

Le convinzioni/criticità della fisica classica

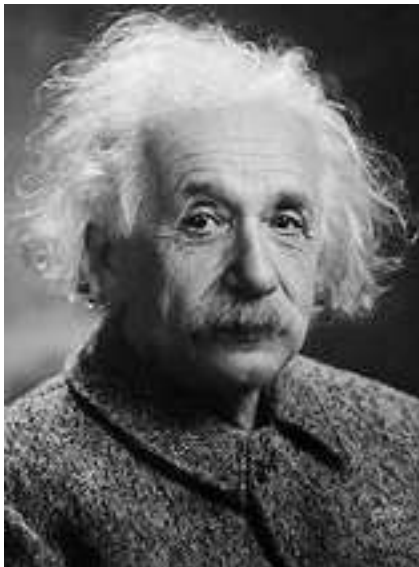
- Il tempo , inteso come misurazione assoluta **NO!**
- La velocità della luce , come tutte le velocità , deve sottostare alle trasformazioni di Galileo (valide per tutta la meccanica classica) **NO!**
- I corpi sono , essenzialmente continui con la materia uniformemente distribuita **NO!**
- Le onde elettromagnetiche hanno una natura ondulatoria cioè sono onde che si propagano **NO!**

**Relatività
Speciale
Meccanica
quantistica**

La Relatività

***La Relatività
Ristretta - RR
(1905)***

***La Relatività
Generale - RG
(1915)***



***"E' più importante l'immaginazione
del sapere"***

Gedankenexperiments

A. Einstein (1879 – 1955)

L'essenza della relatività ristretta



La fisica è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali

La Relatività ristretta

La tempesta perfetta !!

L' intelaiatura teorica

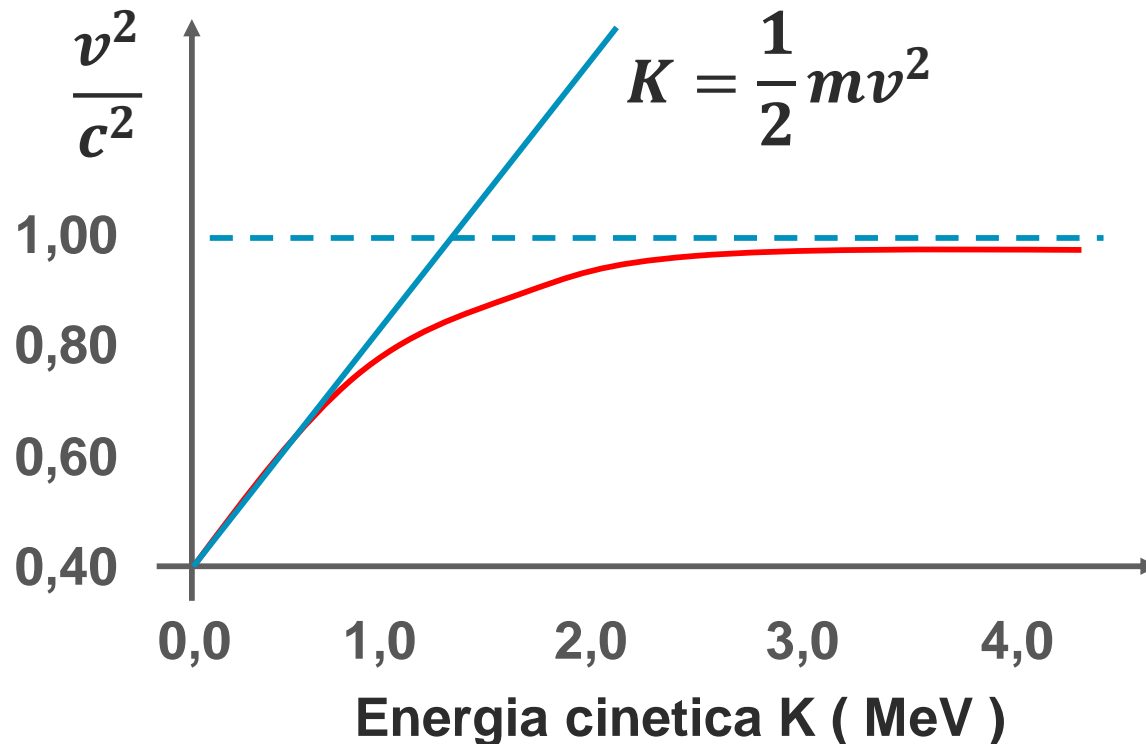
- **L'Etere non esiste**
- **Solo per i sistemi di riferimento inerziali. No accelerazioni**
- **Interpretazione fisica delle trasformazioni di Lorentz**
- **Spazio/tempo e energia/massa sono indissolubilmente legati**
- **Il comportamento dell'universo alle alte velocità**

I due postulati cardine

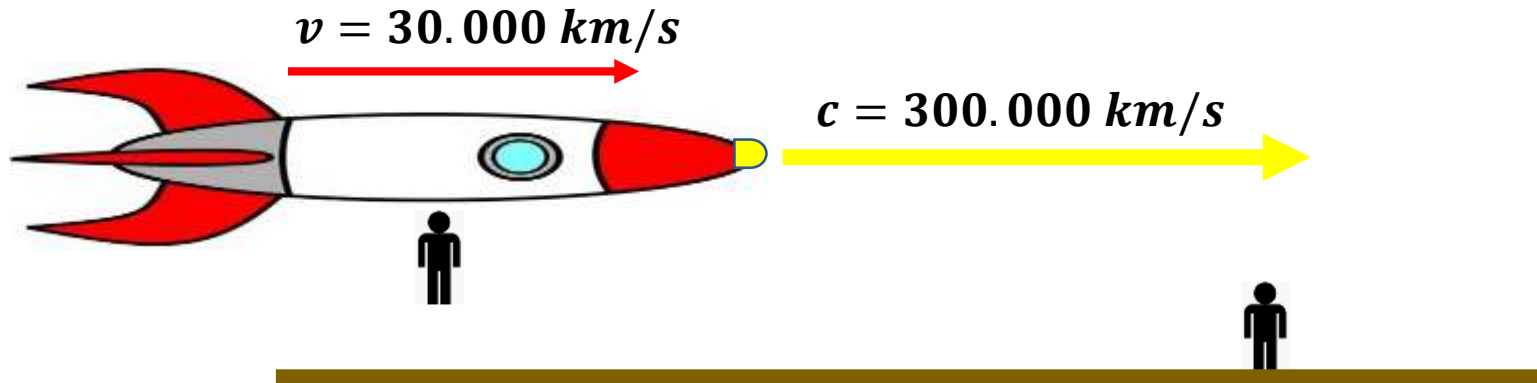
- 1. Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali**
- 2. Velocità della luce nel vuoto: è la stessa in tutte le direzioni ed in tutti i sistemi di riferimento inerziali ed è la massima velocità raggiungibile in tutto l'universo ma non da corpi dotati di massa**

La velocità della luce è la massima possibile

Dati ottenuti empiricamente (esperimento di Bertozzi – 1963) dove sono state accelerate diverse particelle dotate di massa raggiungendo velocità prossime a quella della luce



Il punto critico – la velocità della luce



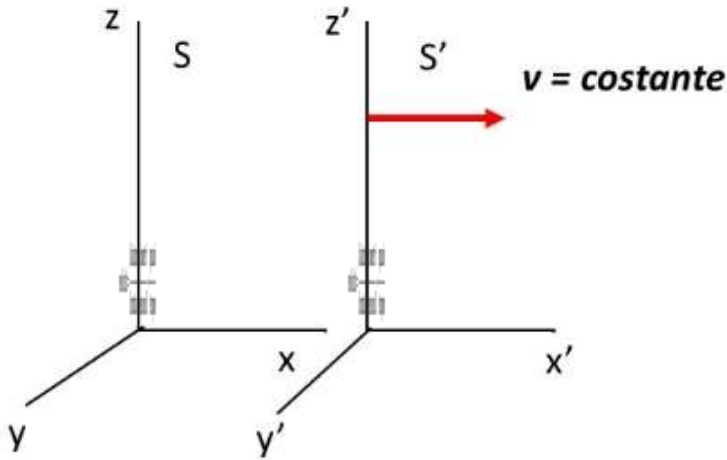
$$c' = c + v = 330.000 \text{ km/s} \quad \text{NO!}$$

- Inconciliabile con i dati sperimentali e con le equazioni di Maxwell
- Sempre 300.000 km/s in qualsiasi sistema di riferimento inerziale

La pensata di Einstein - il concetto di velocità

$$velocita' = \frac{\text{distanza in metri}}{\text{durata in secondi}} \rightarrow \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}}$$

$$velocita' \text{ luce} = c = \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}} \text{ indipendentemente dal moto degli osservatori}$$



- S ed S' misurano spazi e tempi diversi
- Il tempo non è più assoluto
- Spazio e tempo diventano un'unica entità fisica → lo SPAZIO-TEMPO

Il tempo



La persistenza della memoria (1931) – Salvador Dalí

Il concetto di simultaneità

- **Evento** : qualcosa che accade in una certa posizione in un dato istante → 4 coordinate (tre spaziali ed una temporale)
- **La simultaneità può essere un concetto assoluto?**
- **Cosa succede a due osservatori in moto relativo che osservano due eventi ? Potrebbero asserire entrambi che sono simultanei ?**

La costanza della velocità della luce implica che:

La simultaneità è relativa e dipende dallo stato di moto dell' osservatore

La percezione della realtà



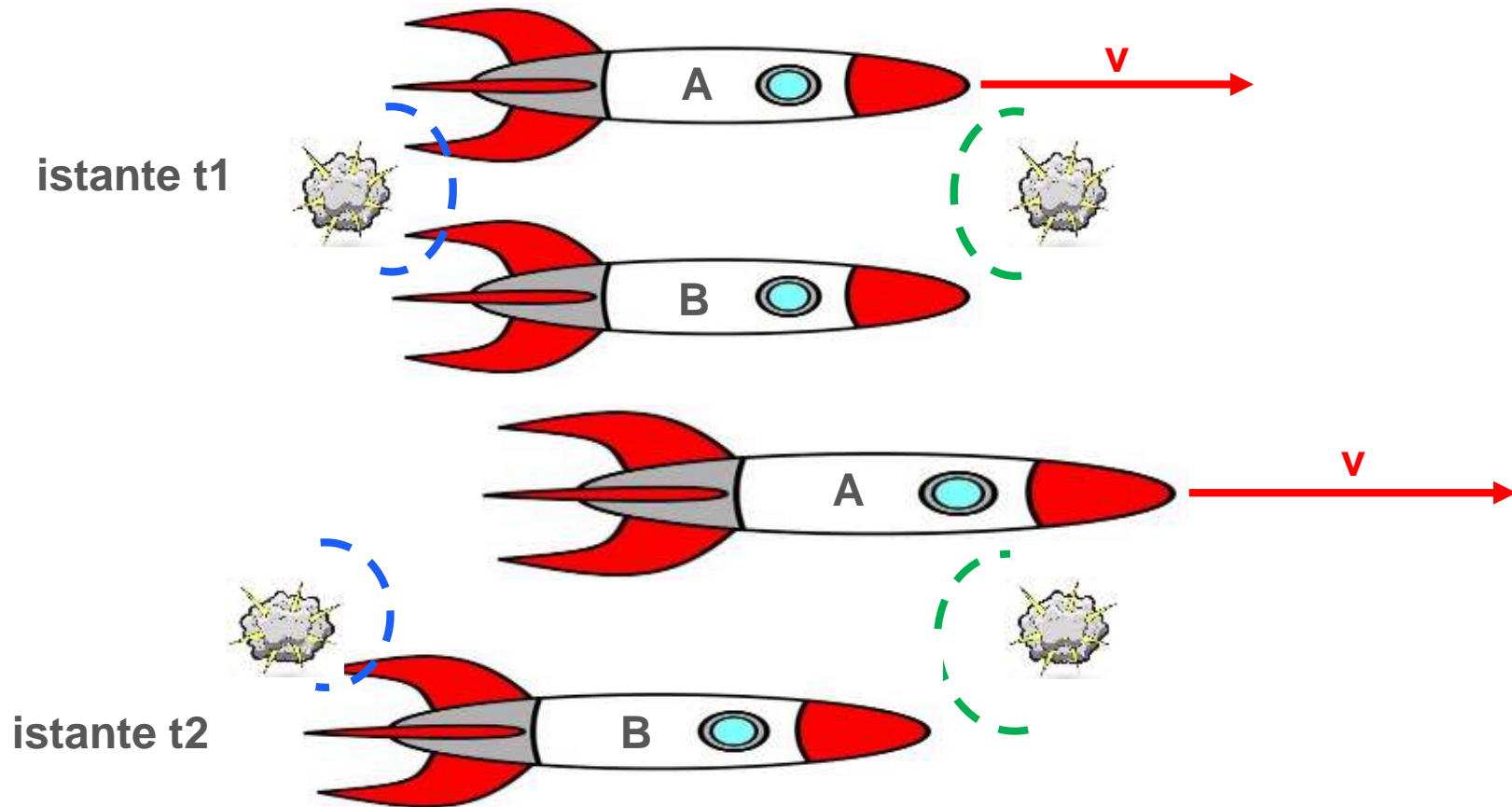
Realtà

Lampo e tuono simultanei

Percezione della realtà

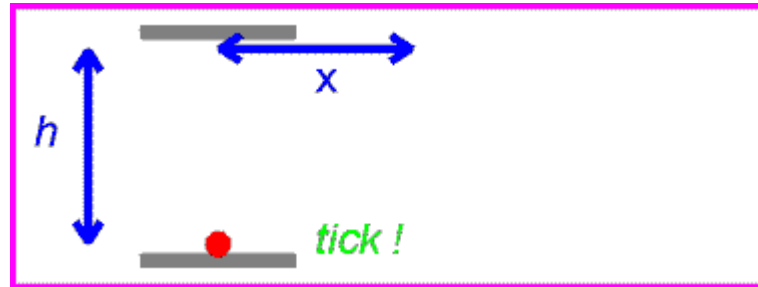
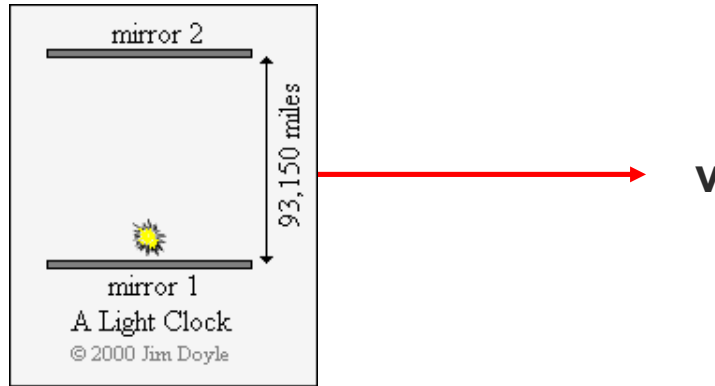
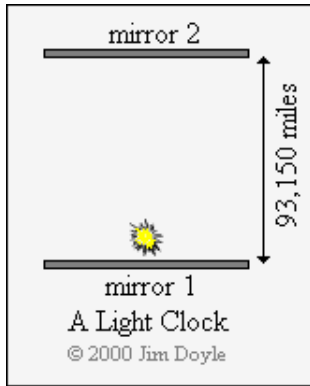
Lampo e tuono NON simultanei

La simultaneità è relativa

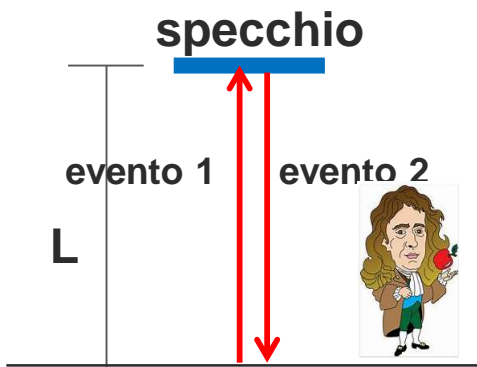
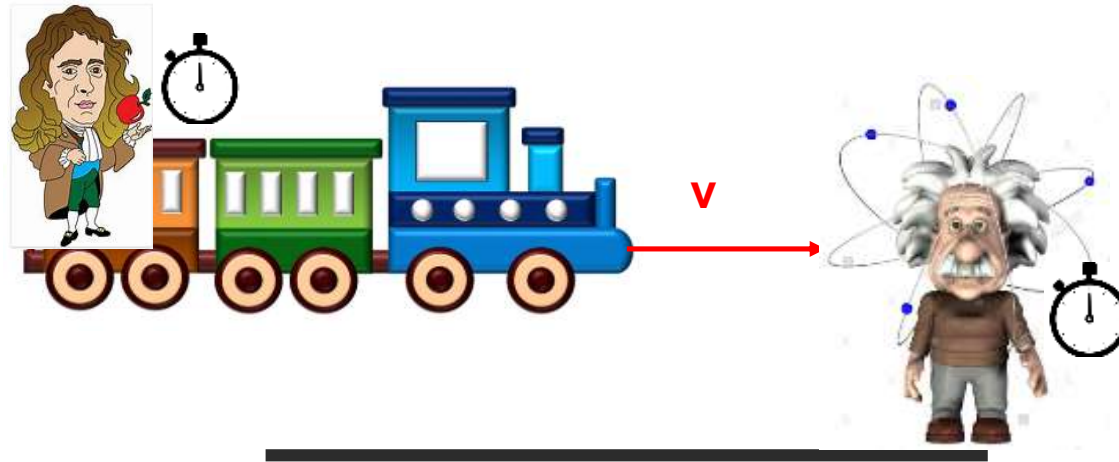


... la conseguenza primaria è che il moto influisce sulla percezione dello scorrere del tempo

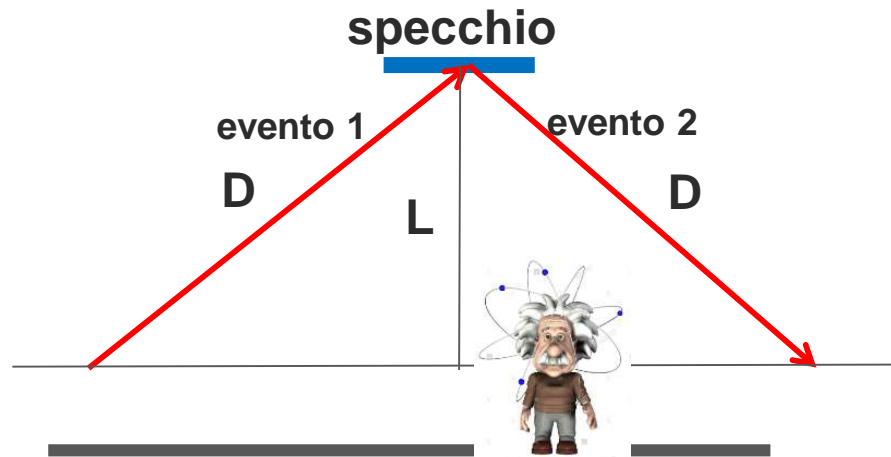
L'orologio a luce



Dilatazione del tempo



$$t_{ISACCO} = \frac{2L}{c} \quad (tic - tac)$$



$$t_{ALBERT} = \frac{2D}{c} \quad (tic - tac)$$

La dilatazione dei tempi

$$\frac{t_{ALBERT}}{t_{ISACCO}} = \frac{\frac{2D}{c}}{\frac{2L}{c}} = \frac{2D}{c} \frac{c}{2L} = \frac{D}{L}$$

Durata temporale tra due eventi misurata in tic-tac :

- **tic-tac più lungo** → meno tempo trascorso
- **tic-tac più breve** → più tempo trascorso

$$\frac{t_{ALBERT}}{t_{ISACCO}} = \frac{c \cdot 2D}{c \cdot 2L} = \frac{D}{L} = 5 \rightarrow t_{ALBERT} = t_{ISACCO} \cdot 5$$

tempo trascorso orologio



= 5 minuti

tempo trascorso orologio



= 1 minuto

Dilatazione del tempo

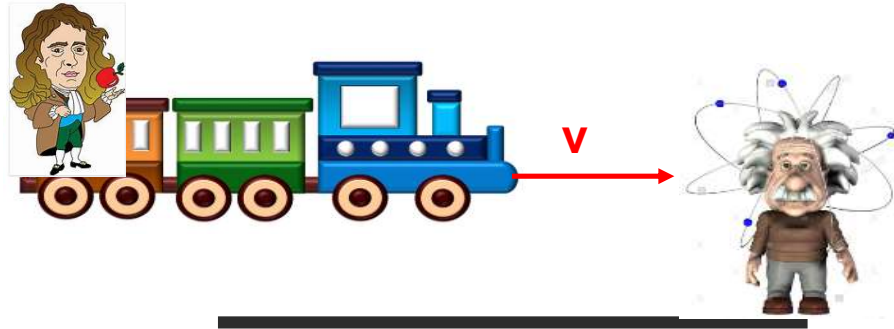
UN OROLOGIO IN MOTO TICCHETTA PIU' LENTAMENTE

1. Chi si muove con l'orologio realizza che sta ticchettando più lentamente ?
2. Perché noi non realizziamo lo scorrere più lento del tempo negli orologi che si muovono intorno a noi ?

http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/Applets/Lightclock/home.html

3. Di quanto ticchetta più lentamente ?

La dilatazione dei tempi



$$\frac{t_{ALBERT}}{t_{ISACCO}} = \frac{D}{L}$$

$$t_{ALBERT} = \gamma \cdot t_{ISACCO}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$\gamma =$ *fattore di Lorentz*

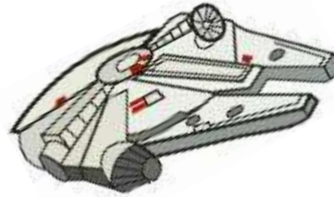
RELATIVITAPP: La Relatività Ristretta – La dilatazione del tempo

Velocità – fattore γ

Oggetto	V(km/ora)	V(m/s)	beta= V/c	γ
Laboratorio	0	0	0	1
Concorde	2.400	667	2,2E-06	1,0000000000
Aereo X15	7.300	2.028	6,8E-06	1,0000000000
Satellite GPS@26500 km	13.800	3.778	1,3E-05	1,0000000001
Terra/Sole	108.000	30.000	1,0E-04	1,0000000050
Sole/galassia	828.000	230.000	7,7E-04	1,0000002939
	1.000.000	300.000	1,0E-03	1,0000005000
		3.000.000	1,0%	1,00005
		30.000.000	10%	1,00504
		90.000.000	30%	1,04828
		150.000.000	50%	1,2
	338.000.000	260.000.000	88,7%	2,0
			94,1%	3,0
			95,0%	3,2
			97,0%	4,1
			98,0%	5,0
			99,0%	7,1
			99,5%	10,0
			99,80%	15,8
			99,85%	18,3
			99,90%	22,4
Muoni atmosferici			99,92%	25,0
			99,97%	40,8
			99,99%	70,7
			99,995%	100
			99,999%	224
			99,9998%	500
			99,999900%	707
Protoni LHC - CERN		299.792.455	99,999999%	7071
Luce nel vuoto		299.792.458		∞

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Dilatazione del tempo -- fantasia



$$v = 0,999c$$



$D = 6,5$ miliardi di Km

base galattica

$$\text{Terra} \rightarrow t = \frac{D}{v} = 135 \text{ ore}$$

$$t = \gamma t_0$$

$$\text{Ian Solo} \rightarrow t_0 = ???$$

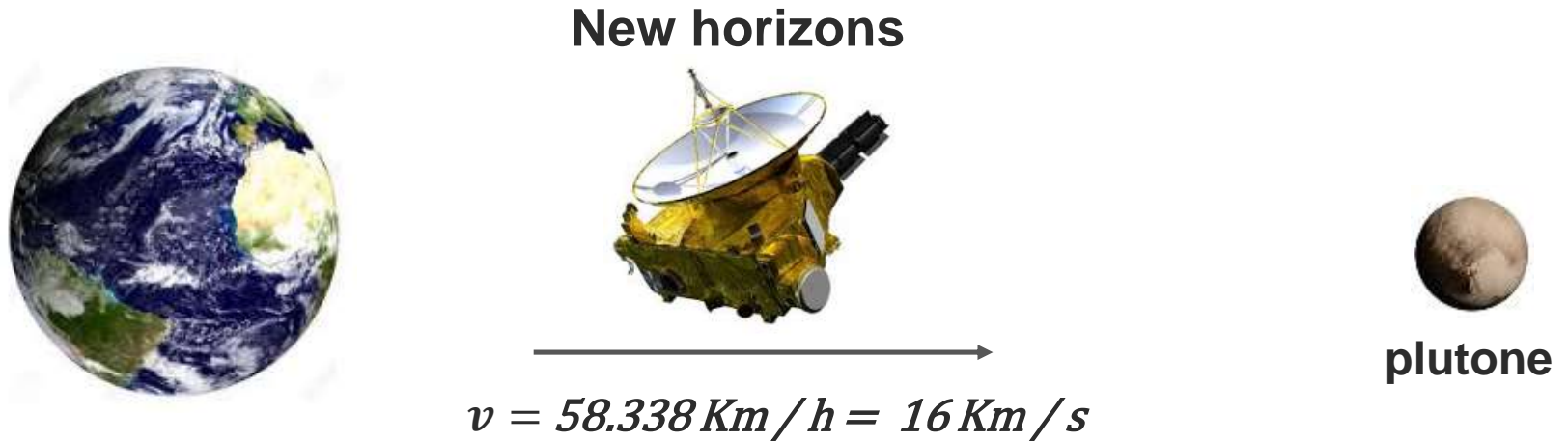
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 22,37$$

$$t_0 = \frac{t}{\gamma} = \frac{135 \text{ ore}}{22,37} \cong 6 \text{ ore}$$

$$t_{\text{TERRA}} (\text{quiete}) = t$$

$$t_{\text{RAZZO}} (\text{in moto}) = t_0$$

Dilatazione del tempo – realtà



New Horizons → $t_0 = 9 \text{ anni (2006 - 2015)}$

Terra → $t = \text{????}$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$t = \gamma t_0 = 1,000000000046 \times 9$$

... e lo spazio ?

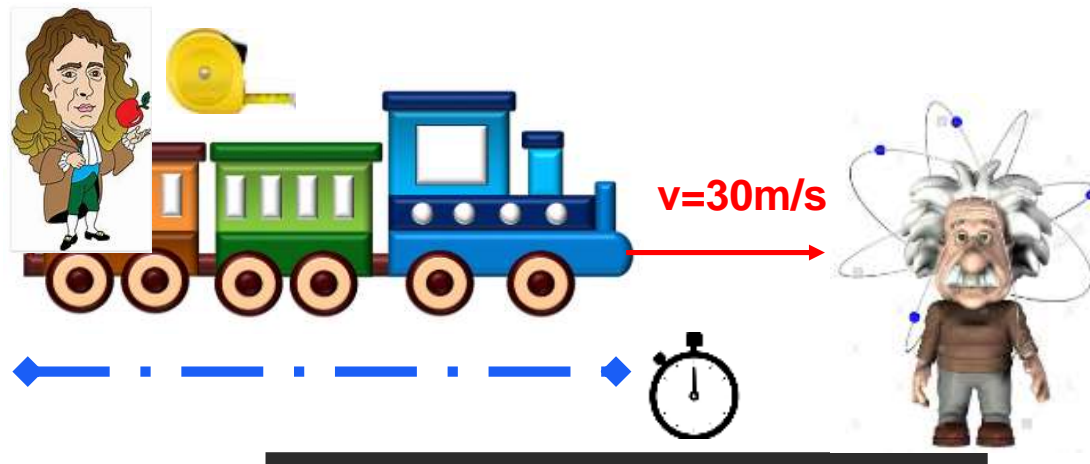
- **La relatività impatta lo scorrere del tempo**

$$velocita' luce = costante = \frac{spazio}{tempo}$$

- ***Anche lo spazio si modifica ...***
- ***... Ma in un modo molto speciale***

La contrazione delle lunghezze

- Quanto è lungo il treno ?



lunghezza = 210 mt.



lunghezza = $v \times t = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 5,9 \text{ s} = 177 \text{ mt}$

Tutti gli oggetti in moto si accorciano nella direzione del movimento

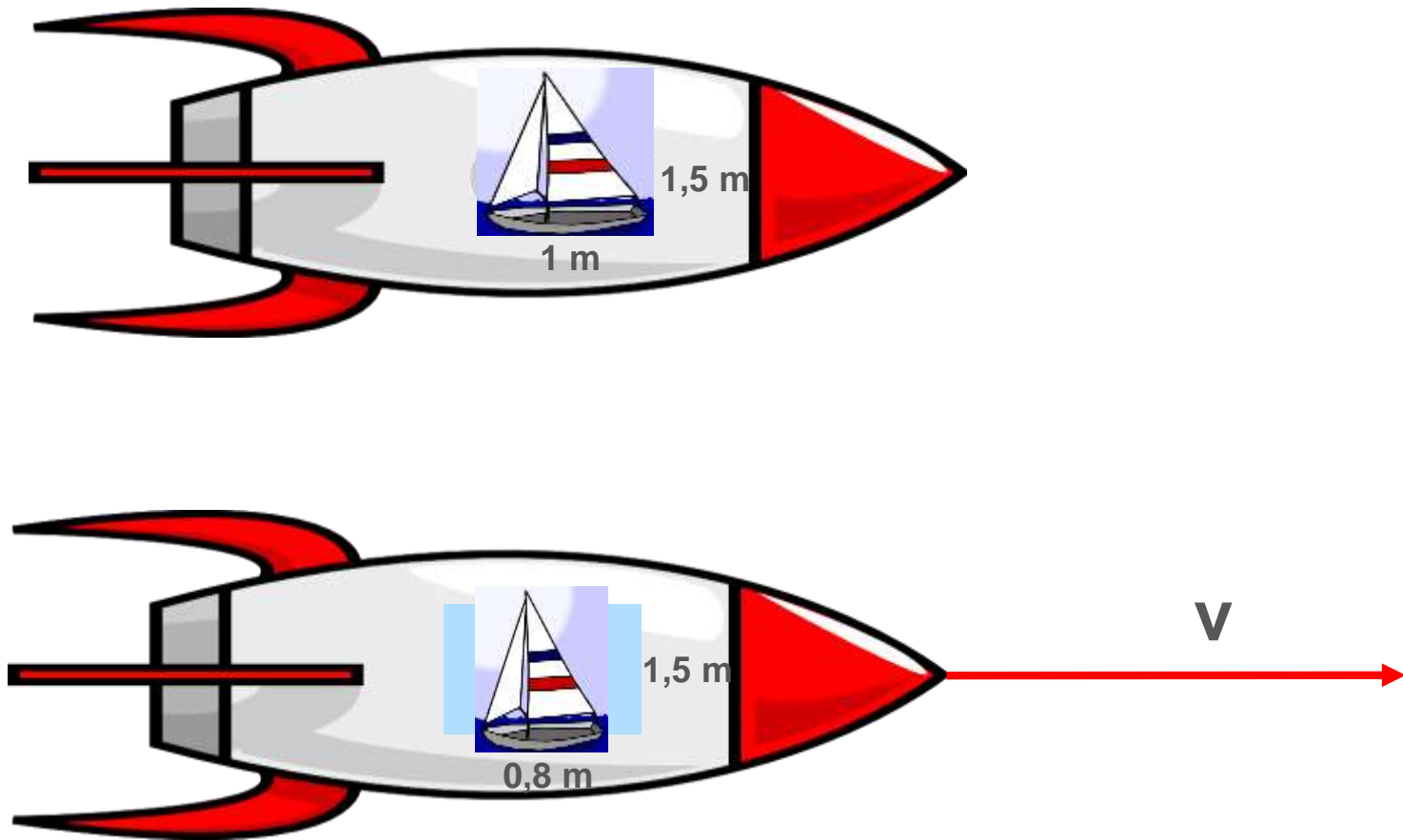
Quanto è lungo il treno ?

- Chi ha ragione ?
- Il concetto di lunghezza perde la qualifica di "assoluta"

Tutti gli oggetti in moto si accorciano nella direzione del movimento

La lunghezza di un oggetto presa da un osservatore in quiete rispetto all'oggetto si chiama lunghezza "di riposo" o lunghezza "propria"

La contrazione delle lunghezze 2

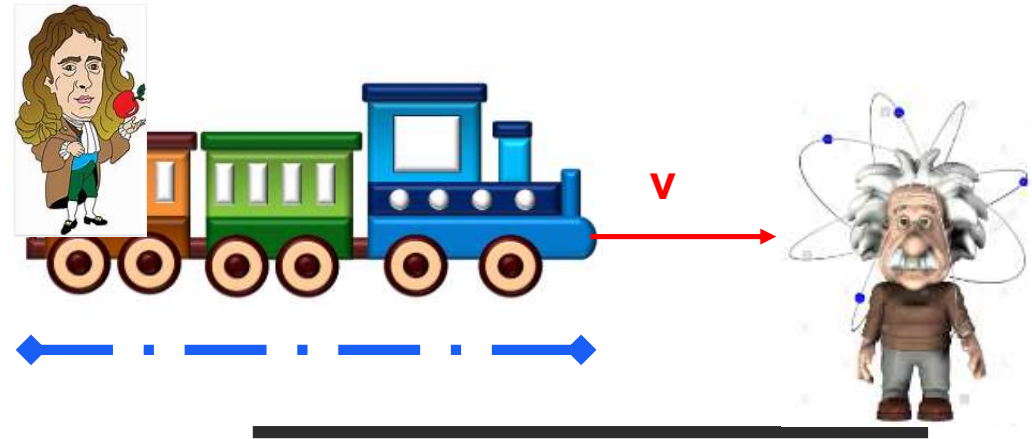


La contrazione è SOLO nel senso del moto

La contrazione delle lunghezze -- formula



$$L_{ALBERT} = v \times t_{ALBERT}$$

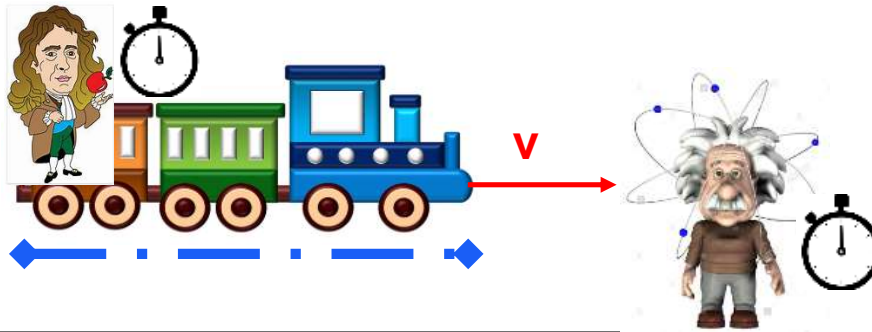


$$L_{ISACCO} = v \times t_{ISACCO}$$

$$L_{ALBERT} = \frac{L_{ISACCO}}{\gamma}$$

$$L_{ISACCO} = 100 \text{ mt} \text{ e } \gamma = 1,2 \rightarrow L_{ALBERT} = 83 \text{ mt}$$

Riassunto



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

γ = *fattore di Lorentz*

$$t_{ALBERT} = \gamma \cdot t_{ISACCO}$$

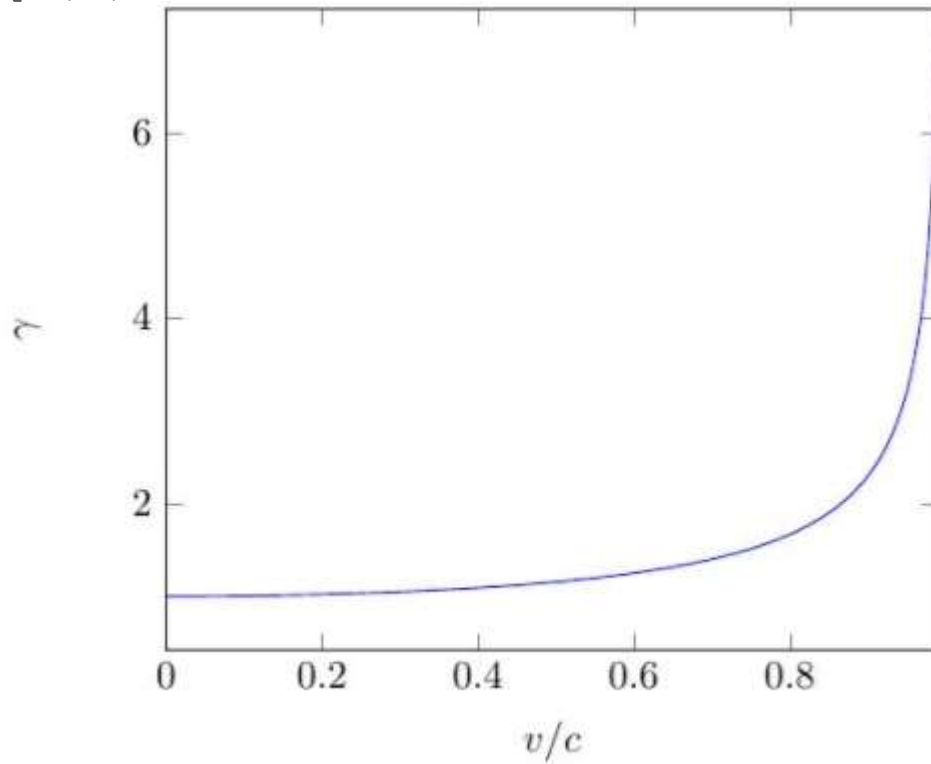
$$\beta = \frac{v}{c} = \textit{parametro di velocità}$$

$$L_{ALBERT} = \frac{L_{ISACCO}}{\gamma}$$

Gli effetti relativistici iniziano ad essere apprezzabili per velocità negli intornoi del 10% della velocità della luce cioè circa 30.000 Km/secondo o 100.000.000 Km/ora

Il fattore γ o di Lorentz

$$\gamma = \gamma(v)$$

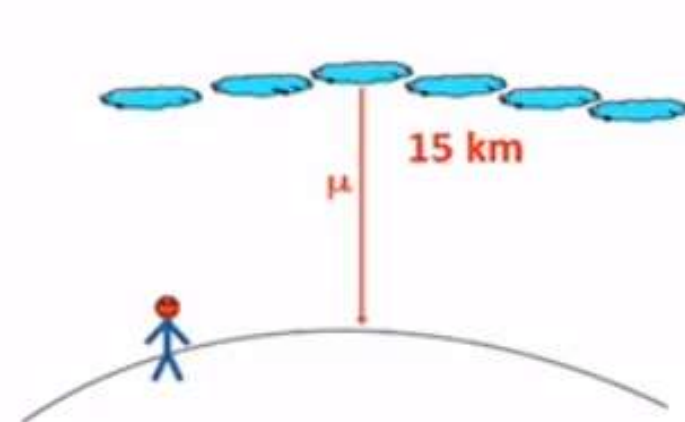
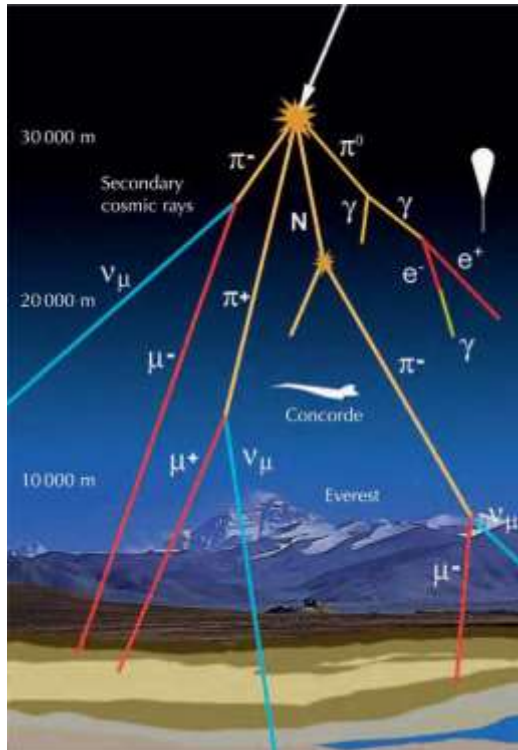


$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Gli effetti relativistici iniziano ad essere apprezzabili per velocità negli intorni del 10% della velocità della luce

I "fantomatici" muoni

- I muoni sono i "fratelli" degli elettroni: stessa carica elettrica (-1 Coulomb) ma massa 200 volte più grande
- Sono prodotti nell'alta atmosfera (collisioni tra raggi cosmici e molecole) a circa 15 Km dal suolo e viaggiano con una velocità prossima a quella della luce



I "fantomatici" muoni

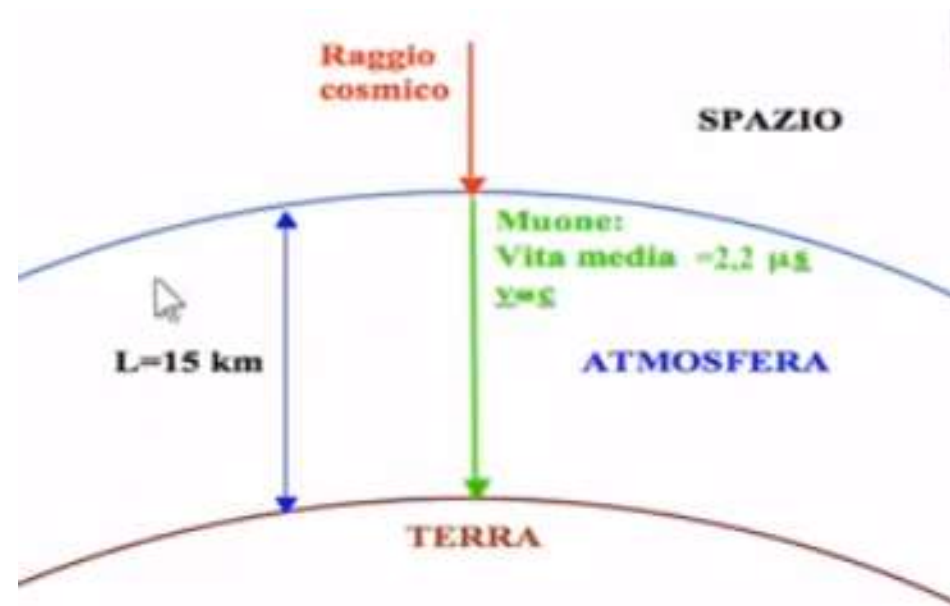
- A differenza degli elettroni che sono stabili, i muoni vivono pochissimo e decadono dopo circa un tempo $\tau_{\mu} = 2,2 \mu s$
- La metà di essi raggiunge la superficie Terrestre e attraversa i nostri corpi (circa 1.000 al minuto)
- Domanda : che distanza percorrono prima di "morire"?

$$d = c \times \tau_{\mu} = 660 \text{ metri}$$

Come possono i muoni raggiungerci dovendo percorrere 15 Km se muoiono dopo 660 metri ?? Qual'è la magia ??

I "fantomatici" muoni

- La loro velocità è circa quella della luce. Il fattore γ è circa 25.
- Dalla Terra: vedo il muone in movimento e quindi il suo tempo è rallentato di un fattore "25" quindi per me ha una vita più lunga e raggiunge la terra
- A "cavallo" del muone: lui vede l'atmosfera in movimento e quindi lo spessore è contratto di un fattore "25". Infatti : $15 \text{ Km}/25 =$ circa 600 metri
- La realtà è che i muoni arrivano sulla terra (fatto sperimentale)
- Nei due sistemi di riferimento Terra e muone si hanno misure differenti di Spazio e tempo
- Ma spiegano e concordano sull'evento fisico



Evidenze sperimentali 1



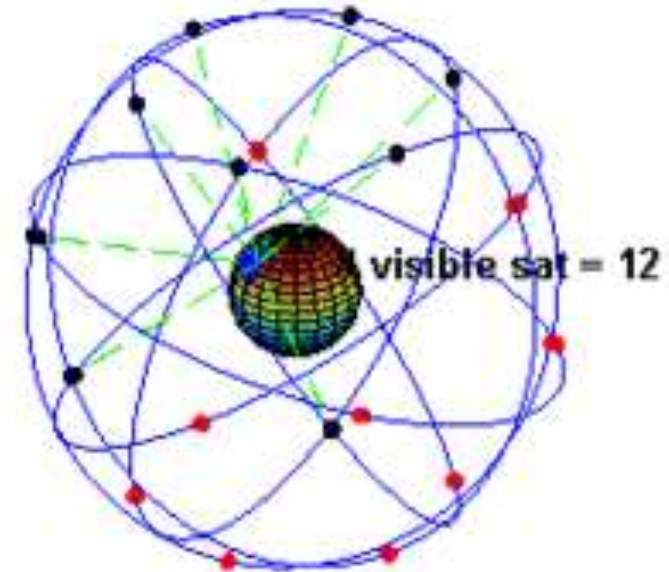
- **1972 – Hafele e Keating**
 - **3 orologi atomici: uno a terra e due su due aerei**
 - **Un aereo vola verso ovest e uno verso est**
 - **Sfasamento tra i tre orologi di alcuni nanosecondi**

Il Global Positioning System (GPS)

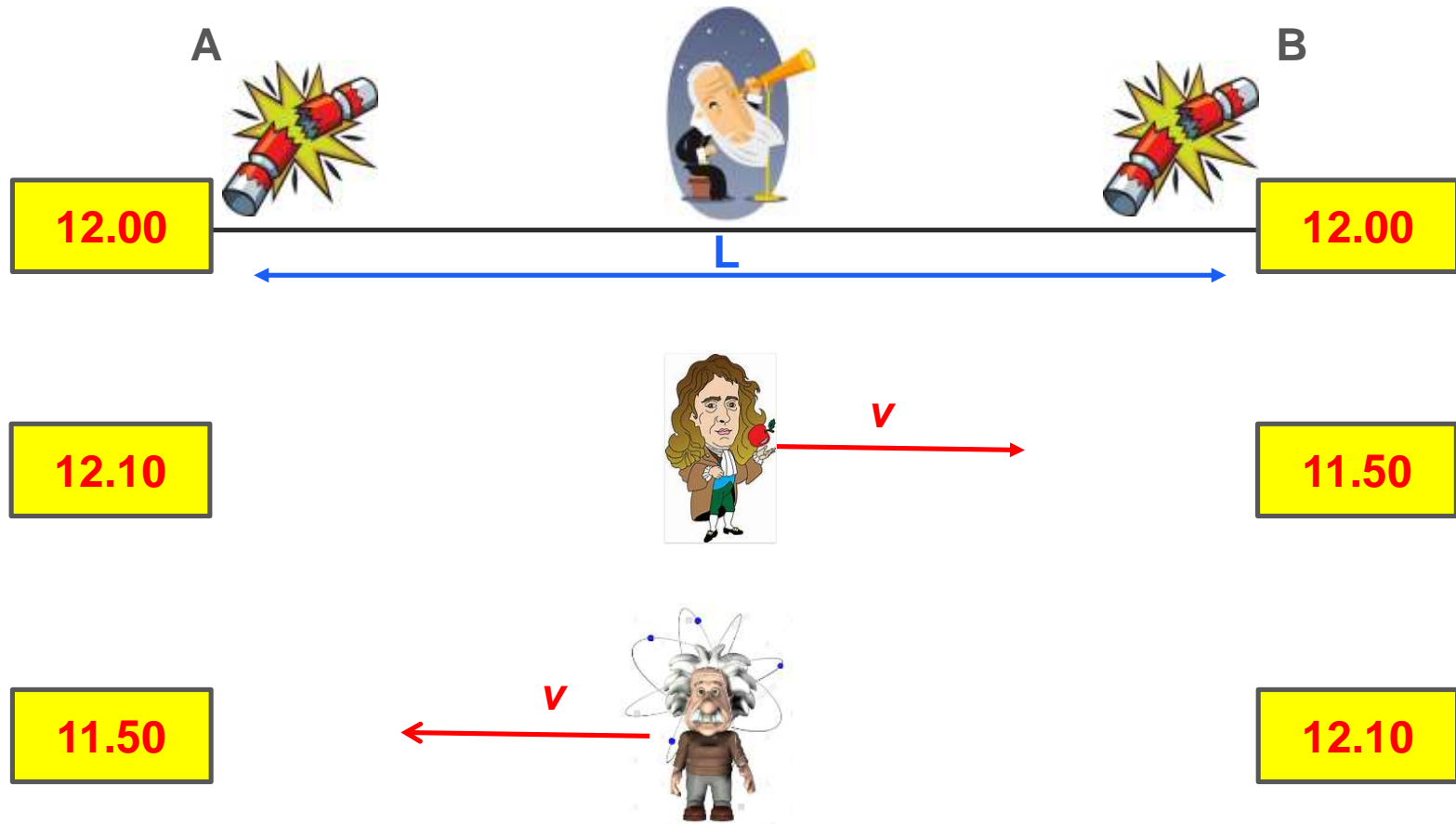
- Introdotta e gestita dal governo USA
- Tre segmenti
 - Spaziale (31 satelliti NAVSTAR)
 - Controllo (8 stazioni + 4 antenne)
 - Utente

Satelliti

- Orbita: raggio medio = 26.500 km
- Periodo di rivoluzione $T=12$ ore
- Velocità = 4 km/s.
- 1 secondo dura 1,000000000007 dei nostri secondi
 - **SENZA** correzione relativistica = imprecisione di alcuni chilometri
 - **CON** correzione relativistica = imprecisione di alcuni metri



Relatività della simultaneità



Galileo: A e B simultanei

Isacco: prima B, poi A

Albert: prima A, poi B

$$\Delta t_{sfasamento} = \left| \frac{vL}{c^2} \right|$$

La realtà del presente, passato e futuro

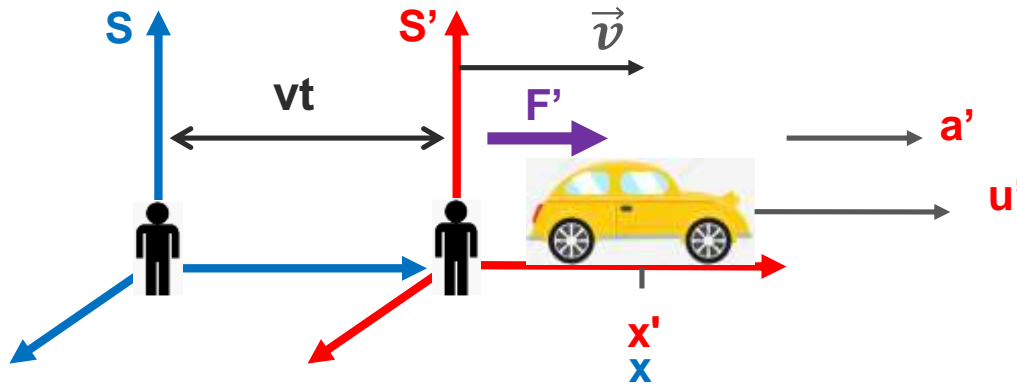
- **Fisica classica (newtoniana) →**
 - un unico ordinamento cronologico per tutti
 - **Passato, Presente e Futuro ben delineati**
- **Fisica relativistica →**
 - **Perdita della sincronizzazione per effetto del moto**
 - **l'ordine cronologico degli eventi dipende dallo stato di moto degli osservatori**
 - **Non esiste più un Presente, un Futuro, un Passato "assoluti"**

Le trasformate di Lorentz

La relatività galileiana

- **Il moto è relativo**
 - **non esiste un sistema di riferimento inerziale "assoluto"**
- **Le leggi fisiche sono assolute**
 - **sono vere in qualunque sistema di riferimento inerziale indipendentemente dal suo stato di moto rettilineo uniforme o di quiete**
 - **ripetendo uno stesso esperimento in due sistemi di riferimento inerziali devo avere gli stessi risultati**
 - **i valori delle grandezze cambiano da un sistema all'altro ma devono soddisfare le leggi fisiche (es. la dinamica di Newton)**
- **Le trasformazioni sono strutture matematiche che mi permettono di calcolare come variano le grandezze fisiche passando da un sistema di riferimento all'altro**

Le trasformate Galileo



posizione

$$x = x' + vt$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

velocità

$$u = u' + v$$

accelerazione

$$a = a'$$

forza

$$F = F'$$

NB: nelle trasformate di Galileo (Relatività galileiana) il tempo misurato da S ed S' è lo stesso!!

Le equazioni di Maxwell

LEGGE DI GAUSS PER IL CAMPO ELETTRICO

$$\Phi_{\Omega}(\vec{E}) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

LEGGE DI GAUSS PER IL CAMPO MAGNETICO

$$\Phi(\vec{B}) = 0$$

campi statici

LEGGE DI FARADAY-NEUMANN

$$C_{\ell}(\vec{E}) = - \frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}$$

LEGGE DI AMPERE - MAXWELL

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \left[\vec{i} + \epsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right]$$

campi variabili nel tempo

La velocità delle onde elettromagnetiche

$$\text{Faraday_Neumann_Lenz} \rightarrow E = cB$$

$$\text{Ampere_Maxwell} \rightarrow B = \varepsilon_0\mu_0Ec$$

$$E = c(\varepsilon_0\mu_0Ec) \rightarrow c^2 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0} \rightarrow c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{(8,854 \times 10^{-12})(4\pi \times 10^{-7})}} = 2,998 \times 10^8 \frac{m}{s} = c$$

- In un mezzo materiale materiale :

$$v_{\text{onde e.m.}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}$$

- Dal momento che $\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$ è sempre maggiore di 1 si ha che la velocità delle onde e.m. che si propagano in un mezzo materiale è sempre minore di quella che si ha nel vuoto

Trasformate di Lorentz – l'antefatto

- **Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto a sistemi di riferimento inerziali secondo la relatività galileiana**
- **La velocità della luce (invariante per tutti gli osservatori indipendentemente dal loro stato di moto) non si adatta alla composizione delle velocità della relatività galileiana**

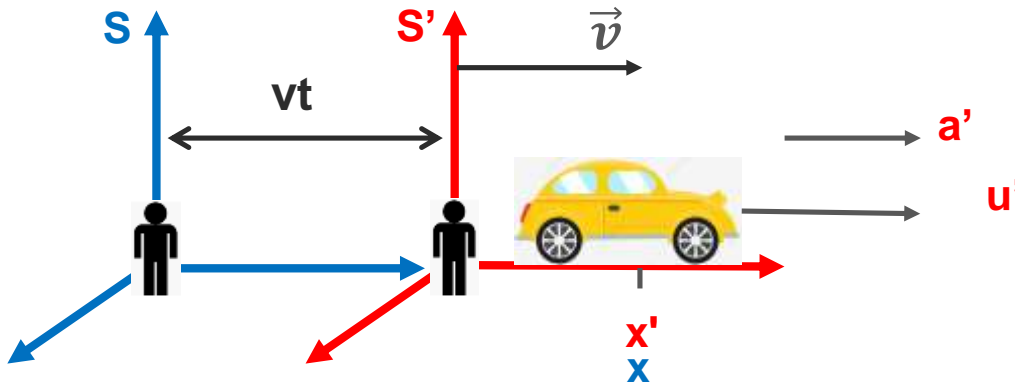


O si cestina tutta la Relatività galileiana o si trovano delle trasformate diverse da quelle classiche



Lorentz , con il suo sistema di trasformate, mette a posto tutto quanto utiizzando molto bene la matematica ma non capisce il vero significato fisico A questo ci penserà Einstein

Le trasformate di Lorentz



posizione

velocità

accelerazione

$$\mathbf{G} \begin{cases} x = x' + vt \\ t = t' \end{cases}$$

$$u = u' + v$$

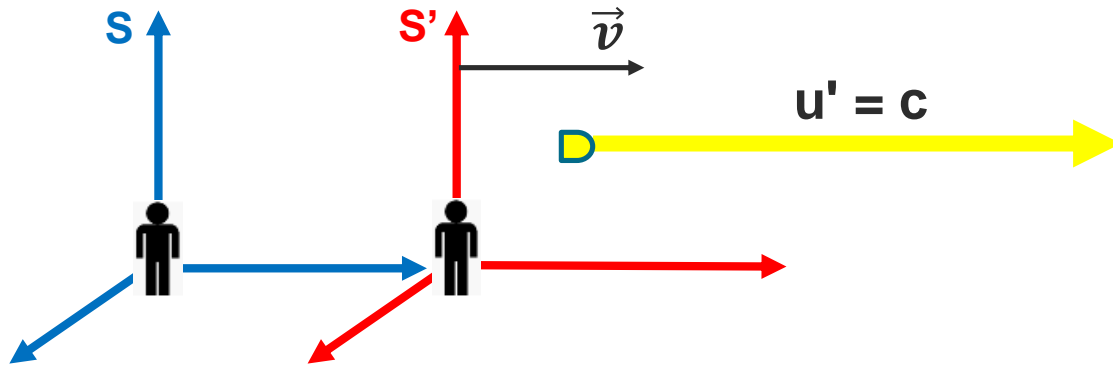
$$a = a'$$

$$\mathbf{L} \begin{cases} x = \gamma(x' + vt') \\ t = \gamma\left(t' + v\frac{x'}{c^2}\right) \end{cases}$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'\frac{v}{c^2}}$$

$$a = a' \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)^3}}{\left(1 + \frac{u'v}{c^2}\right)^3}$$

La velocità della luce è invariante



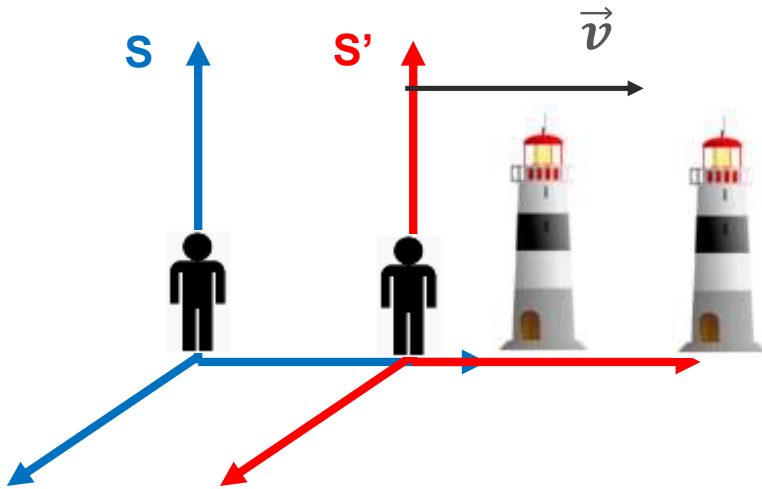
$$u = \frac{u' + v}{1 + u' \frac{v}{c^2}}$$

- L' osservatore in S' misura $u' = c' = 300.000 \text{ Km/s}$
- Cosa misura, come velocità u l'osservatore in S ?
- Se $u' = c$ allora

$$u = \frac{c + v}{1 + c \frac{v}{c^2}} = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}} = \frac{c + v}{\frac{c + v}{c}} = (c + v) \frac{c}{c + v} = c$$

- L' osservatore in S misura esattamente $c = 300.000 \text{ Km/s}$

Lorentz per le coppie di eventi



$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1$$

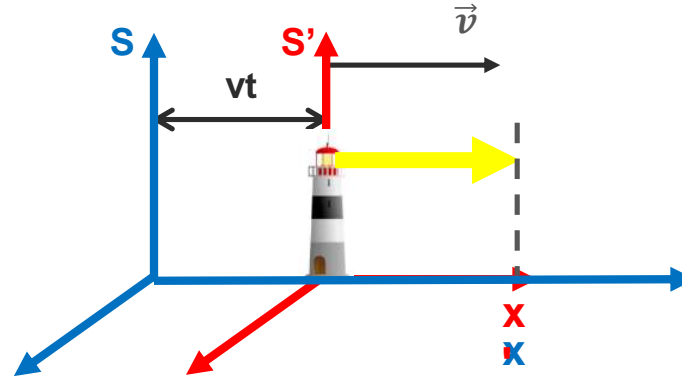
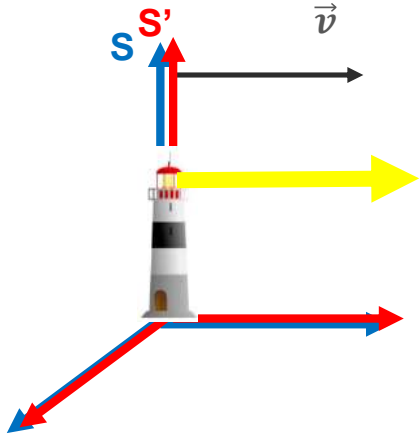
$$\Delta t = \gamma \left(\Delta t' + v \frac{\Delta x'}{c^2} \right)$$

Simultaneità

simultanei in $S' \rightarrow \Delta t' = 0$

non lo sono in $S \rightarrow \Delta t = \gamma \left(v \frac{\Delta x'}{c^2} \right)$

Il fattore di Lorentz (matematicamente)



$$x = \gamma(x' + vt')$$

$$x' = \gamma(x - vt)$$

- Quando $t=t'$ i sistemi S ed S' coincidono e parte un lampo
- Dopo un certo tempo t e t' viene analizzata la posizione del lampo

$$\text{In } S \quad x = ct = \gamma(x' + vt')$$

$$\text{In } S' \quad x' = ct' = \gamma(x - vt)$$

$$\begin{cases} ct = \gamma(ct' + vt') = \gamma t'(c + v) & \rightarrow ct = \gamma t'(c + v) \\ ct' = \gamma(ct + vt) = \gamma t(c - v) & \rightarrow ct' = \gamma t(c - v) \end{cases}$$

- multiplico membro a membro

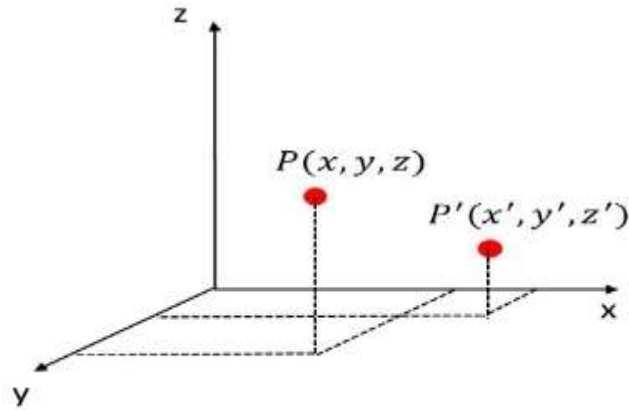
$$c^2 tt' = \gamma^2 tt'(c + v)(c - v) \quad \rightarrow c^2 = \gamma^2(c^2 - v^2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

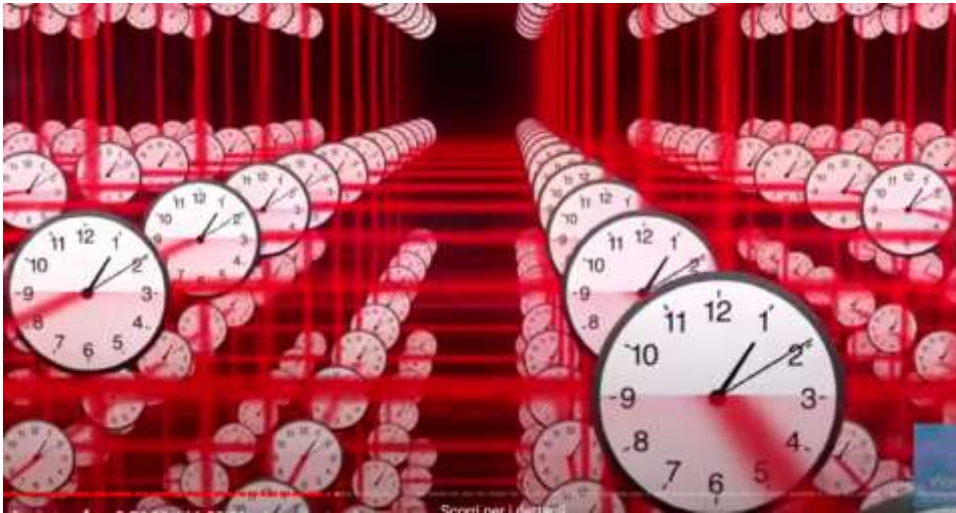
$$\beta = \frac{v}{c} = \text{parametro di velocità}$$

Lo spazio-tempo

Rappresentazione di un evento in un sistema di riferimento per capire DOVE accade e QUANDO accade

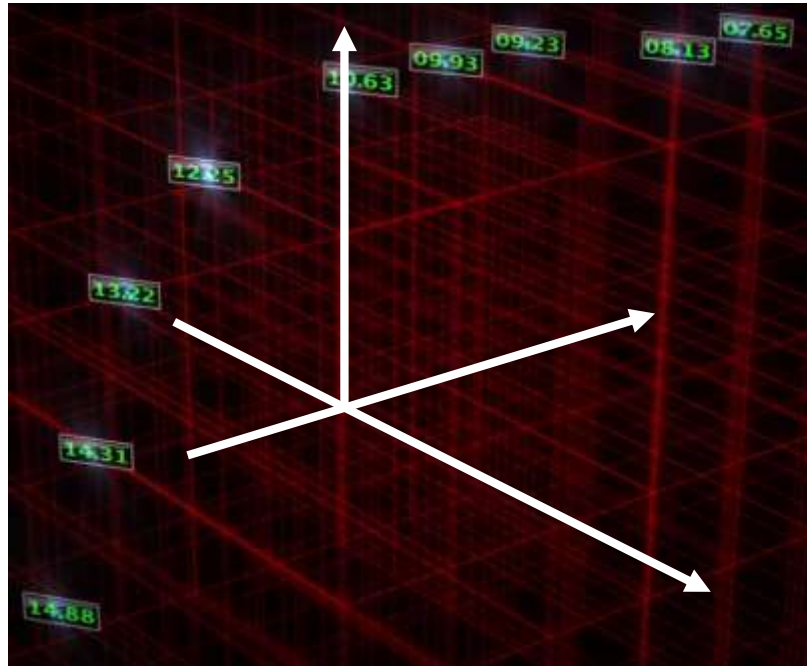


+ tempo t assoluto



- un orologio in ogni punto
- tutti gli orologi sincronizzati

Lo spazio-tempo



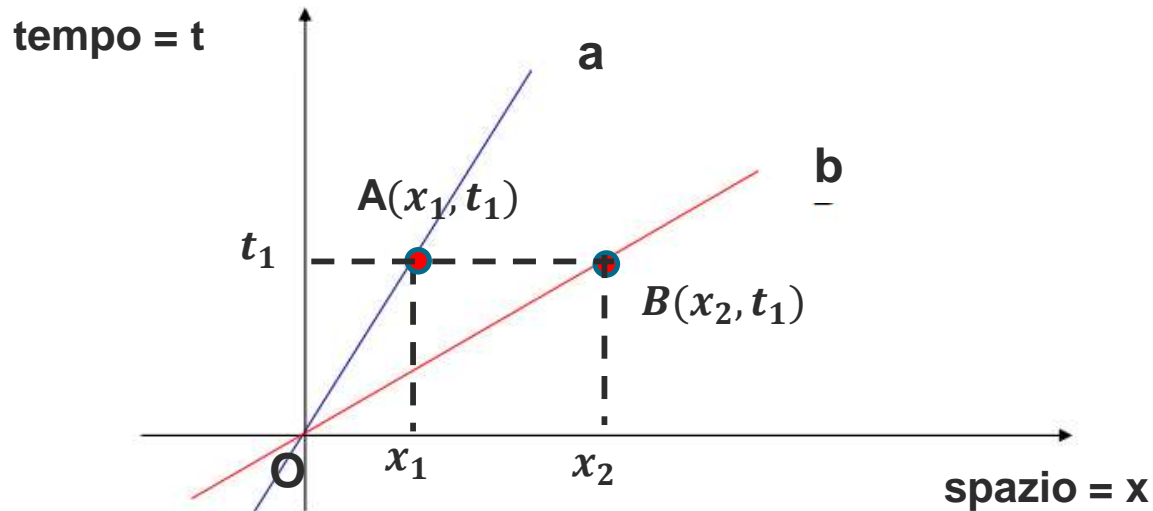
- Le coordinate in un riferimento spazio-temporale
 - 3D (t,x,y,z)
 - 2D (t,x,y)
 - 1D (t,x)

I diagrammi spazio-tempo di Minkowski

- **Galileo: universo \rightarrow spazio euclideo tridimensionale (x, y, z) + dimensione tempo indipendente dallo spazio ed uguale per tutti gli osservatori**
- **Poincarè, Lorentz e Einstein : universo \rightarrow spazio-tempo rappresentato da un quadrivettore (x,y,z,t)**
- **Minkowski (1907) : cronotopo \rightarrow struttura matematica che rappresenta l'universo secondo la relatività ristretta**



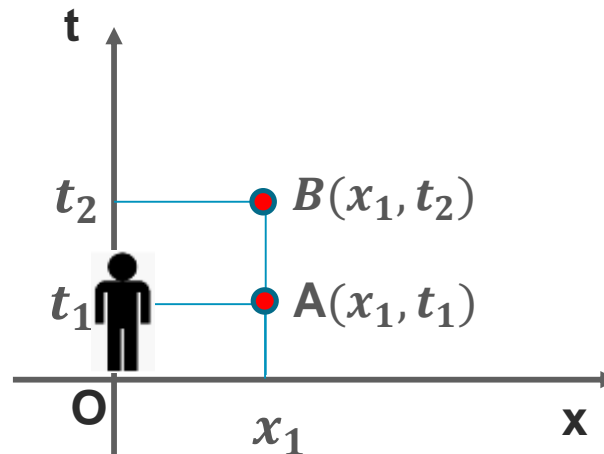
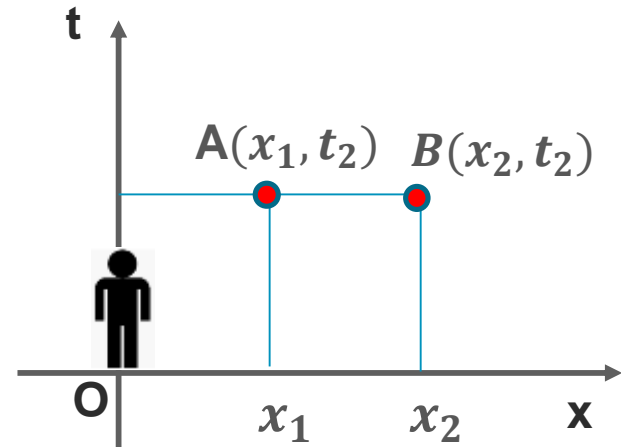
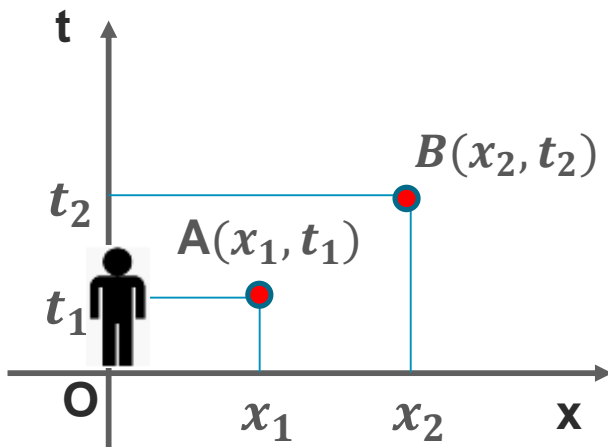
Il diagramma orario



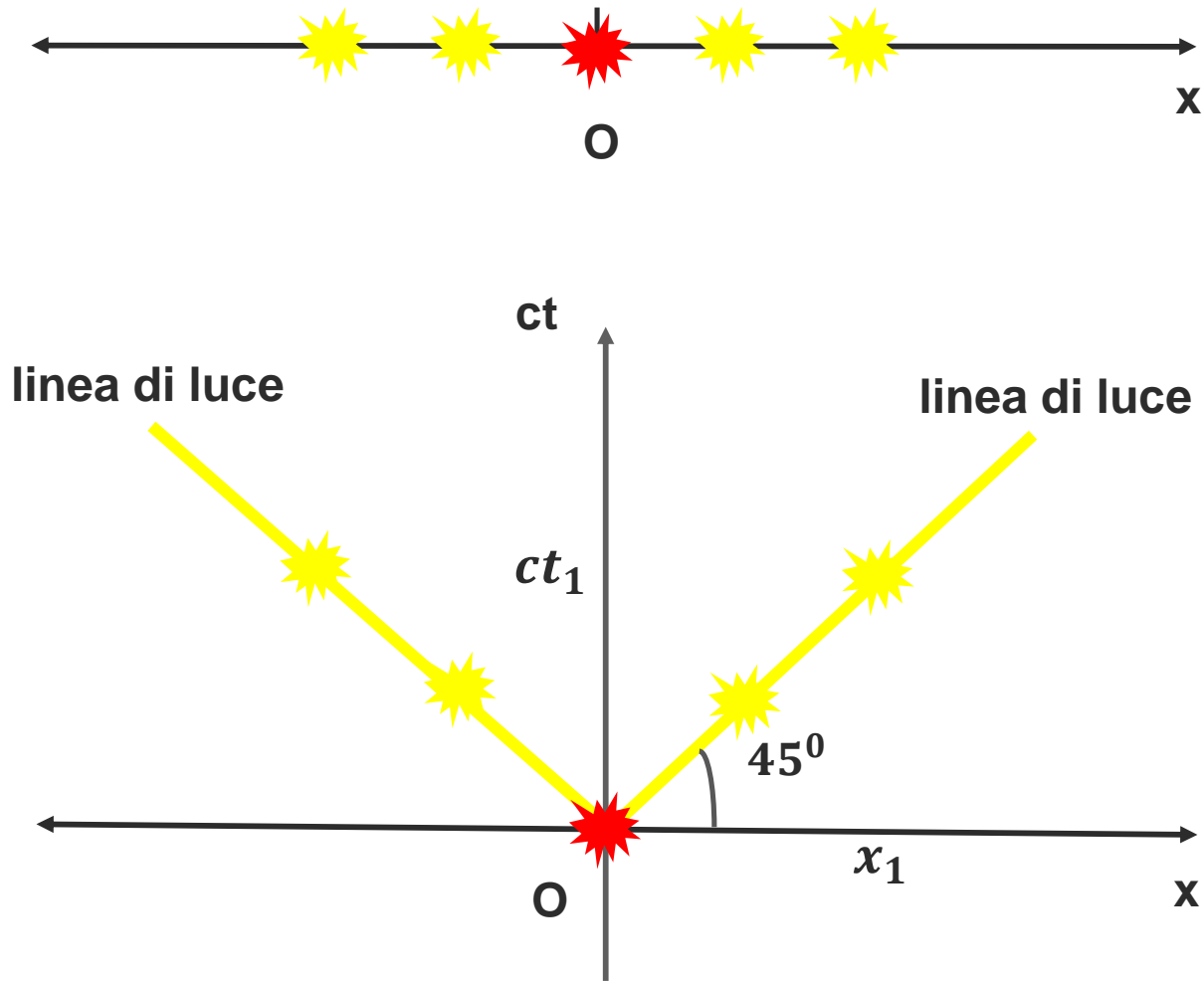
- a e b (rette) rappresentano un moto rettilineo uniforme
- B più veloce di A

La rappresentazione degli eventi

- "evento" : qualcosa che accade ed è definito da una coppia una coppia di coordinate (spazio,tempo)

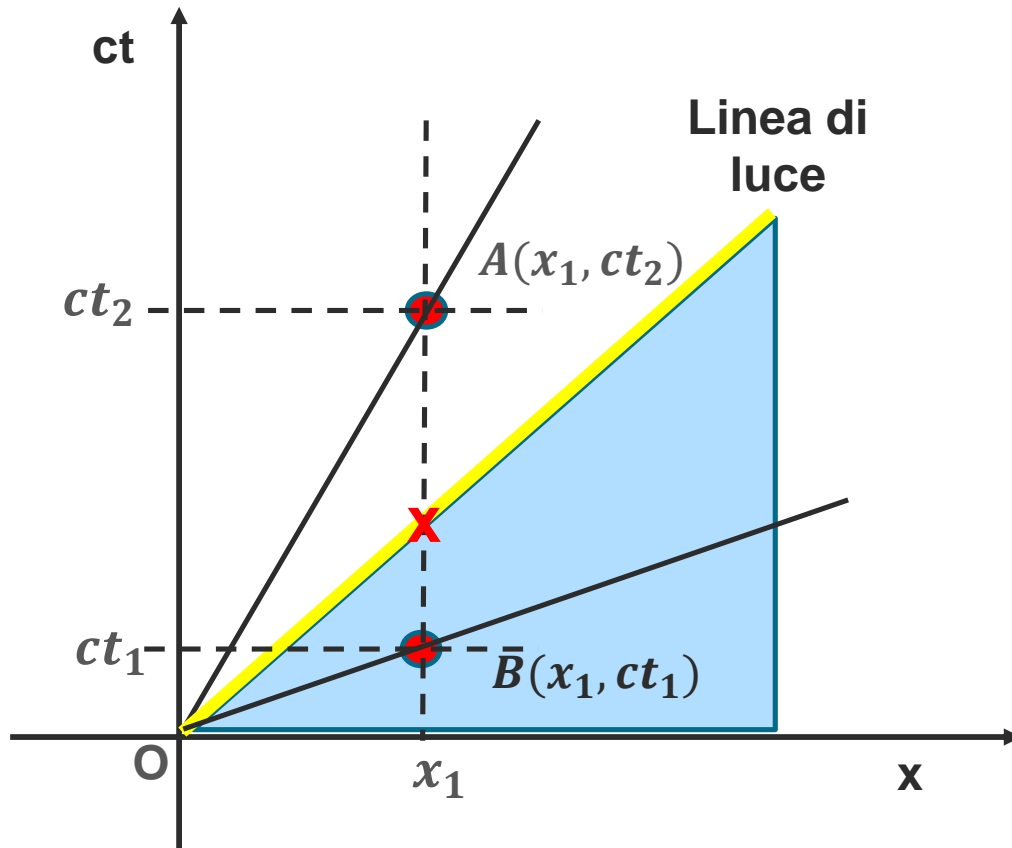


La linea di luce



- Linea di luce: luogo dei punti che si muovono alla velocità della luce

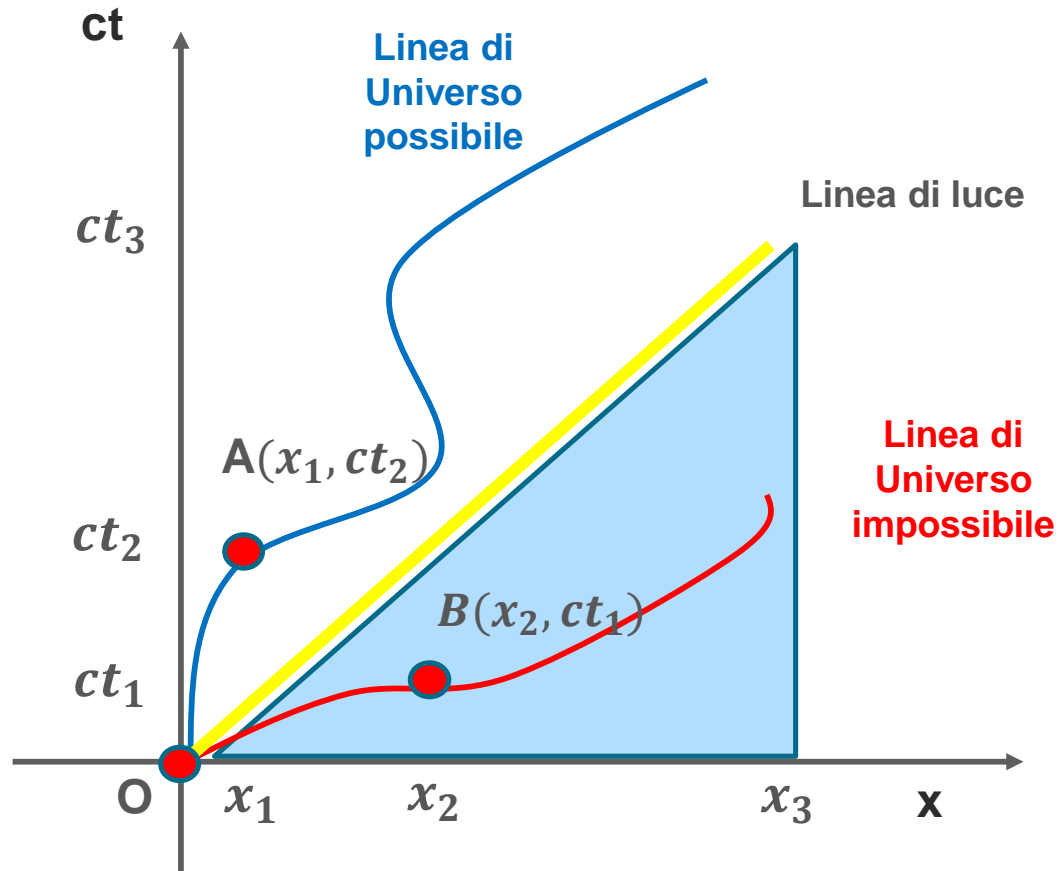
La zona proibita



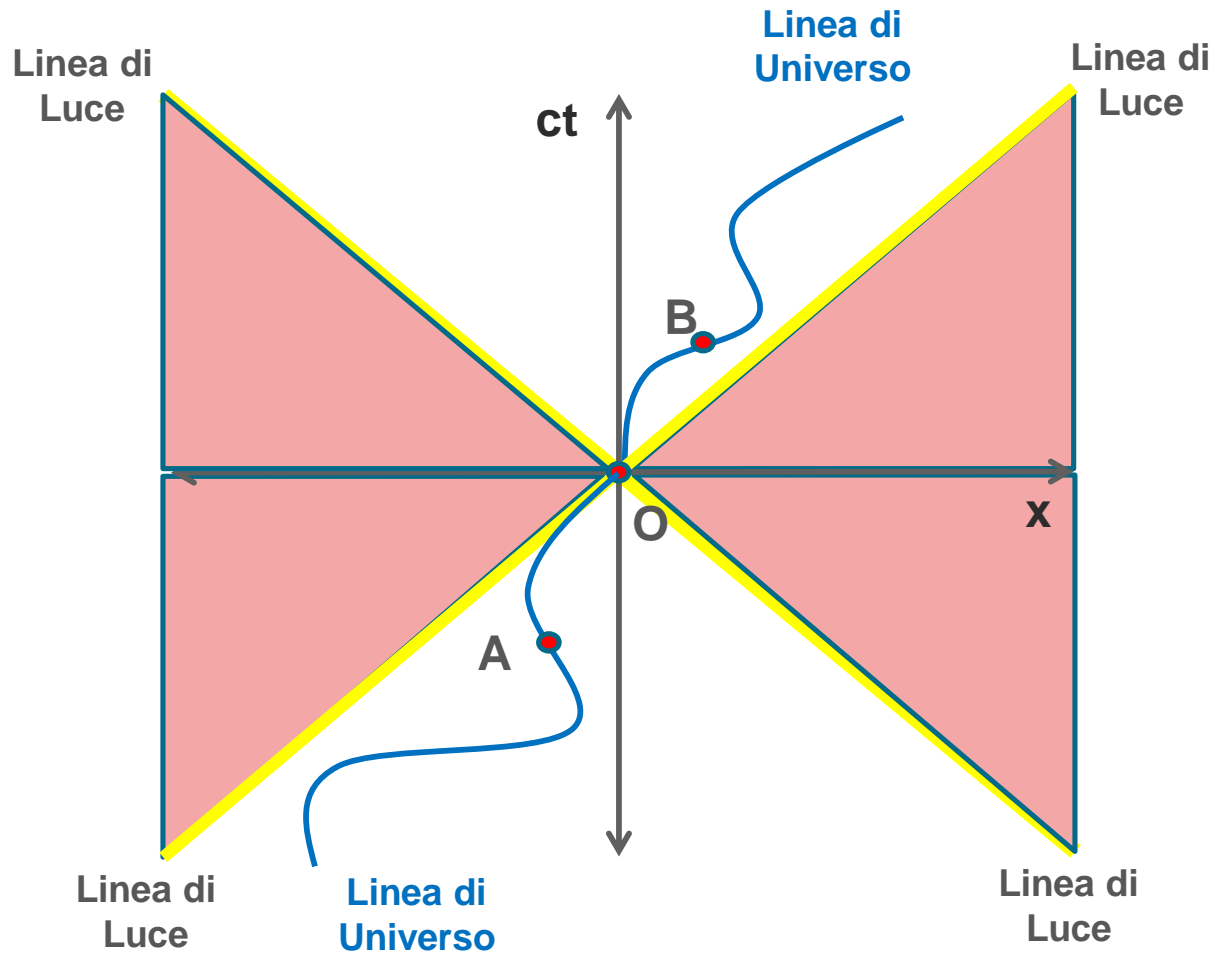
vel $A < c \rightarrow$ possibile

vel $B > c \rightarrow$ impossibile

Le linee d'universo

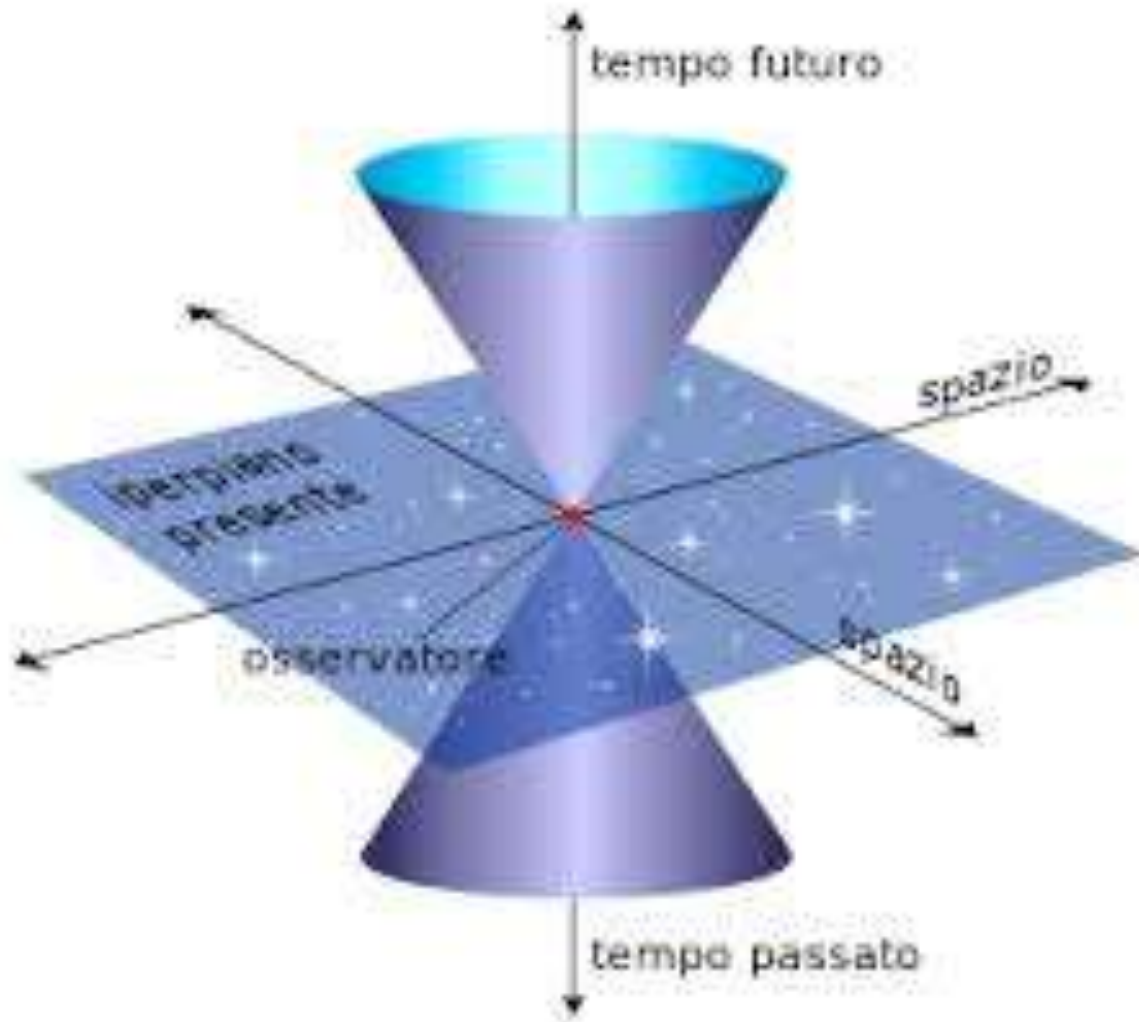


Passato presente e futuro



Il cronotopo di Minkowski

- Tre dimensioni (x, y, t)



L'energia-massa

$$*E = mc^2*$$

Riflessioni sul concetto di massa

- **Misura della quantità di materia presente in un corpo.**
- **In Fisica classica**
 - **Massa inerziale**
 - **Massa gravitazionale**
 - **Massa ed energia : entità distinte**
- **In Fisica relativistica**
 - **massa relativistica**
 - **Massa ed energia : entità profondamente legate**

Perchè le particelle hanno massa diversa ?

L'energia - massa

- **Nel 1905 Einstein pubblica un articolo: " L'inerzia di un corpo dipende dalla sua energia?"**
- **Einstein scrive: " ... Se un corpo perde l'energia E sotto forma di radiazioni, la sua massa diminuisce di E/c^2 . Il fatto che l'energia sottratta al corpo diventi energia di radiazione non fa alcuna differenza, perciò siamo portati alla più generale conclusione che la massa di qualunque corpo è la misura del suo contenuto di energia ... "**

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \rightarrow \Delta E = \Delta m \cdot c^2 \rightarrow E = mc^2$$

Da un punto di vista fisico massa ed energia diventano interscambiabili. L'una si può trasformare nell'altra e viceversa

Energia totale in una reazione

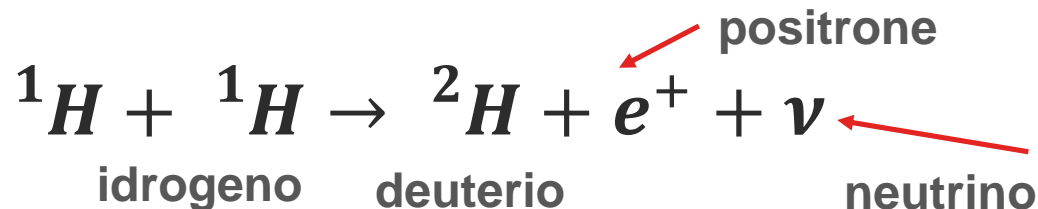
In un sistema che subisce una reazione la variazione di energia totale del sistema viene definita energia di reazione e si indica con Q

$$E_i = E_f \pm Q \quad \longrightarrow \quad M_i c^2 = M_f c^2 \pm Q \quad \longrightarrow \quad Q = \pm \Delta M c^2$$

$M_f < M_i$ allora Q positivo \rightarrow generazione di energia

$M_f > M_i$ allora Q negativo \rightarrow assorbimento di energia

Esempio di reazione



Q positivo \rightarrow generazione di energia

Il contenuto energetico della materia

Corpo	Massa (kg)	Energia equivalente	
Elettrone	$\approx 9,11 \cdot 10^{-31}$	$\approx 8,19 \cdot 10^{-14}$ J	(≈ 511 keV)
Protone	$\approx 1,67 \cdot 10^{-27}$	$\approx 1,50 \cdot 10^{-10}$ J	(≈ 938 MeV)
Atomo di uranio	$\approx 3,95 \cdot 10^{-25}$	$\approx 3,55 \cdot 10^{-8}$ J	(≈ 225 GeV)
Granello di polvere	$\approx 1 \cdot 10^{-13}$	$\approx 1 \cdot 10^4$ J	(≈ 2 kcal)
Monetina	$\approx 3,1 \cdot 10^{-3}$	$\approx 2,8 \cdot 10^{14}$ J	(≈ 78 GW · h)

$$E = mc^2$$

Energia - massa a riposo

- **La massa in Fisica classica:**
 - proprietà intrinseca della materia che si conserva nel tempo e nello spazio, rimanendo costante in ogni sistema isolato
- **La massa in Fisica Relativistica:**
 - non è più SOLO una proprietà intrinseca della materia, ma dipende anche dal sistema di riferimento in cui viene osservata

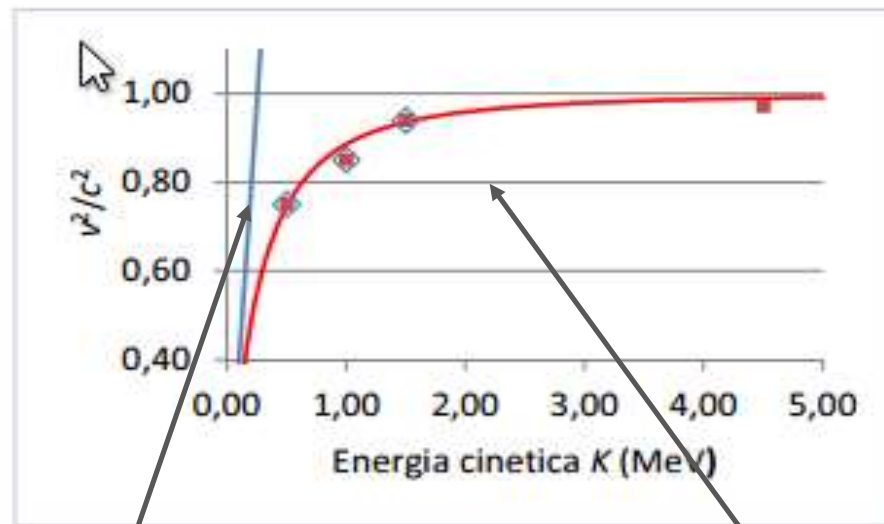
$$m(v) = \gamma \cdot m_0$$

- m_0 = massa "a riposo" → misurata in un sistema in cui il corpo di massa m è in quiete
- Per velocità molto minori di c → $\gamma = 1$ → $m(v) = m_0$

Energia cinetica relativistica

Fisica classica: $K = \frac{1}{2}mv^2$

Fisica relativistica: $K = m_0c^2(\gamma - 1)$



$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$K = m_0c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

Energia totale di un corpo

$$E_0 = m_0 c^2 \quad \text{energia a riposo}$$

$$K = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad \text{energia cinetica}$$

Energia totale posseduta da un corpo in moto

$$E = E_0 + K = m_0 c^2 + m_0 c^2 (\gamma - 1) = \gamma m_0 c^2 = mc^2$$

$$m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \rightarrow \quad \text{massa relativistica}$$

Quantità di moto relativistico

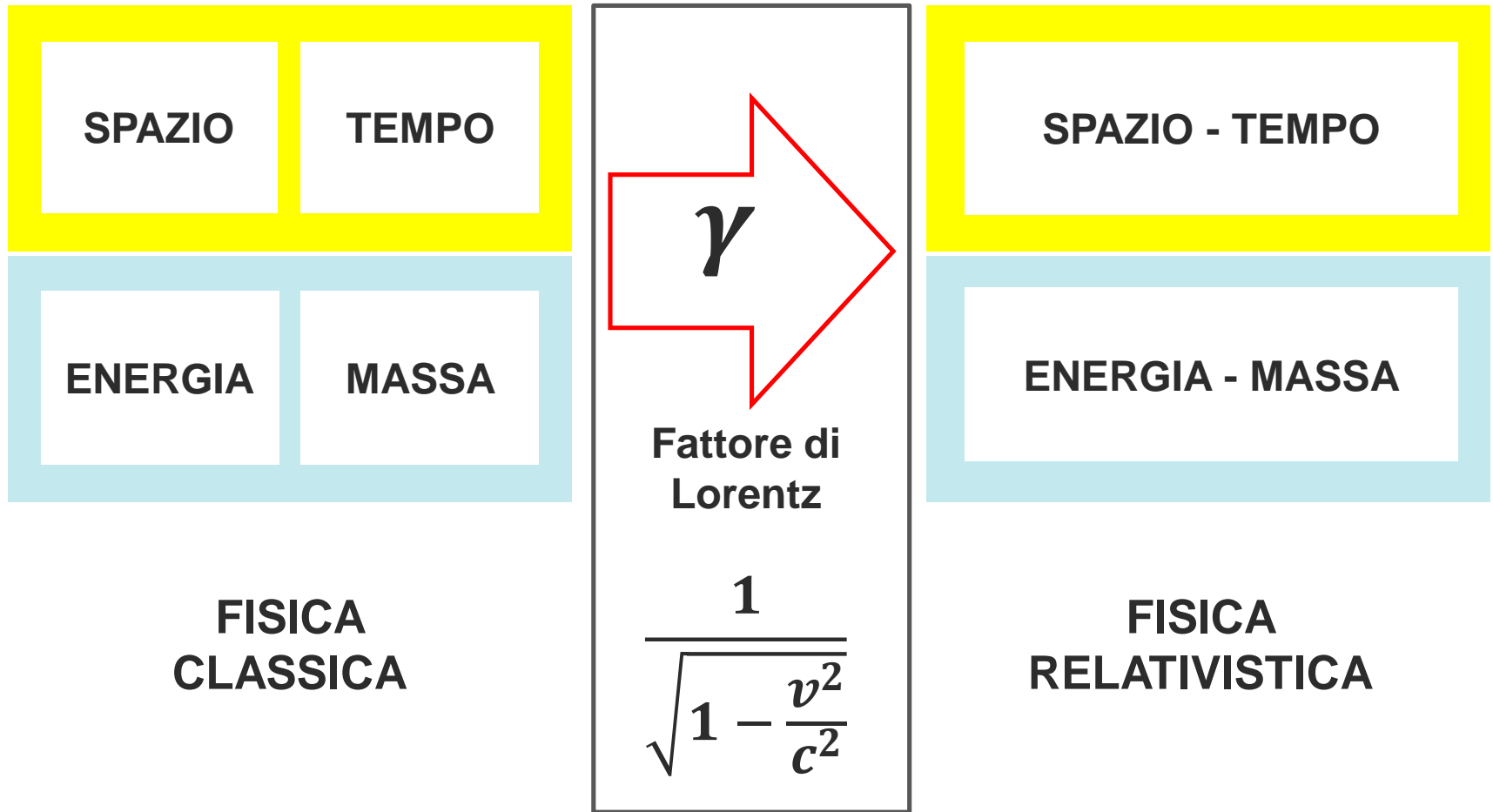
Fisica classica → $p = mv$

Fisica relativistica → $p = \gamma m_0 v$

Tutto è relativo ?

- **I punti fermi relativamente a lunghezze, tempi e masse:**
 - **La lunghezza L_0 (lunghezza propria) di un oggetto: è la lunghezza di un oggetto misurata in un sistema in cui l'oggetto è a riposo (in quiete) ed è la massima lunghezza fra tutte quelle misurate da qualunque osservatore in moto rispetto all'oggetto (contrazione delle lunghezze)**
 - **La durata t_0 (tempo proprio) di un evento: è la durata temporale di un evento misurata in un sistema in cui l'evento è a riposo ed è la minima durata fra tutte quelle misurate da osservatori che vedono l'evento in moto (dilatazione dei tempi)**
 - **La massa m_0 (massa a riposo) di un corpo: è la massa di un corpo misurata in un sistema in cui il corpo è a riposo ed è la più piccola massa fra tutte quelle che qualunque osservatore può misurare**

L'essenza della relatività ristretta



La relatività in una pagina

Trasformate spazio-tempo x eventi

- $x = \gamma(x' + vt')$
- $y = \gamma(y' + vt')$
- $z = \gamma(z' + vt')$
- $t = \gamma\left(t' - \frac{vx'}{c^2}\right)$

Trasformate della velocità in ambito relativistico

$$u = \frac{u' + v}{1 + u' \frac{v}{c^2}}$$

Dilatazione/contrazione di tempo e lunghezze

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 \quad L = \frac{L_0}{\gamma}$$

Massa relativistica

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

formule di Energia totale , cinetica e quantità di moto relativistiche

$$E = \gamma m_0 c^2 \quad K = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad p = \gamma m_0 v$$

Fattore di Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

parametro di velocità

$$\beta = \frac{v}{c}$$