

Radiazione e Relativita' Ristretta

III – Spazio-tempo, 'paradossi' della Relativita' Ristretta

'Paradossi' e logica scientifica

Aspetti paradossali di alcune conseguenze della meccanica relativistica

Paradossale significa press'a poco 'internamente contraddittorio', e anche/oppure 'in contrasto con l'evidenza'

Nessuno di questi aspetti si ritrova nelle predizioni della RR!
Perfettamente coerenti, con la loro logica interna e con i dati sperimentali

Ma: spesso in forte contrasto con l'intuizione, o senso comune. Perché?
Il senso comune è costruito sull'esperienza comune, che non coinvolge gli effetti di velocità $\sim c$

Quindi: non sono paradossi, ma conclusioni sorprendenti

Un elenco molto parziale...

Contrazione delle lunghezze e dilatazione dei tempi

Paradosso degli orologi, o dei gemelli

Asta e garage

Andromeda

Quasi sempre legati a relatività della simultaneità, a sistemi di riferimento non inerziali, o a confusione fra sistemi di riferimento.

Per investigarli meglio: diagrammi spazio-temporali

Intervallo

Intervallo fra eventi: invariante rispetto a TdL

$$\begin{cases} ct_1, x_1, y_1, z_1 \\ ct_2, x_2, y_2, z_2 \end{cases}$$

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

Tipi di intervallo:

Tipo tempo: $c^2 \Delta t^2 > \Delta r^2$

Tipo spazio: $c^2 \Delta t^2 < \Delta r^2$

Tipo luce: $\Delta s^2 = 0$

TdL non puo' invertire ordine temporale

Eventi possono essere connessi causalmente

Eventi non possono essere connessi causalmente

TdL puo' invertire ordine temporale



Le linee rosse delimitano il cono-luce

Diagramma di Minkowski - I

Rappresentazione geometrica della TdL:

S e S' come al solito, vel. relativa u lungo asse x, x'

Asse ct' = insieme degli eventi che avvengono nell'origine di S' : $x'=0$

Asse x' = insieme degli eventi che avvengono all'istante iniziale di S' : $t'=0$

Allora, usando le TdL:

Asse ct' : $x' = 0 \rightarrow x = ut = (u/c)ct \rightarrow u/c = \text{tangente angolo fra asse } ct' \text{ e asse } ct$

Asse x' : $t' = 0 \rightarrow x = c^2 t/u = (u/c)^{-1} ct \rightarrow u/c = \text{cotangente angolo fra } x' \text{ e asse } ct$

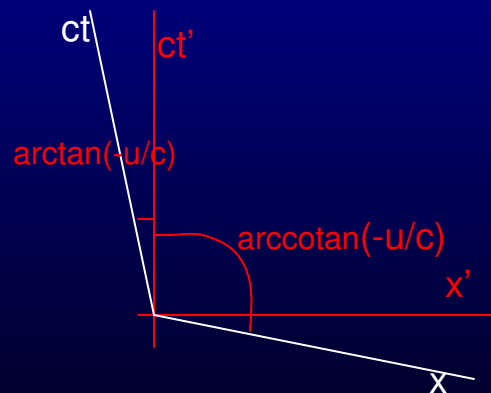
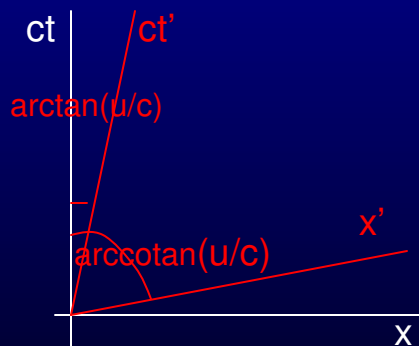
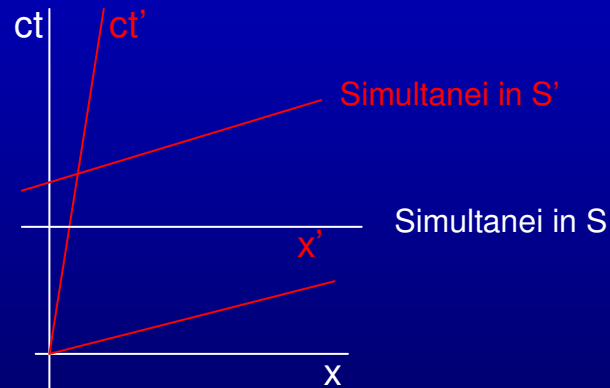


Diagramma di Minkowski - II

Evidenza geometrica della relatività della simultaneità



Il luogo geometrico di un insieme di punti-eventi simultanei non è lo stesso in tutti i SRI...

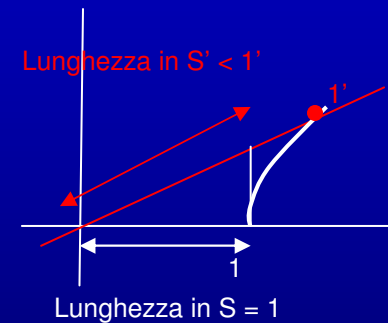
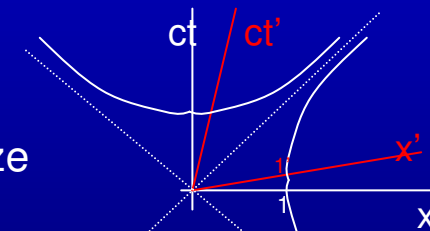
Diagramma di Minkowski - III

Eq. di iperbole equilatera nel piano x, ct

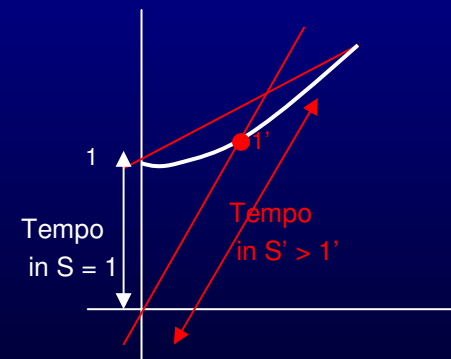
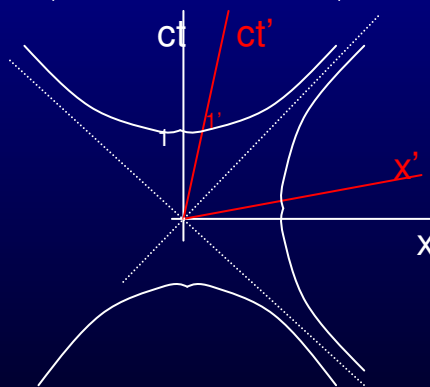
$$c^2 t^2 - x^2 = \text{cost}$$

→ Luogo eventi a intervallo unitario risp. ad origine $c^2 t^2 - x^2 = \pm 1$

Evidenza geometrica per
contrazione delle lunghezze

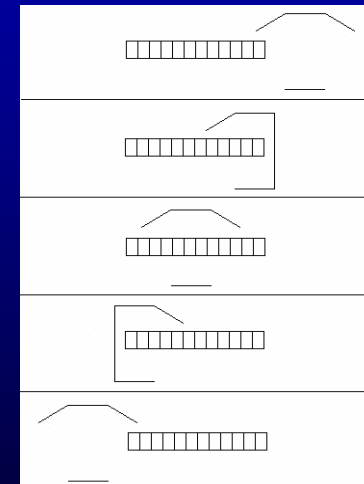
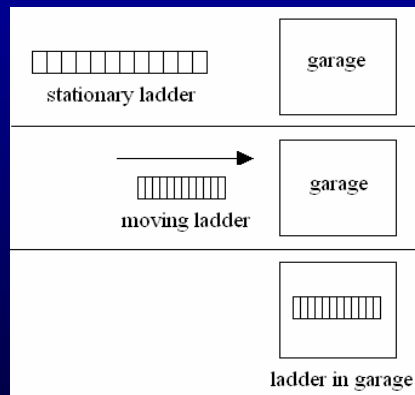


Evidenza geometrica per
dilatazione dei tempi



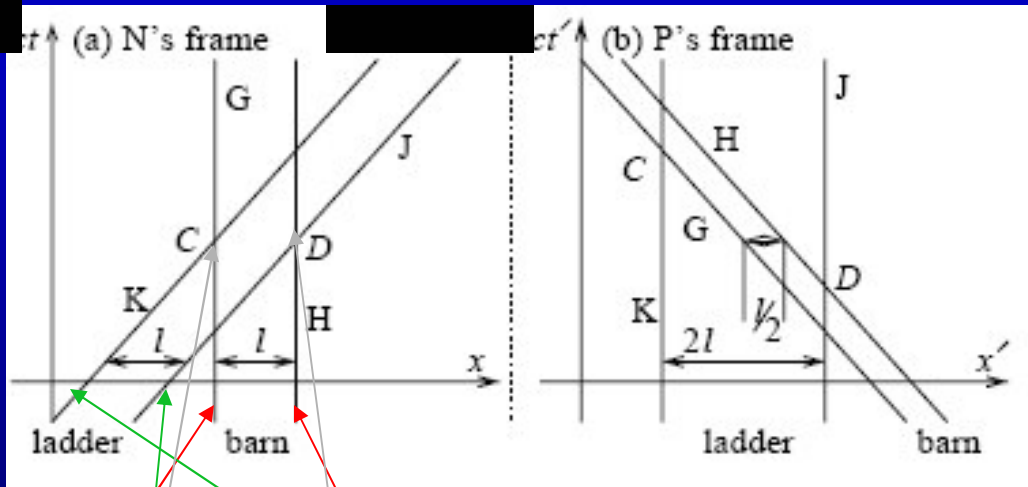
La scala e il garage -I

Un operaio corre con una scala di lunghezza L (nel suo SRI di quiete), ed entra in un garage lungo $L/2$ (nel SRI di quiete della baracca), con porte aperte sul fronte e sul retro che si chiudono per un istante 'quando la scala e' all'interno'. Se l'operaio corre con velocita' $v=0.9c$, la contrazione delle lunghezze dovrebbe consentire alla scala di rientrare completamente nel garage durante la chiusura istantanea e simultanea delle porte. Ma se guardiamo le cose dal SRI di quiete della scala, e' il garage ad essere contratto, e la scala non dovrebbe poterci entrare. ???



Gli eventi F e R, simultanei in S (garage), non lo sono in S' (scala). In S', la porta F si chiude dopo che si chiude la porta R

La scala e il garage -II



Porta fronte Porta retro
Inizio scala Fine scala
Chiusura fronte Chiusura retro

Riferimento:
Garage in quiete

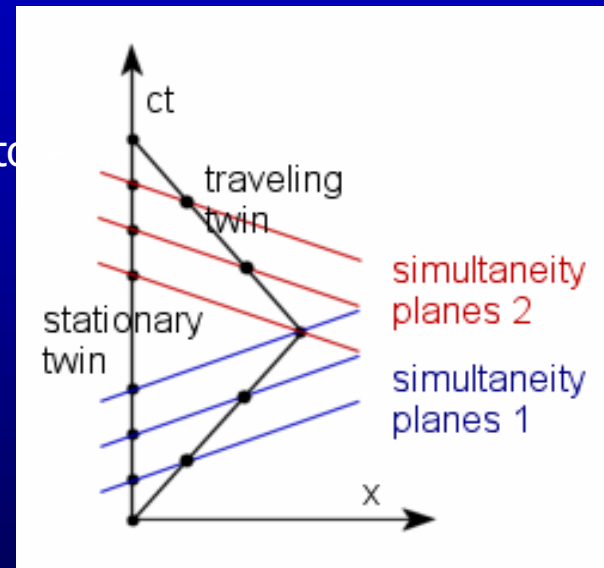
Riferimento:
Scala in quiete

Gli orologi, o i gemelli - I

Due gemelli, od orologi identici, vengono separati: uno resta sulla Terra, l'altro viaggia a grande velocità per n anni; poi inverte la marcia, e viaggia per altri n anni fino a tornare sulla terra. A questo punto, a causa della dilatazione dei tempi, il gemello viaggiatore è più giovane dell'altro!

'Paradosso': e dal punto di vista del gemello viaggiatore ??

Risposta: il suo SR non è sempre inerziale...



Gli orologi, o i gemelli - II

‘Paradosso’ scoperto (e risolto) da Einstein, Langevin e altri all’inizio di tutta la storia

Origine di un fiume in piena: incomprensioni, malintesi, dibattiti filosofici (quasi mai fondati su qualcosa) oltre che di un’infinita’ di racconti fantascientifici

In realta’, *all’interno del sistema di principi e concetti della relativita’ ristretta*, nulla di paradossale o illogico

Inoltre: *ben verificato sperimentalmente* (v. dopo)

Gli orologi, o i gemelli - III

L'asimmetria fra i due orologi, o gemelli, nasce quindi dal fatto che il sistema di riposo del gemello 'viaggiatore' non e' un SRI

Un paio di osservazioni e commenti:

- Non saltare subito alla conclusione! *L'orologio del "gemello viaggiatore" non rallenta come effetto delle accelerazioni...*

- L'asimmetria assume che esistano SRI: *se l'universo fosse costituito dai soli orologi A e B, la situazione sarebbe perfettamente simmetrica, e non ci sarebbe differenza nel tempo segnato dai due. Ma i SRI esistono, almeno con ottima approssimazione (v. Terra)...*

In questo caso, non esisterebbero accelerazioni assolute!

O invece esisterebbero comunque? Questione delicata e tuttora controversa...

E quindi le accelerazioni sembrano essere assolute...C'e' un principio di relativita' per i SRNI? Qual e' l'origine delle forze fittizie nei SRNI? Principio di Mach??...

Ma e' proprio vero ???

J.C. Hafele and R. E. Keating, Science 177, 166 (1972)

During October, 1971, four cesium atomic beam clocks were flown on regularly scheduled commercial jet flights around the world twice, once eastward and once westward, to test Einstein's theory of relativity with macroscopic clocks. From the actual flight paths of each trip, the theory predicted that the flying clocks, compared with reference clocks at the U.S. Naval Observatory, should have lost 40+/-23 nanoseconds during the eastward trip and should have gained 275+/-21 nanoseconds during the westward trip ... Relative to the atomic time scale of the U.S. Naval Observatory, the flying clocks lost 59+/-10 nanoseconds during the eastward trip and gained 273+/-7 nanosecond during the westward trip, where the errors are the corresponding standard deviations. These results provide an unambiguous empirical resolution of the famous clock "paradox" with macroscopic clocks

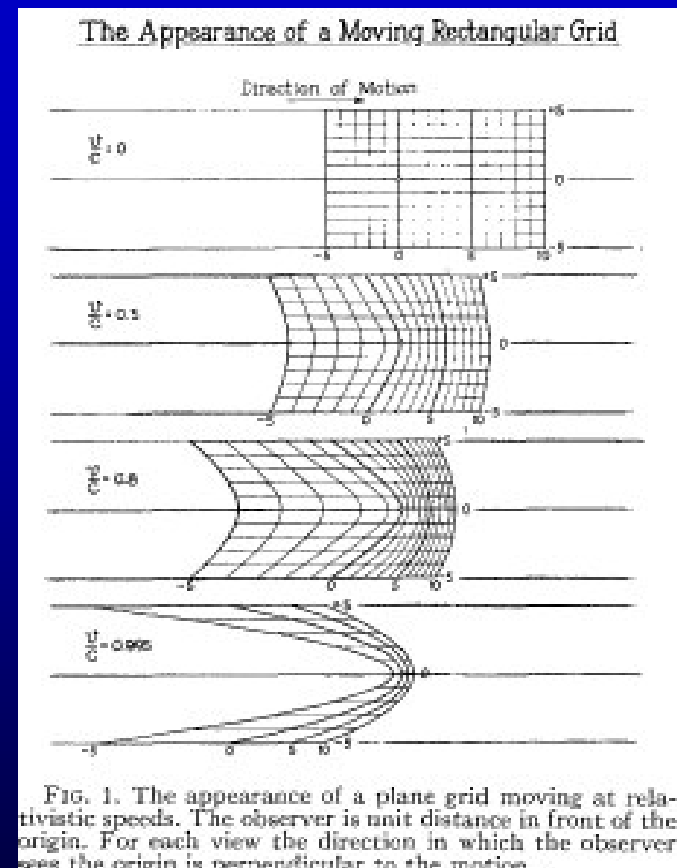
Predicted:	Time difference in ns	
	Eastward	Westward
Gravitation	144 +/- 14	179 +/- 18
Kinematic	-184 +/- 18	96 +/- 10
Net effect	-40 +/- 23	275 +/- 21
Observed:	-59 +/- 10	273 +/- 21

Visibilita' della contrazione di Lorentz

La contrazione di Lorentz e' un fenomeno fisico non ambiguo, i cui effetti sulle misure non sono in questione (v. esempio del decadimento dei muoni cosmici).

Ma: si potrebbe davvero *vederla* in azione, p.es. fotografando – se fosse tecnicamente possibile – un oggetto in moto ad alta velocita'?
Attenzione: *vedere* e' una cosa diversa da *misurare*...
Misurare gli effetti della contrazione e fotografare un oggetto contratto sono operazioni diverse: nell'atto della visione entrano in gioco i tempi di arrivo della luce dalle diverse parti dell'oggetto in movimento, che modificano gli effetti della pura contrazione.

Esempio semplice di questo effetto:



Cosa si puo' prevedere?

Si puo' fare una trasformazione analitica per la visualizzazione di oggetti che compaiono in una foto in un SRI in moto con velocita' elevata. Ecco un esempio di risultato:



Figure 10: Flight through Yosemite Valley with $\beta = 0.95$.