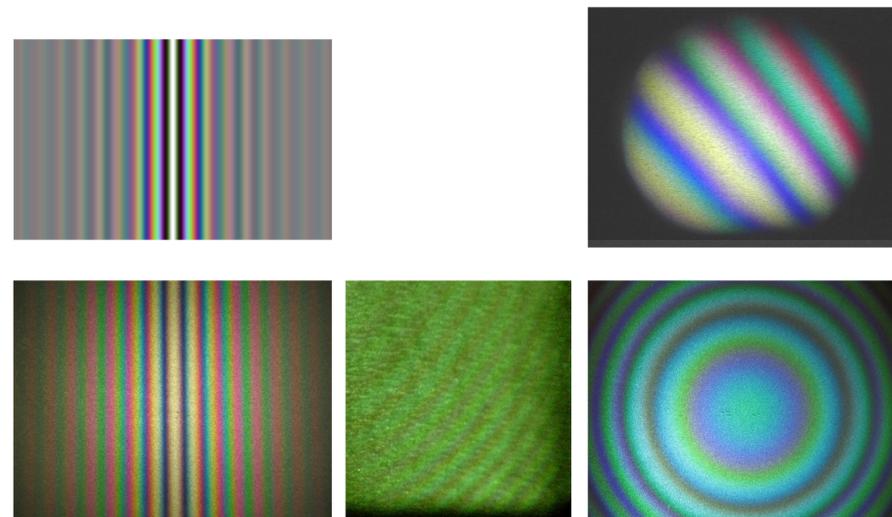


Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 16
Domenico Galli

Franghe di Interferenza con Luce Monocromatica (II)

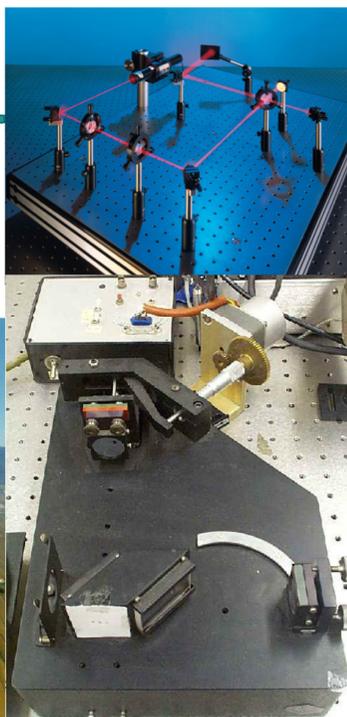


Franghe di Interferenza con Luce Policromatica



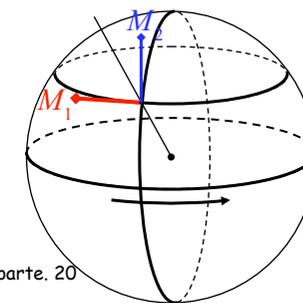
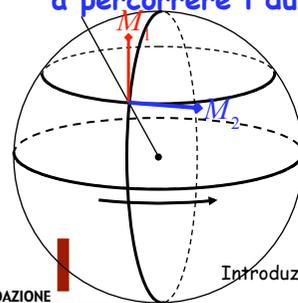
Interferometri di Michelson

Sotto: l'esperimento italo-francese **VIRGO** è a Cascina (PI, Italia) è un interferometro di Michelson con i bracci lunghi **3 km** per rivelare **onde gravitazionali**.



L'Esperimento di Michelson-Morley (II)

- Idea: **due osservazioni delle franghe** di interferenza, con l'interferometro diversamente orientato:
 - braccio M_1 diretto lungo un **meridiano** e braccio M_2 lungo un **parallelo**.
 - braccio M_1 diretto lungo un **parallelo** e braccio M_2 lungo un **meridiano**.
- A causa del moto di rotazione della Terra (0.5 km/s all'equatore) rispetto all'"Etere Luminifero", Michelson e Morley **si aspettavano spostamenti delle franghe di interferenza** dovuti ai **tempi diversi impiegati dalla luce a percorrere i due bracci**.

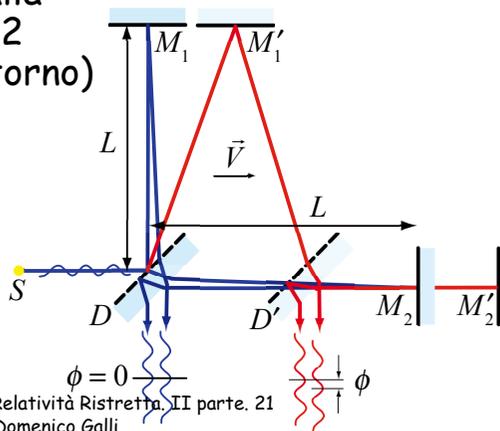


L'Esperimento di Michelson-Morley (III)

- Se i due **bracci** dell'interferometro hanno **ugual lunghezza L** e l'interferometro è in **quiete** rispetto all' "Etere Luminifero" allora il **tempo** impiegato dalla luce a percorrere i 2 bracci (andata e ritorno) è **uguale**:

$$t_1 = t_2 = \frac{2L}{c}$$

per cui sull'asse si ha interferenza costruttiva.

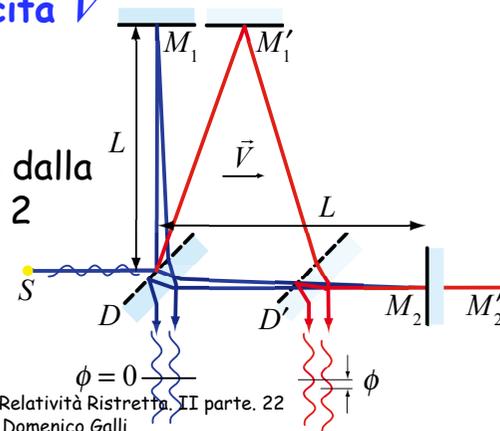


Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 21
Domenico Galli

L'Esperimento di Michelson-Morley (IV)

- Se invece l'interferometro è **solidale** alla **superficie terrestre** e l'**asse orizzontale** è diretto **lungo un parallelo**, tale asse si muove con una certa **velocità V** rispetto all' "Etere Luminifero".

- Il **tempo** impiegato dalla luce a percorrere i 2 bracci (andata e ritorno) è **diverso**.



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 22
Domenico Galli

L'Esperimento di Michelson-Morley (V)

- Tratto orizzontale (andata), SdR "Etere":

- Mentre la luce viaggia da D a M_2 lo specchio si è spostato da M_2 a M'_2 .

- La luce deve quindi percorrere il tratto DM'_2 .

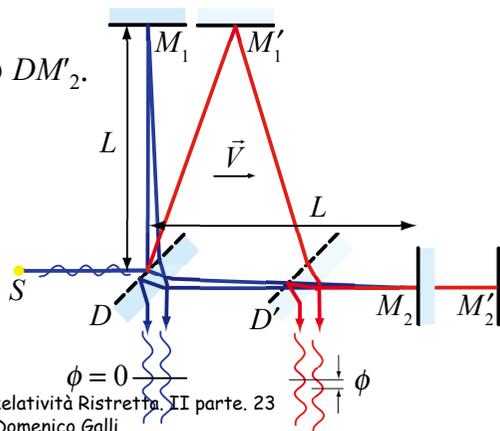
$$\overline{DM_2} = L$$

$$\overline{M_2M'_2} = Vt_{2A}$$

$$\overline{DM'_2} = L + Vt_{2A}$$

$$ct_{2A} = L + Vt_{2A}$$

$$t_{2A} = \frac{L}{c - V}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 23
Domenico Galli

L'Esperimento di Michelson-Morley (VI)

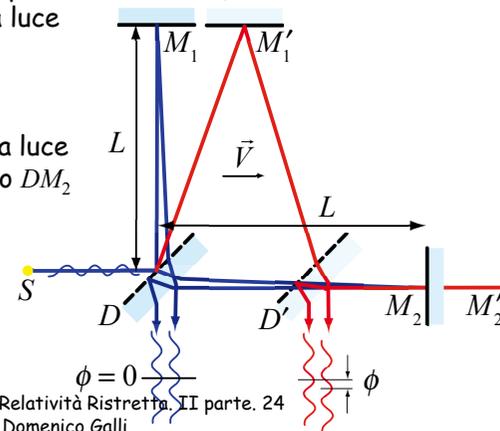
- Tratto orizzontale (andata), SdR Terra:

- Poiché la Terra si muove con velocità V lungo il parallelo rispetto all' "Etere" (verso a destra in figura) e la luce si muove con velocità c rispetto all' "Etere" (verso a destra in figura) la velocità della luce rispetto alla Terra è:

$$c'_A = c - V$$

- Il tempo necessario alla luce per percorrere il tratto DM_2 è perciò:

$$t_{2A} = \frac{\overline{DM_2}}{c'_A} = \frac{L}{c - V}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 24
Domenico Galli

L'Esperimento di Michelson-Morley (VII)

■ Tratto orizzontale (ritorno), SdR "Etere":

- Mentre la luce viaggia da M'_2 a D lo specchio si è spostato da D a D' .
- La luce deve quindi percorrere il tratto M'_2D' .

$$\overline{M'_2D} = L + Vt_{2A}$$

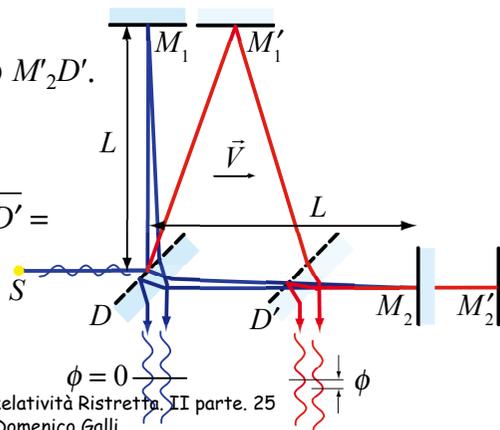
$$\overline{DD'} = V(t_{2A} + t_{2R})$$

$$\overline{M'_2D'} = L + Vt_{2A} - \overline{DD'} =$$

$$= L - Vt_{2R}$$

$$ct_{2R} = L - Vt_{2R}$$

$$t_{2R} = \frac{L}{c+V}$$



L'Esperimento di Michelson-Morley (VIII)

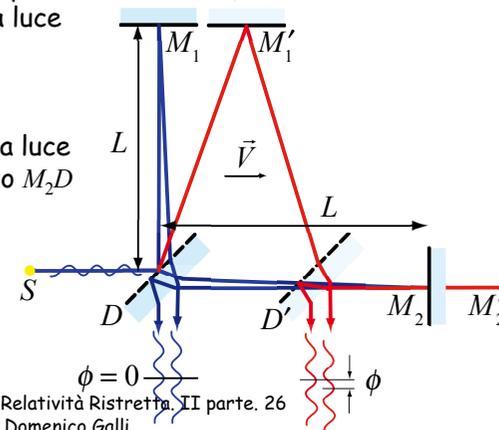
■ Tratto orizzontale (ritorno), SdR Terra:

- Poiché la Terra si muove con velocità V lungo il parallelo rispetto all'"Etere" (verso a destra in figura) e la luce si muove con velocità c rispetto all'"Etere" (verso a sinistra in figura) la velocità della luce rispetto alla Terra è:

$$c'_R = c + V$$

- Il tempo necessario alla luce per percorrere il tratto M_2D è perciò:

$$t_{2R} = \frac{\overline{M_2D}}{c'_R} = \frac{L}{c+V}$$



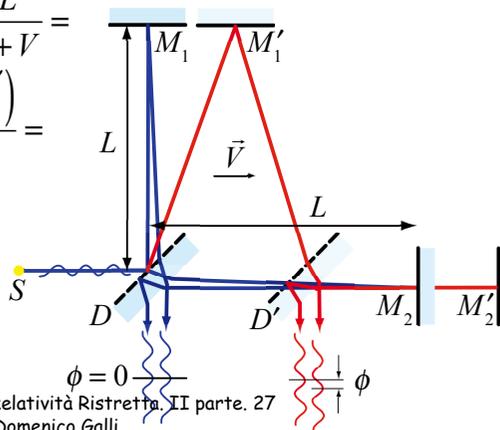
L'Esperimento di Michelson-Morley (IX)

- Il tempo complessivo impiegato dalla luce per percorrere nei due versi (andata e ritorno) il braccio orizzontale è:

$$t_2 = t_{2A} + t_{2R} = \frac{L}{c-V} + \frac{L}{c+V} =$$

$$= \frac{L(c+V) + L(c-V)}{c^2 - V^2} =$$

$$= \frac{2Lc}{c^2 - V^2} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$



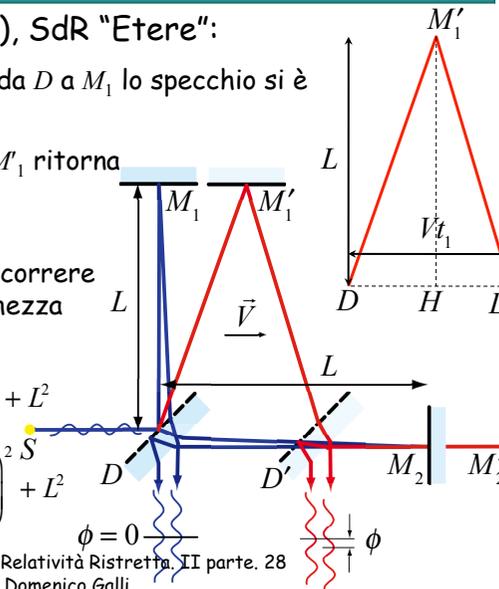
L'Esperimento di Michelson-Morley (X)

- Tratto verticale (A+R), SdR "Etere":

- Mentre la luce viaggia da D a M_1 lo specchio si è spostato da M_1 a M'_1 .
- Quando poi la luce da M'_1 ritorna in D , lo specchio D si è spostato da D a D' .
- La luce deve quindi percorrere i 2 tratti di egual lunghezza DM'_1 e M'_1D' :

$$\overline{DM'_1}^2 = \overline{DH}^2 + \overline{HM'_1}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L^2$$

$$\overline{M'_1D'}^2 = \overline{HD'}^2 + \overline{HM'_1}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L^2$$



L'Esperimento di Michelson-Morley (XI)

- Avremo perciò:

$$\left(c \frac{t_1}{2}\right)^2 = \overline{DM_1'}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L^2$$

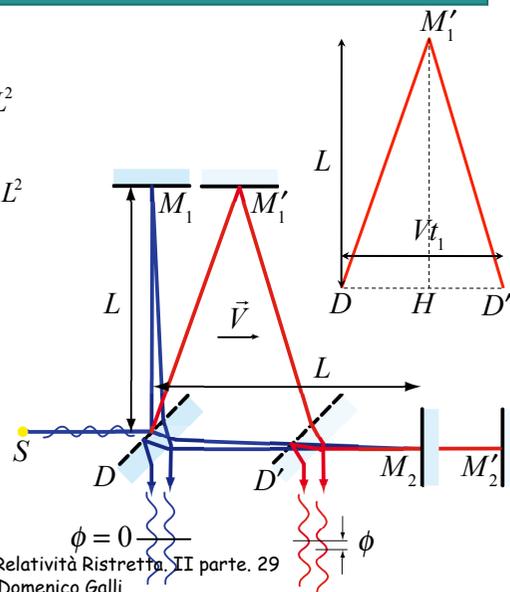
$$\left(c \frac{t_1}{2}\right)^2 = \overline{M_1'D'}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L^2$$

$$c^2 \frac{t_1^2}{4} = V^2 \frac{t_1^2}{4} + L^2$$

$$c^2 t_1^2 = V^2 t_1^2 + 4L^2$$

$$(c^2 - V^2) t_1^2 = 4L^2$$

$$t_1 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - V^2}} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$



L'Esperimento di Michelson-Morley (XII)

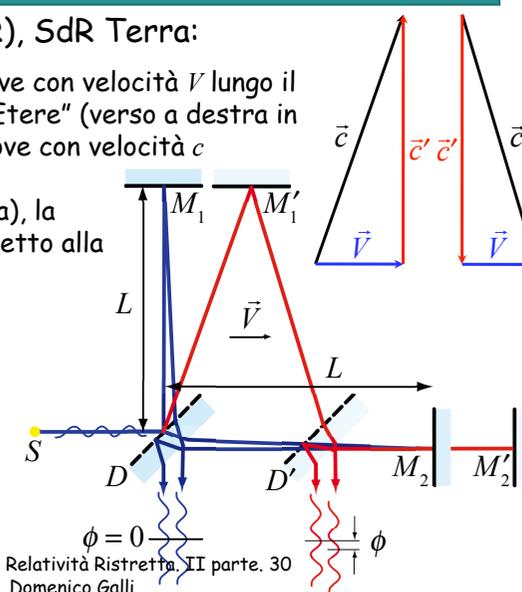
- Tratto verticale (A+R), SdR Terra:

- Poiché la Terra si muove con velocità V lungo il parallelo rispetto all'"Etere" (verso a destra in figura) e la luce si muove con velocità c rispetto all'"Etere" (obliquamente in figura), la velocità della luce rispetto alla Terra è:

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{V}$$

e il suo modulo è:

$$c' = \|\vec{c} - \vec{V}\| = \sqrt{c^2 - V^2}$$

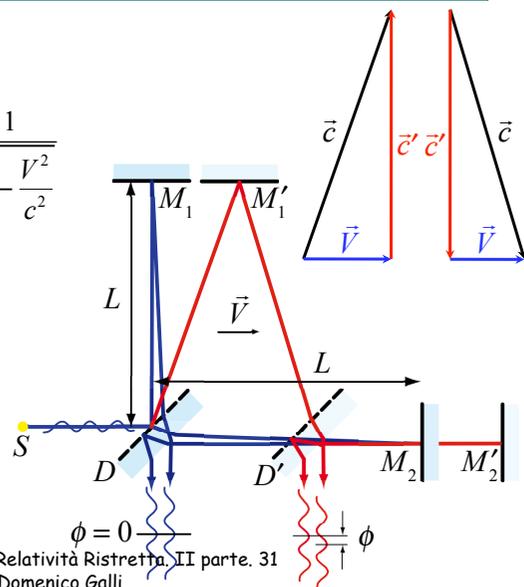


L'Esperimento di Michelson-Morley (XIII)

- Avremo perciò:

$$c' = \sqrt{c^2 - V^2}$$

$$t_1 = \frac{2L}{c'} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - V^2}} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

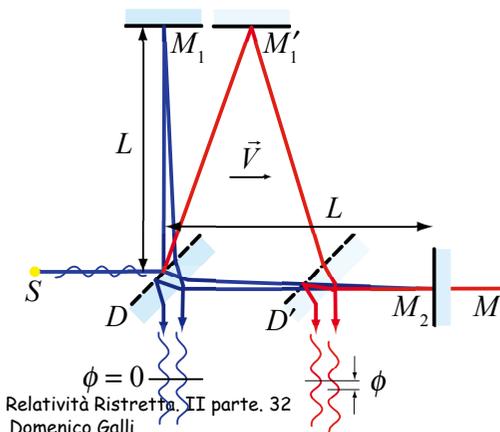


L'Esperimento di Michelson-Morley (XIV)

- Riassumendo, i tempi impiegati dalla luce a percorrere il **braccio lungo il parallelo** (t_2) e il **braccio lungo il meridiano** (t_1) sono diversi:

$$t_2 = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

$$t_1 = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$



L'Esperimento di Michelson-Morley (XV)

- Essendo $V \ll c$, possiamo approssimare:

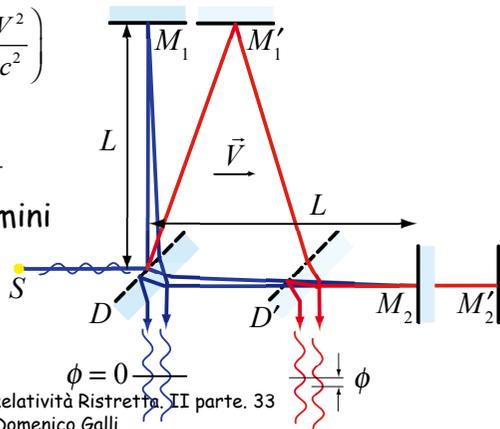
$$t_2 = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{V^2}{c^2} \right)$$

$$t_1 = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2} \right)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \approx \frac{2L}{c} \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2} = \frac{L V^2}{c^2}$$

- La differenza dei cammini ottici vale.

$$\Delta l = c \Delta t = c(t_2 - t_1) = L \frac{V^2}{c^2}$$

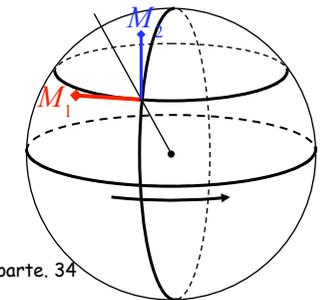
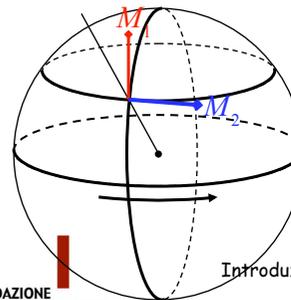


Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 33
Domenico Galli

L'Esperimento di Michelson-Morley (XVI)

- Ruotando l'interferometro di 90° tale differenza di cammini passa da Δl a $-\Delta l$, per una variazione totale di $2\Delta l$.
- Ci aspetteremmo dunque uno **spostamento delle frange** di interferenza di una frazione della larghezza di frangia pari a:

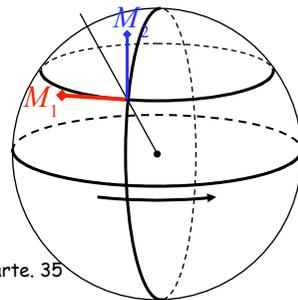
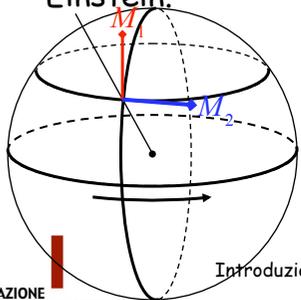
$$s = \frac{2\Delta l}{\lambda} = 2 \frac{V^2}{c^2} \frac{L}{\lambda}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 34
Domenico Galli

L'Esperimento di Michelson-Morley (XVII)

- L'interferometro era **ampiamente sensibile** per osservare tale effetto.
- Non fu trovato tuttavia nessuno spostamento delle frange.**
 - La velocità dell' "Etere Luminifero" non poté essere rilevata.
- Occorsero **18 anni** prima che i **risultati negativi** dell'**esperimento** fossero **pienamente spiegati** da Einstein.



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 35
Domenico Galli



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Interpretazioni di un Fallimento

Le Prime Reazioni al Fallimento
dell'Esperimento di Michelson-Morley

Introduzione alla Relatività
Ristretta, II parte, 36
Domenico Galli

La Contrazione di Fitzgerald-Lorentz

- Il fallimento dell'esperimento di Michelson-Morley creò sconcerto.
- La **prima idea** per trovare una via d'uscita venne, **2 anni dopo**, indipendentemente da **George Fitzgerald** e da **Hendrik Lorentz**:

- i corpi materiali **in moto contraggono** la propria **dimensione nella direzione del movimento**, riducendo la propria lunghezza da L_0 a:

$$L_{\parallel} = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} < L_0$$

- L'effetto non è riscontrabile dall'osservatore in moto poiché l'unità **campione** da lui usata per la misura subisce anch'essa una contrazione della stessa entità.

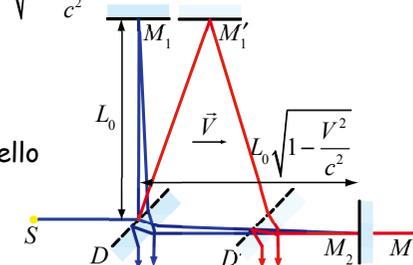
La Contrazione di Fitzgerald-Lorentz (II)

- In questo modo il braccio DM_2 , orientato lungo un parallelo, risulterebbe **più corto** del braccio DM_1 , orientato lungo un meridiano.
- I **tempi** di percorrenza dei 2 bracci dell'interferometro diventerebbero allora **uguali**:

$$t_2 = \frac{2L_{\parallel}}{c} \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \frac{2L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{c} \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \frac{2L_0}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$t_1 = \frac{2L_{\perp}}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{2L_0}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

- Questo spiegherebbe l'**assenza** dello **spostamento delle frange** di interferenza.



La Contrazione di Fitzgerald-Lorentz (III)

- La **contrazione annullava** ogni **effetto** della **velocità** del laboratorio **rispetto all'etere**.
 - Grazie ad un intervento correttivo *ad hoc*, l'idea dell'"**Etere Luminifero**" era di nuovo **salva**.
 - L'esistenza di un **SdR privilegiato** per lo studio dei fenomeni fisici non era messa in discussione.
- La **ragione** della **contrazione** era attribuita a reali **effetti elettromagnetici** prodotti dal moto dei corpi nell'etere:
 - Effetti tuttavia **non previsti** dagli studi dello stesso Lorentz sull'elettromagnetismo, condotti dello stesso periodo.
- L'ipotesi di Fitzgerald-Lorentz **non ottenne molto credito**:
 - parve formulata **artificiosamente** per risolvere la difficoltà.
- Il problema del SdR privilegiato si aggravava:
 - Leggi **elettromagnetismo** verificate soltanto nel **SdR dell'etere**;
 - SdR dell'etere **indistinguibile** sperimentalmente da altri SdR:
 - Impossibile trovare con una misura sperimentale qual è il SdR dell'etere.

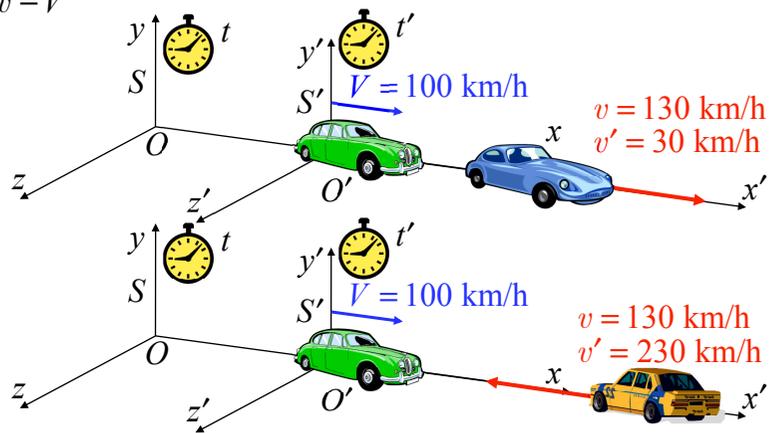
Impossibilità della Misura della Velocità Assoluta

- Altri esperimenti** progettati per misurare il "**vento di etere**" ebbero **analoghe difficoltà**.
- Pareva esserci una **cospirazione** che — ogniquale volta si tentava di misurare il "**vento di etere**" — introduceva un nuovo fenomeno che ne rendeva **impossibile la misura**.
- Poincaré osservò che una **cospirazione generale** doveva essere anch'essa una **legge di natura**.
- Poincaré propose quindi che vi fosse una **legge di natura** per cui fosse **impossibile** — **con qualunque esperimento** — **misurare il "vento di etere"**.
 - In altre parole, non ci può essere **nessun modo** per **misurare una velocità assoluta** (cioè una velocità rispetto all' "Etere Luminifero").

Composizione Galileiana delle Velocità

- Nelle trasformazioni di Galileo le velocità si compongono secondo la legge:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 41
Domenico Galli

Invarianza della Velocità della Luce

- Se velocità della luce fosse relativa, così come lo è la velocità degli oggetti ordinari, allora:

- Potremmo individuare il SdR dell'"Etere Luminifero" come il SdR in cui la luce ha velocità c .
- Misurando la velocità della luce in un SdR potremmo ricavare la velocità assoluta di tale SdR.

- Se postuliamo che **non** sia possibile misurare una velocità assoluta allora dobbiamo concludere che:

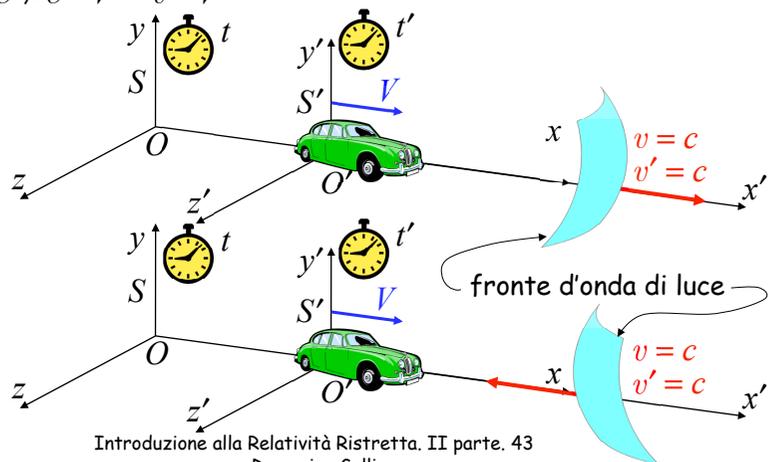
- La velocità della luce nel vuoto c è un invariante; in altre parole:
 - La velocità della luce nel vuoto c non è relativa;
 - La velocità della luce nel vuoto c è la stessa in tutti i SdR.

Introduzione alla Relatività Ristretta. 42
Domenico Galli

Invarianza della Velocità della Luce (II)

- Di conseguenza, la velocità della luce nel vuoto, **non rispetta** la composizione galileiana delle velocità.

$$\vec{v}' = \vec{c} \neq \vec{c} - \vec{V} = \vec{v} - \vec{V}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta. II parte. 43
Domenico Galli

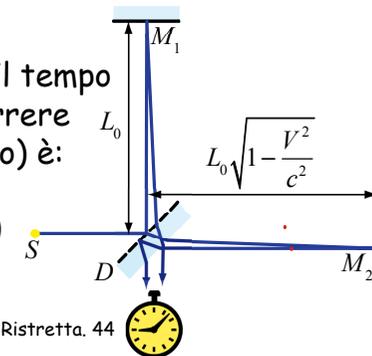
Dilatazione del Tempo

- Riconsideriamo l'esperienza di Michelson e Morley dal nuovo punto di vista (invarianza della velocità della luce nel vuoto).

- Consideriamo il braccio DM_1 , perpendicolare alla direzione del moto
 - Sicuramente **non si contrae**.

- Nel SdR dell'interferometro, il tempo impiegato dalla luce per percorrere il braccio DM_1 (andata e ritorno) è:

$$t = \frac{2L_0}{c} = \tau \quad (\text{tempo proprio})$$



Introduzione alla Relatività Ristretta. 44
Domenico Galli

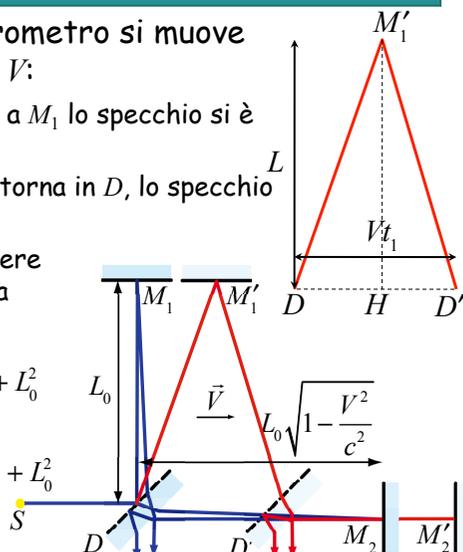
Dilatazione del Tempo (II)

- In un SdR in cui l'interferometro si muove verso destra con velocità V :

- Mentre la luce viaggia da D a M_1 lo specchio si è spostato da M_1 a M'_1 .
- Quando poi la luce da M'_1 ritorna in D , lo specchio D si è spostato da D a D' .
- La luce deve quindi percorrere i 2 tratti di egual lunghezza DM'_1 e M'_1D' :

$$\overline{DM'_1}^2 = \overline{DH}^2 + \overline{HM'_1}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L_0^2$$

$$\overline{M'_1D'}^2 = \overline{HD'}^2 + \overline{HM'_1}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L_0^2$$



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 45
Domenico Galli

Dilatazione del Tempo (III)

- Avremo perciò essendo c la velocità della luce **anche** nel SdR in moto rispetto all'interferometro:

$$\left(c \frac{t_1}{2}\right)^2 = \overline{DM'_1}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L_0^2$$

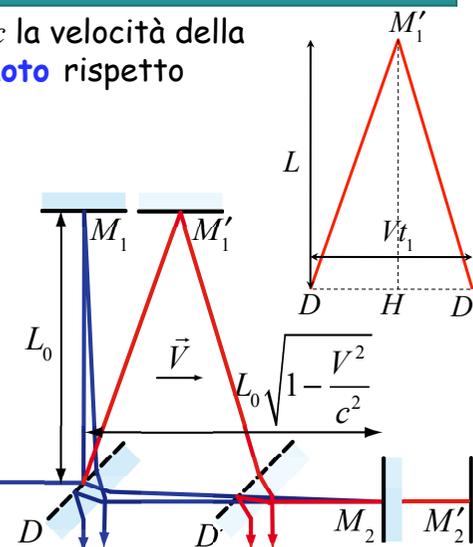
$$\left(c \frac{t_1}{2}\right)^2 = \overline{M'_1D'}^2 = \left(V \frac{t_1}{2}\right)^2 + L_0^2$$

$$c^2 \frac{t_1^2}{4} = V^2 \frac{t_1^2}{4} + L_0^2$$

$$c^2 t_1^2 = V^2 t_1^2 + 4L_0^2$$

$$(c^2 - V^2) t_1^2 = 4L_0^2$$

$$t_1 = \frac{2L_0}{\sqrt{c^2 - V^2}} = \frac{2L_0}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 46
Domenico Galli

Dilatazione del Tempo (IV)

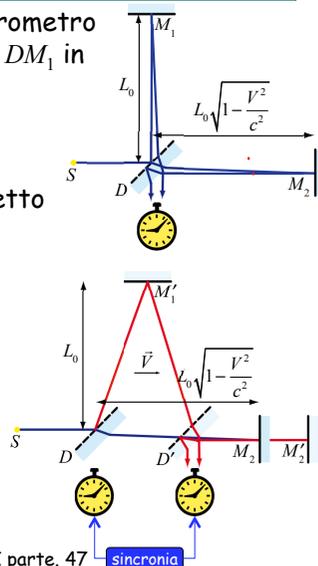
- L'osservatore in **quiete** rispetto all'interferometro misura un tempo (per percorrere il braccio DM_1 in andata e ritorno) pari a:

$$t = \frac{2L_0}{c} = \tau \quad (\text{tempo proprio})$$

- Un osservatore in **moto** con velocità V rispetto all'interferometro misura invece il tempo:

$$t' = \frac{2L_0}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > \tau$$

- Il **tempo** necessario per **percorrere il braccio** DM_1 dell'interferometro in andata e ritorno è **minore** nel SdR in cui l'interferometro è in **quiete**.



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 47
Domenico Galli

Dilatazione del Tempo (V)

- Il **tempo di percorrenza** di un **braccio** dell'interferometro può essere utilizzato come **tempo base** (tic-tac) per un **orologio** (analogamente all'oscillazione di un pendolo).

- Si può immaginare che una lampada **flash** invii un **lambo di luce** e che una **fotocellula** (posizionata vicino al flash) ne rilevi il tempo di ritorno dopo una riflessione su di uno **specchio**.

- Il **tempo misurato nel SdR dell'orologio** (**tempo proprio**, τ) è **minore** del tempo misurato in **ogni altro** SdR in moto rispetto all'orologio.

- L'**orologio** osservato in **movimento** è **più lento**.



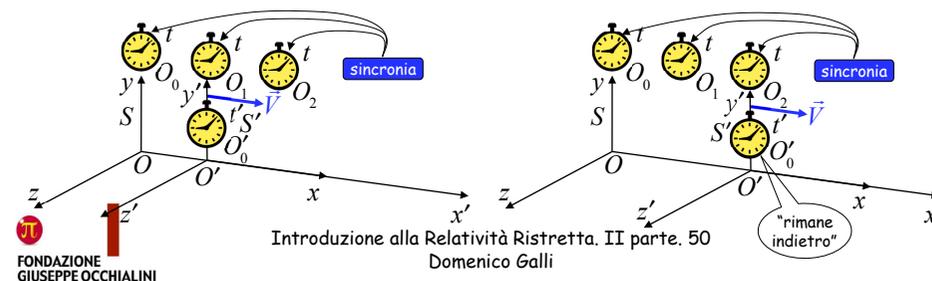
Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte. 48
Domenico Galli

Dilatazione del Tempo (VI)

- Potremmo ora pensare che questo **rallentamento** si osservi **soltanto negli orologi** che funzionano con un **raggio di luce** riflesso in uno specchio.
 - Potremmo pensare che un normale orologio a **pendolo**, oppure un orologio da polso a **bilanciere** o ancora un orologio al **quarzo** non subiscano tale rallentamento.
- Tuttavia, **se questo fosse vero, dal disaccordo** dei due orologi, potremmo **riconoscere**, se siamo **fermi** o siamo in **moto** traslatorio rettilineo uniforme, **contraddicendo il principio di relatività ristretta**.

Dilatazione del Tempo (VII)

- Se supponiamo che valga il **principio di relatività ristretta**, allora dobbiamo concludere, che **tutti** gli orologi, osservati da un sistema di riferimento in moto, sono **rallentati**.

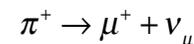


Dilatazione del Tempo (VIII)

- Se vale il principio di relatività ristretta, allora non ci deve essere **nessun modo** per potere **riconoscere** una **discrepanza** nella **misura del tempo** tra orologi o altri fenomeni di tipo diverso nello **stesso SdR**.
 - Non soltanto i fenomeni fisici, ma anche i fenomeni **biologici** debbono essere rallentati: il **cuore** deve battere più lentamente, deve essere più lento il **pensiero**, più lungo il tempo di sviluppo e di guarigione delle **malattie**, più lungo il tempo di **invecchiamento**, ecc.
- Se vale il principio di relatività ristretta, allora non soltanto la misura di particolari orologi, bensì il **tempo stesso** deve essere **rallentato** se osservato da un SdR in moto.

Vita Media dei Mesoni π^+

- Alcune particelle, denominate **pioni carichi**, una volta prodotte, vivono in media un certo tempo — detto **vita media** — dopo il quale **decadono** in **muoni** e **neutrini**:



- La **vita media propria** (cioè nel SdR della particella) τ dei pioni carichi vale $\tau = 2.5 \times 10^{-8}$ s.
- Mediante un acceleratore di particelle, un fascio di pioni può essere portato a una velocità pari al 99.995 % della velocità della luce nel vuoto.

Vita Media dei Mesoni π^+ (II)

- La loro vita media diventa quindi **100 volte più grande** della loro vita media propria:

$$t' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{2.5 \times 10^{-8} \text{ s}}{\sqrt{1 - 0.99995^2}} = \frac{2.5 \times 10^{-8} \text{ s}}{\sqrt{0.00009999}} =$$

$$= 100.001 \times 2.5 \times 10^{-8} \text{ s} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ s}$$

- Se non ci fosse la dilatazione dei tempi, i pioni percorrerebbero, prima di decadere, una distanza:

$$s = V\tau = 0.99995 \times 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s} \times 2.5 \times 10^{-8} \text{ s} = 7.5 \text{ m}$$

- A causa della dilatazione dei tempi, i pioni percorrono, prima di decadere, una distanza **100 volte maggiore**:

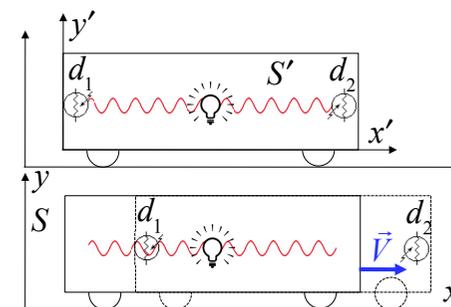
$$s = Vt' = 0.99995 \times 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s} \times 2.5 \times 10^{-6} \text{ s} = 750 \text{ m}$$

Simultaneità

- Una conseguenza del fatto che il tempo scorre diversamente in diversi SdR inerziali implica, in particolare, che **2 eventi simultanei in un SdR** possano **non essere simultanei in un altro SdR**.

- Accade se gli eventi sono **spazialmente distanti**.

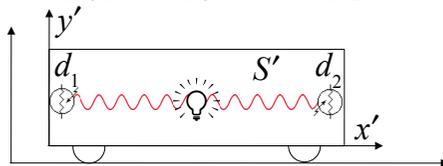
- Nel vagone in figura, una **lampada flash** al centro invia impulsi di luce alle **fotocellule**, d_1 e d_2 situate alle due estremità.



Simultaneità (II)

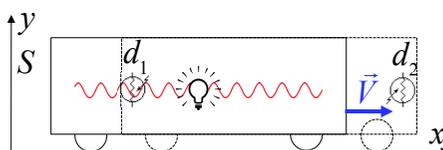
- SdR del **vagone** (S'):

- Poiché la lampada flash è equidistante dalle 2 fotocellule e la luce si muove alla stessa velocità c nelle due direzioni nel SdR del vagone, l'impulso di luce arriva **simultaneamente** sulle 2 fotocellule.



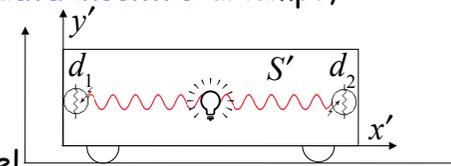
- SdR a **terra** (S):

- Poiché la lampada flash è equidistante dalle 2 fotocellule e la luce si muove alla stessa velocità c nelle due direzioni nel SdR a terra, ma il **vagone si sposta verso destra**, l'impulso di luce **non** arriva **simultaneamente** sulle 2 fotocellule. Arriva prima su d_1 e poi su d_2 .



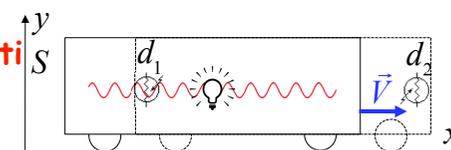
Simultaneità (III)

- In altre parole, nel **SdR a terra**, il lampo di luce, dopo un certo tempo, avrà percorso la stessa distanza sia verso destra, sia verso sinistra. Nello stesso tempo, però, la fotocellula d_1 è **andata incontro** al lampo, mentre la fotocellula d_2 si è **allontanata** dal lampo.



- L'arrivo del lampo alle due fotocellule è **simultaneo** nel SdR del **vagone** (S') ma **non è simultaneo** nel SdR a **terra** (S).

- La **simultaneità di 2 eventi distanti dipende dal SdR**.



Un'Asta in Moto si Contrae o si Allunga?

- Consideriamo un'asticella di lunghezza L_0 disposta nella direzione del suo moto.
- La **misura** della **lunghezza** dell'asticella richiede la determinazione **simultanea** della posizione delle sue **estremità**.
- Ci aspettiamo quindi che il risultato della **misura dipenda** dal fatto che le due estremità della sbarra siano misurate:
 - a. **simultaneamente** nel **SdR del laboratorio**;
 - b. **simultaneamente** nel **SdR della sbarra**.



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 57
Domenico Galli

Un'Asta in Moto si Contrae o si Allunga? (II)

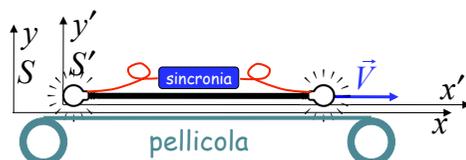
- Se fotografiamo l'asta illuminandola con un **flash**, tenendo **flash e pellicola in quiete nel SdR del laboratorio**:
 - stiamo misurando la posizione delle 2 estremità dell'asta **simultaneamente nel SdR del laboratorio**.



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 58
Domenico Galli

Un'Asta in Moto si Contrae o si Allunga? (III)

- Se invece mettiamo **sull'asta** (solidale a essa) un dispositivo **lampeggiatore**, collegato con **2 fili di ugual lunghezza** a due **lampade poste alle 2 estremità dell'asta** e con il lampo delle due lampade impressioniamo una **pellicola in quiete nel SdR del laboratorio**:
 - stiamo misurando la posizione delle 2 estremità dell'asta **simultaneamente nel SdR dell'asta**.



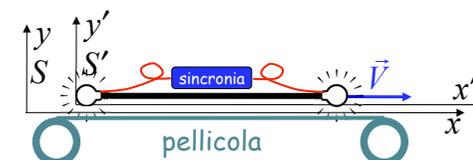
Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 59
Domenico Galli

Un'Asta in Moto si Contrae o si Allunga? (IV)

- Con il primo metodo (**simultaneità SdR laboratorio**) si osserva la **contrazione** di Fitzgerald-Lorentz:

$$L_{||} = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} < L_0$$
- Con il secondo metodo (**simultaneità nel SdR dell'asta**) si osserva un **allungamento**.

$$L_{||} = \frac{L_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > L_0$$



Introduzione alla Relatività Ristretta, II parte, 60
Domenico Galli

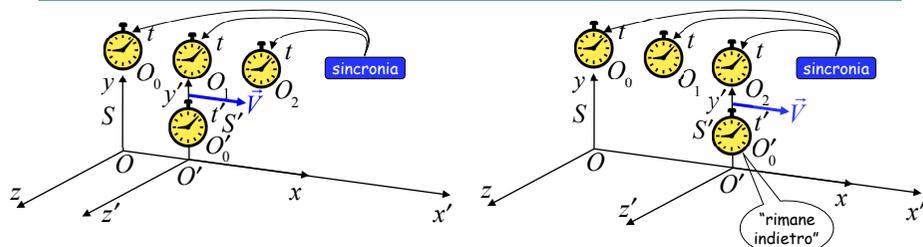
Quale Orologio Rimane Indietro?

- Consideriamo un SdR S' in moto relativo rispetto al SdR S .
- Un **orologio fisso in S'** è visto in moto da un osservatore in S il quale dunque lo vede rimanere indietro.
- Tuttavia è vero anche che un **orologio fisso in S** è visto in moto da un osservatore in S' il quale dunque lo vede rimanere indietro.
- Come si possono **conciliare** queste due affermazioni?
 - Qual è l'orologio che veramente rimane indietro rispetto all'altro?
 - Qual è l'orologio che invece va avanti rispetto all'altro?

Quale Orologio Rimane Indietro? (II)

- La chiave della risposta sta nel **procedimento di confronto degli orologi**.
- Per confrontare i tempi in un certo istante, occorre poter disporre di **due orologi che in quell'istante si trovano nella stessa posizione**:
 - Altrimenti non è possibile definire **univocamente** la **simultaneità** della misura del tempo da parte dei 2 orologi.
- Occorre dunque poter disporre, almeno in uno dei 2 SdR, di una **successione di orologi sincronizzati** tra loro.
 - P. es. mediante un dispositivo di sincronismo che comanda tutti gli orologi della successione mediante cavi elettrici della stessa lunghezza.
- Nell'altro SdR è sufficiente un **orologio singolo**.

Quale Orologio Rimane Indietro? (III)



- Rimane **indietro** l'**orologio singolo** che viene confrontato con la successione di orologi.

