MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9937745

RELATIVITÀ SPECIALE

• Trasf. di Galilei e relat. newtoniana

Per mandare segnali si usano onde elettromagnetiche (onda radio, luce) alla velocità della luce: $c = 2.9979 \cdot 10^8 \, m/s$.
Nel mondo macroscopico della mecc class. $\beta = \frac{v}{c} << 1$, ma le sue leggi non valgono quando $\frac{v}{c} \to 1$, poiché può anche essere $v > c$. L'esperienza dice che è imposs.
Nel 1905 Einstein pubblica rel. ristr. che spiega anche $\frac{v}{c} \to 1$ e di cui rel. Newton è caso particolare.
Evento fisico: accade indipendentemente da S.R., 4 coordd. x, y, z, t che dipendono dal S.R. Un S.R. inerziale è uno in cui vale 1° legge Newton, per il quale le stelle fisse lo erano. Un S.R. che ha $\vec{a} \neq 0$ rispetto a S.R. inerziale è non inerziale. La Terra è appross. inerziale come qualunque S.R. con $\vec{v}$ uniforme rispetto ad essa.
Pendolo di Foucault: pendolo che oscilla con deviazione piano di oscillazione (no all'Equat.), in realtà è la Terra che gira.
Cuglielmini: grave in caduta libera deviato verso est, a causa della v di rotazione della Terra che è maggiore quando più in alto si è, cioè maggiore del suolo.
Rel. ristretta $\Leftrightarrow$ S.R. inerziali
Rel. generale $\Leftrightarrow$ Tutti i S.R. (Einstein 1917)
Supponiamo 2 S.R. S e S', S' con $\vec{v}$ rispetto a S.
Quando $x = x' = 0 \Rightarrow t = t' = 0$ (calibrate lunghezze e orologi).
Per fisica classica intervalli di lunghezza e tempo assoluti, quindi per le Trasf. di Galilei:

$$\begin{cases} x' = x + vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \longrightarrow \text{Tra 2 eventi } P \text{ e } Q: \quad \begin{aligned} x_P' - x_Q' &= x_P + vt - x_Q - vt \\ t_P' - t_Q' &= t_P - t_Q \end{aligned}$$

Per la fisica classica anche la massa è costante.
Inoltre per le velocità: $u_x' = u_x - v$, $u_y' = u_y$, $u_z' = u_z$ cioè $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$. Per l'acc. $\vec{a}' = \vec{a}$ in tutti i S.R. inerziali, cioè $\vec{F}' = \vec{F}$ per 2ª legge. Allora le leggi del moto e della meccanica sono invariate in tutti i S.R. inerziali, ovvero valgono principi di conserv. anche con $\vec{v}$ diverse.
Perciò nessun esperimento eseguito in un solo rif. inerziale dà info sul moto di quel rif. rispetto a un altro, ovvero non si può determinare $\vec{v}$ assoluta di un rif. => non c'è rif. privilegiato => nessun rif. in quiete assoluta

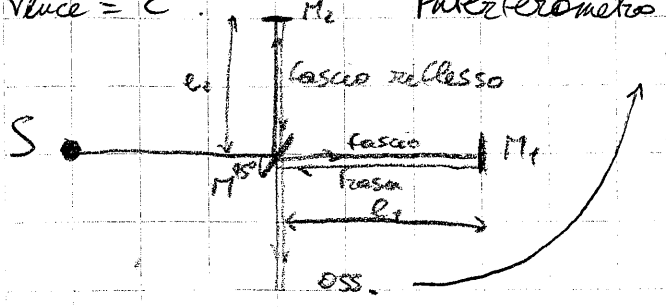
MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745

Elettromagnetismo e rel. newtoniana

Forze elettromagnetiche non sono lungo la congiungente delle cariche e dipendono da pos. e vel. Per le eq. di Maxwell le onde elettromagnetiche trasportano energia nello spazio vuoto e immagazzinata in campi elettrici e magnetici che si propagano in modo sinusoidale e ⊥ fra loro. Il mezzo di propag. della luce fu detto etere, poiché era impensabile che si propagassero nel vuoto (ad es. onde sonore). Etere ha densità nulla, trasparenza, riempie tutto lo spazio, v della luce $= c$, ma non si rivelava.
Se etere = S (S.R. inerziale) e S' sistema con v rispetto a S, per la luce $v' = c - v$ o $v' = c + v$. Quindi c non è invariante per una trasf. di Galilei, se lo fosse ci sarebbe un solo S.R. in cui $v_{luce} = c$ cioè l'etere è in riposo. Avremmo quindi un rif. assoluto.
Dunque, o esiste un rif. privilegiato oppure Galilei o Maxwell sbagliavano.

Esp. di Michelson-Morley (1887)

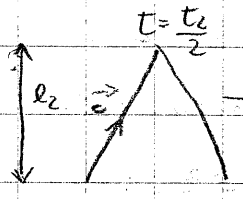
Misura di v_{luce} in vari S.R. inerziali per vedere se solo nell'etere $v_{luce} = c$. Interferometro di Michelson.



Si ha interferenza. Se i due fasci sono quasi ⊥ si osservano frange.
La Terra si muove con velocità $v = 30 \frac{Km}{s}$ rispetto a etere.

Calcoliamo la differenza di fase:

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1 c}{c^2-v^2} = \frac{2l_1}{c}\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$



$$2\sqrt{l_2^2 + \left(\frac{vt_2}{2}\right)^2} = ct_2 \Rightarrow t_2 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2l_2}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

S.R. t_1 = apparato S.R. t_2 = etere $\leftrightarrow$ $t' = t$ per fisica classica, c'è dipendenza da v/c. Si ha:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2}{c}\left(\frac{l_1}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{l_2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right).$$

Se ruotiamo di 90° l'apparato i 2 fasci si scambiano i cammini.

$$\Delta t^* = \frac{2}{c}\left(\frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - \frac{l_2}{1-\frac{v^2}{c^2}}\right), \text{ cioè } \Delta t^* - \Delta t = \frac{2}{c}(l_1+l_2)\left[\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right] \overset{\text{sviluppo per } \frac{v}{c}\to 0}{\Rightarrow}$$

$$\Delta t^* - \Delta t = \frac{2}{c}(l_1+l_2)\left(1+\frac{v^2}{c^2} - 1 - \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{l_1+l_2}{c}\frac{v^2}{c^2}.$$

Se cambia Δt si dovrebbero spostare le frange. Se ΔN è n° frange, λ lungh. d'onda e $T = \frac{\lambda}{c}$ periodo di vibrazione si ha $\Delta N = \frac{\Delta t^* - \Delta t}{T} = \frac{l_1+l_2}{\lambda}\frac{v^2}{c^2}$

Per $\lambda = 5.9\ 10^{-7}$ m e $l_1 + l_2 = 22$ m si dovrà osservare uno spostamento di 4 decimi di frangia. Michelson e Morley lasciarono l'apparato libero di ruotare sul mercurio, ma non fu rilevato nessun ΔN. Dunque non si rivela il moto attraverso l'etere: la Terra è come se fosse un qualunque S.R. in quiete rispetto all'etere. (Cedarholm confermò con esp. con microonde che se Terra si muove nell'etere, avrebbe v inferiore 1/1000 di quella che è). Dunque vuoto = c in tutte le direzioni e tutti i S.R. inerziali sono uguali per prop. luce. Non c'è rif. privilegiato e leggi elettromagn. giuste => Trasf. di Galilei vanno sostituite, leggi meccanica modificate.

<u>I postulato della rel. ristretta</u>

Einstein ebbe approccio operazionale: ogni quantità deve essere definita con preciso modo di misura. $t = t'$ non era giustificata operativamente.

I 2 postulati sono:
Relatività: leggi (di tutta la fisica (non solo meccanica)) invarianti nei S.R. inerziali.
Costanza vuoto: c in tutti i S.R. inerziali

MASTER COPY
Tel. 050 831 2126
Cell. 388 9837745

c è v limite per corpi materiali e segnali fisici. Bisogna trovare nuove leggi di Trasf. e esaminare leggi della fisica, generalizzando quelle non invarianti.

MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745

Relatività della simultaneità

Supponiamo 2 eventi A e B nello stesso punto in un S.R. Se un orologio in quel punto registra stesso istante, A e B sono simultanei. Ora A e B in punti diversi e un orologio in ogni punto. Gli orologi devono essere sincronizzati. Metodo errato: A guarda i 2 orologi e segnano lo stesso tempo. In realtà ci vuole tempo perché la luce arrivi da B ad A, dunque c'è ritardo di $\frac{2L}{c}$. Metodo quasi giusto: sincronizzarli in punto e portarli al luogo dell'evento, anche se il moto potrebbe influenzare ritmo. Metodo usato: si posizionano gli orologi e si inviano segnali con onde elettromagnetiche, la cui v è la più alta, ovvero A accende luce a $T_A = 0$ e B quando riceve il segnale pone l'orologio a $t_B = \frac{L}{c}$. Si può anche mettere luce nel mezzo e quando arriva segnale porre $t = 0$. Ora si ~~possono~~ può giudicare l'ordine degli eventi: 2 eventi sono simultanei se gli orologi nei luoghi degli eventi segnano lo stesso tempo, cioè se i segnali raggiungono l'osservatore nello stesso istante. Ora mettiamoci in diversi S.R. inerziali. Se in un S.R. 2 eventi sono simultanei, in un altro che si muove rispetto al primo no $\Rightarrow$ simultaneità relativa

S' in moto rispetto a S. Se



per S gli eventi A e B ~~coincidono~~ sono simultanei e quando avvengono AA' e BB' coincidono, nel tempo che i segnali arrivano ad O, O' si sposta a dx, dunque BB' arriva in O' prima che in O, AA' prima in O. Per S eventi simultanei, per S' BB' prima di AA'. Non rif. privilegiato quindi simultaneità è relativa.

Se v segnale = ∞ sarebbe assoluta. Poiché $v \neq \infty$, ci deve essere v limite. Pertanto: misurare lunghezza = localizzare simultaneamente i suoi estremi $\Rightarrow$ lunghezza dipende dal S.R.

Anche ritmo orologi è relativo poiché lo sono intervalli di tempo. Per questo Vmax è la stessa per tutti.

Principio di relatività

In meccanica, l'interazione di particelle materiali si propaga istantaneamente ed è descritta da e. pot. d'interazione che dipende solo da posizione. Ma non esistono interazioni istantanee (c è v limite), dunque c'è v max di propag. dei segnali. Per rel. essa è c in tutti i S.R. Se $v \ll c$, si può applicare meccanica classica.

Eq. di trasf. di Lorentz

Sostituiscono le eq. di Galilei, si basano su rel. trasf. e su ipotesi che spazio e tempo sono omogenei (misure non dipendono da posizione o istante), 2) spazio isotropo. Per la 2) prendiamo S' in moto solo lungo x e per la 1) le eq. devono essere lineari:

$x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t$

$y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}t$

$z' = \dots$

$t' = \dots$



Poiché gli assi x e x' coincidono, per $y=z=0$ si ha sempre $y'=z'=0$ cioè $\begin{cases} 0 = a_{21}x + a_{24}t \\ 0 = a_{31}x + a_{34}t \end{cases}$ che ha soluzione $\neq 0$ solo se i coeff. sono nulli.

Analogamente i piani $y=0$ e $z=0$ vanno in $y'=0$ e $z'=0$ $\begin{cases} 0 = a_{23}z \\ 0 = a_{32}y \end{cases}$. Rimane $\begin{cases} y' = a_{22}y \\ z' = a_{33}z \end{cases}$.

Se misuro asta lunga 1 su y, $\Rightarrow y' = a_{22}$. Se la misuro su $y' \Rightarrow y = 1/a_{22}$. Per la relatività le 2 misure (a riposo entrambe) $\frac{1}{a_{22}} = a_{22} \Rightarrow a_{22} = 1$, poiché non ci sono rif. equivalenti. Allo stesso modo $a_{33} = 1$.

t' non può dipendere da y e z. Se lo facesse, 2 orologi sincronizzati in $(0, y, 0)$ e $(0, -y, 0)$ sarebbero in disaccordo in S'.

MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745