



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 7

La Teoria della Relatività  
Ristretta di Einstein

# SOMMARIO



- 1. LA FISICA ANTICA E LA FISICA MODERNA;**
- 2. LO SVILUPPO DELLA FISICA MODERNA,**
- 3. I SISTEMI DI RIFERIMENTO ;**
- 4. LE ONDE ELETTROMAGNETICHE**
- 5. LA VELOCITÀ DELLA LUCE**
- 6. I LIMITI DELLA FISICA CLASSICA**
- 7. LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ;**
- 8. LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ**
- 9. LE CONSEGUENZE DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ.**
- 10. CONCLUSIONE**



# FISICA ANTICA E FISICA MODERNA

**Nell'antichità l'uomo pensava che ogni cosa nel mondo fosse un composto dei quattro elementi:**



Aristotele



## NELL'ANTICHITÀ

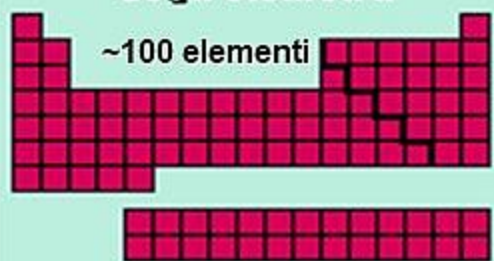
... l'uomo studia i fenomeni con gli strumenti forniti da madre natura: vista, udito, olfatto, gusto e tatto. .... "buon senso"

Eraclito



## Tavola periodica degli elementi

~100 elementi



... L'uomo è giunto a capire che la materia è in realtà un agglomerato di ~100 elementi fondamentali, che costituiscono tutto il mondo della natura.

## NEL XIX SECOLO

... l'uomo studia i fenomeni con strumentazione sempre più potente.



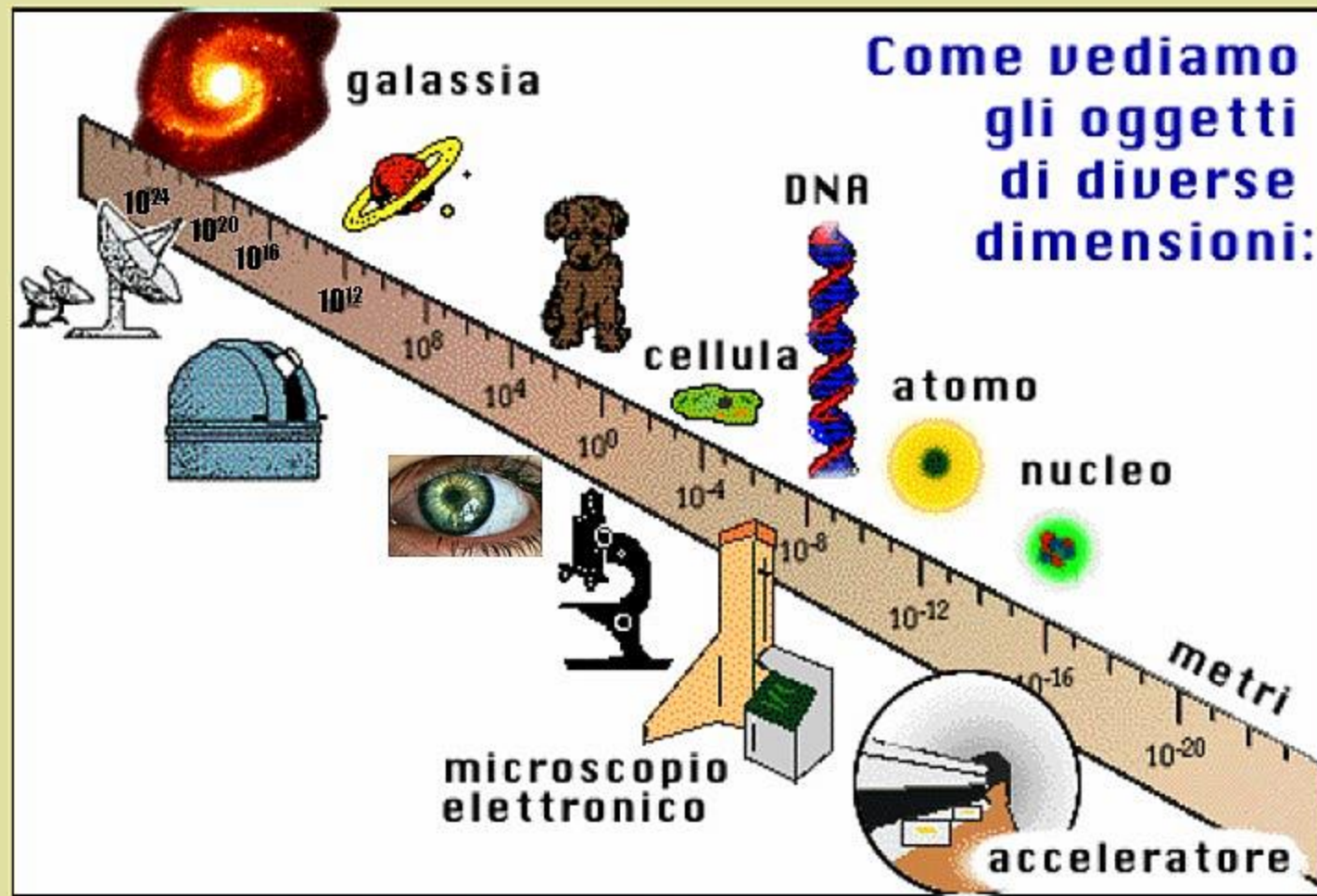


# LA FISICA ANTICA, CLASSICA E MODERNA



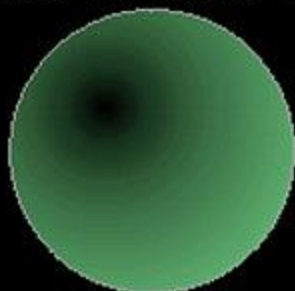
# LA FISICA MODERNA

**La fisica classica studia fenomeni su scala umana. La fisica moderna studia anche l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande.**

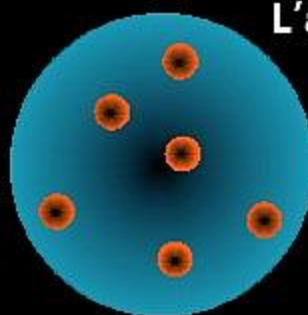


# LO SVILUPPO DELLA FISICA MODERNA

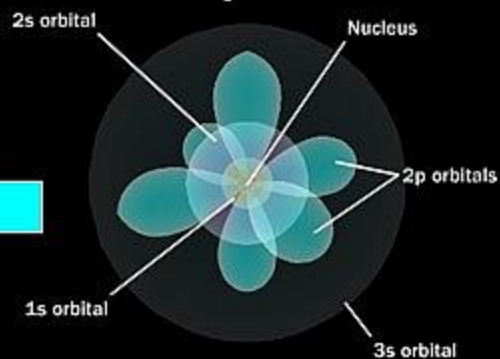
L'atomo: all'inizio del 1900



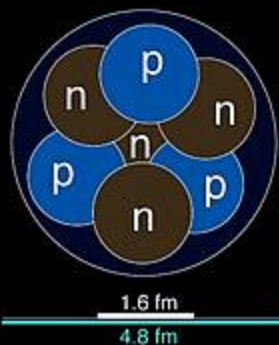
L'atomo di Thompson: 1905



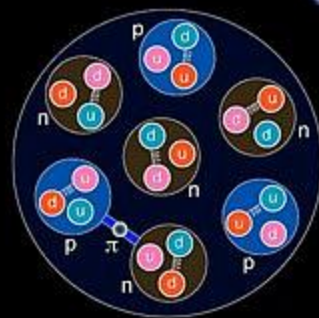
L'atomo quantistico: 1927



L'atomo di Rutherford e Bohr: 1912



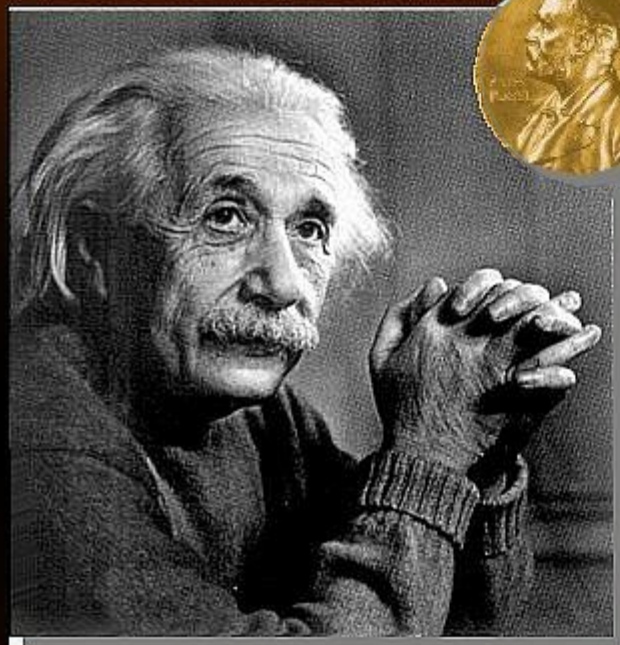
La struttura del nucleo: 1930



Il nucleo oggi  
"MODELLO STANDARD"



# Albert Einstein



Albert Einstein, nel 1905, ha pubblicato tre articoli rivoluzionari, e precisamente:

- Ha spiegato l'effetto fotoelettrico
- Ha dimostrato l'esistenza degli atomi
- Ha introdotto la teoria della Relatività

Ma che cosa è la relatività?

# PREMESSA : SISTEMI DI RIFERIMENTO

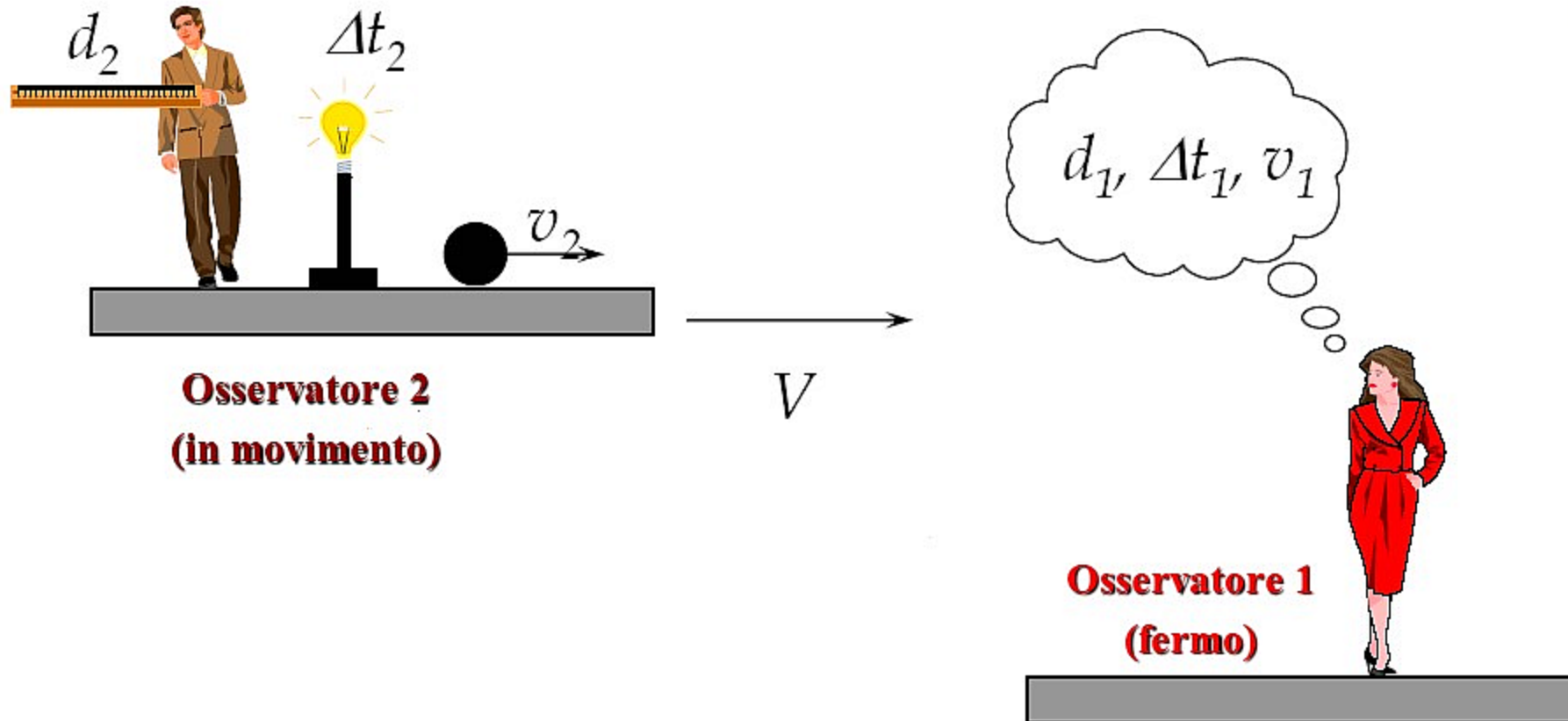
A che servono?.....



Servono a descrivere il moto  
da due diversi punti di vista:  
Uno con l'osservatore fermo e l'altro in moto.

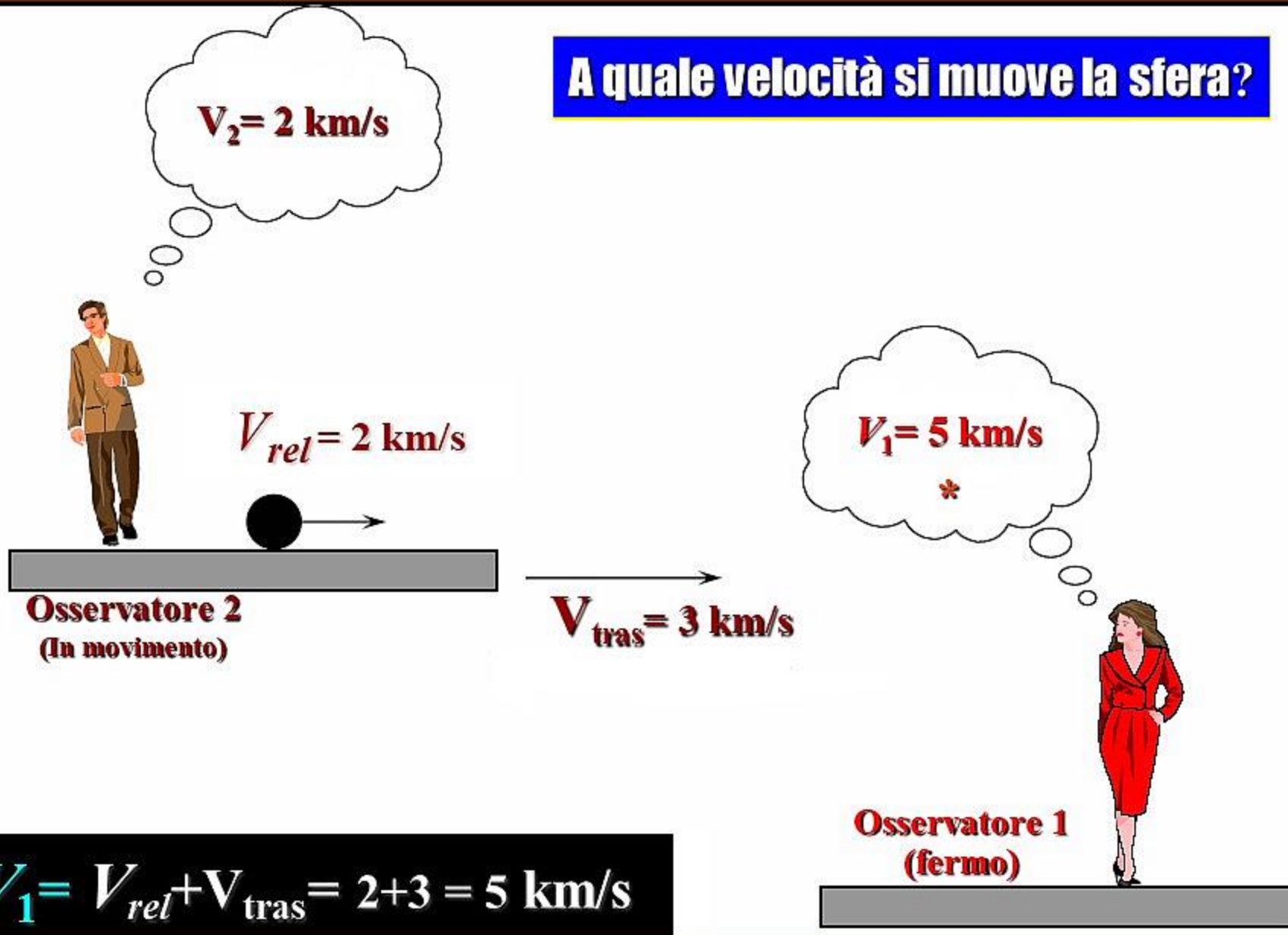


# SISTEMI DI RIFERIMENTO



# SISTEMI DI RIFERIMENTO

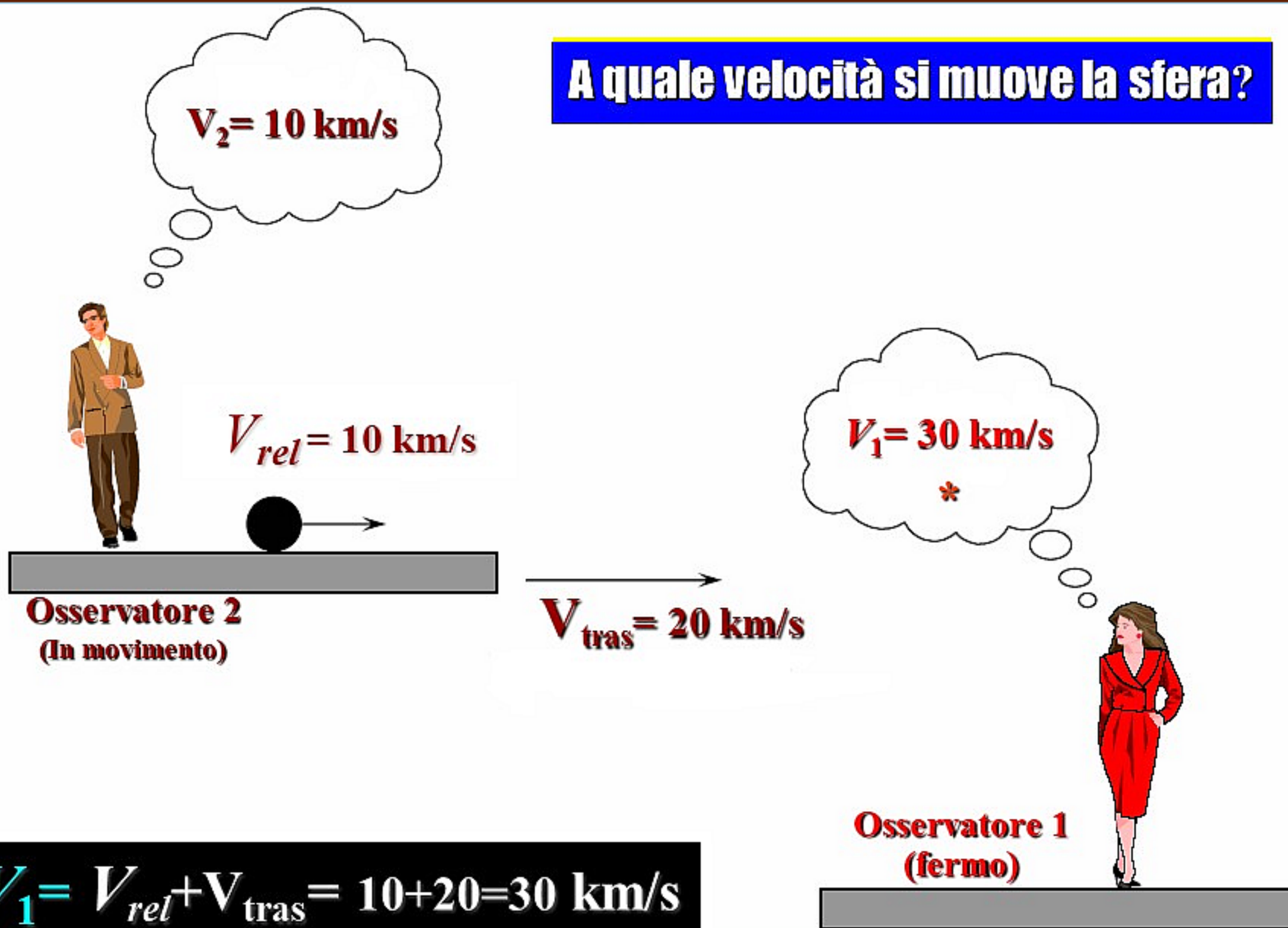
A quale velocità si muove la sfera?



\*  $V_1 = V_{rel} + V_{tras} = 2 + 3 = 5 \text{ km/s}$

# SISTEMI DI RIFERIMENTO

A quale velocità si muove la sfera?



\*  $V_1 = V_{rel} + V_{tras} = 10 + 20 = 30 \text{ km/s}$

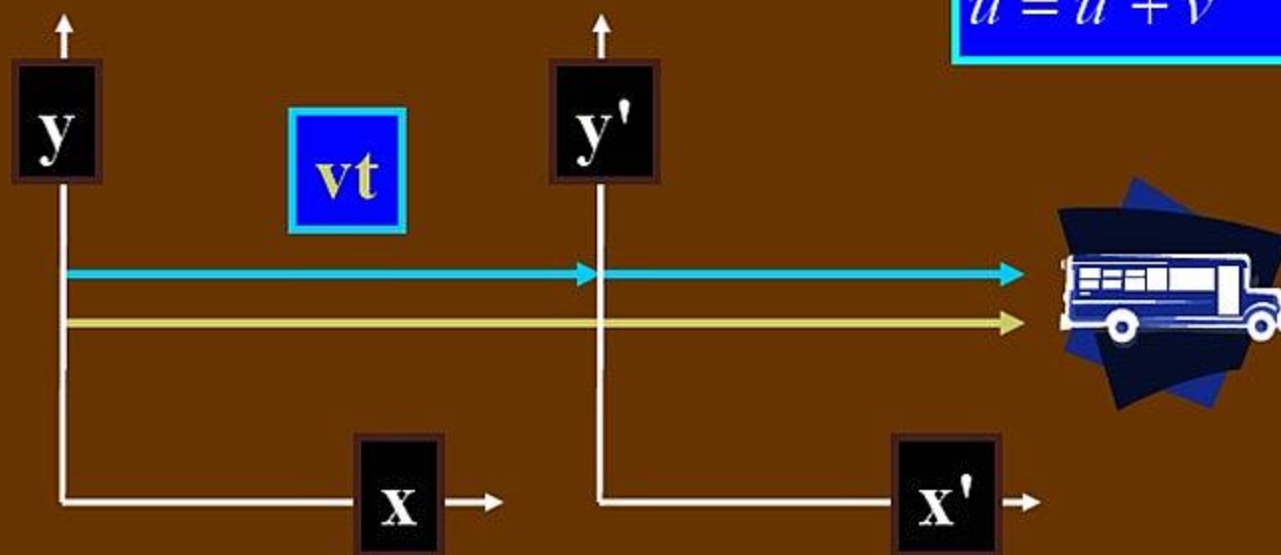


# SISTEMI DI RIFERIMENTO

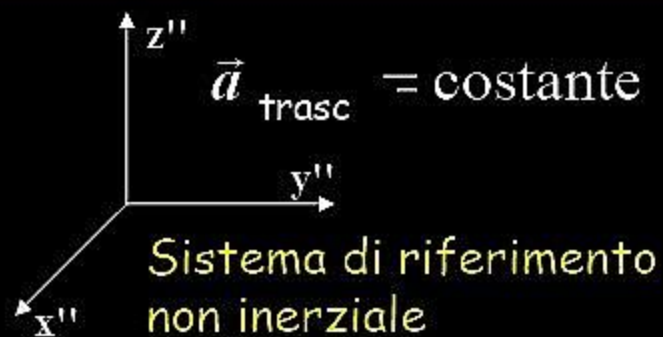
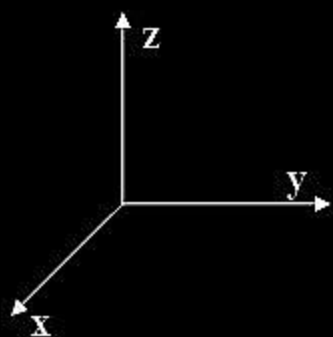
La relatività newtoniana e le trasformazioni galileiane comportano:

$$x = x' + vt, \quad t' = t$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v$$
$$u = u' + v$$



# SISTEMI DI RIFERIMENTO



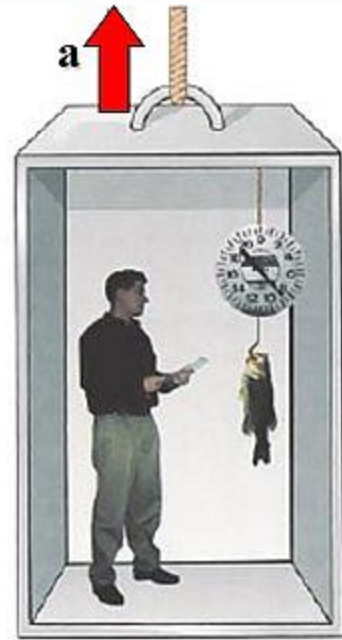
$$\vec{a}'' = \vec{a} - \vec{a}_{\text{Trasc.}}$$

$$t'' = t$$

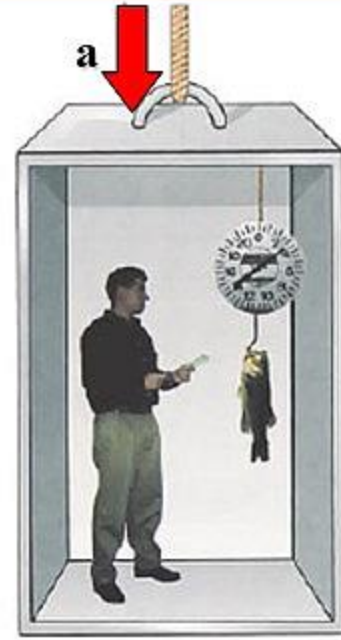
$$\vec{V}' = \vec{V} - \vec{V}_{\text{Trasc.}}$$

$$t' = t$$

# SISTEMI DI RIFERIMENTO NON INERZIALI



**Osservatore 1**  
in moto acc. =  $+a$



**Osservatore 2**  
in moto acc. =  $-a$



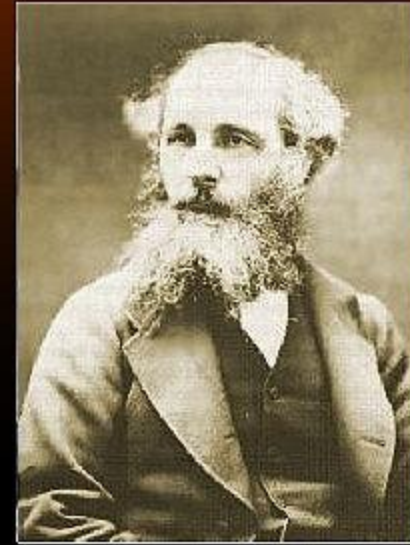
**Osservatore 3**  
(fermo)

Nei sistemi di riferimento non inerziali...il peso varia.



# LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Nel 1864 lo scienziato inglese  
**James Clerk Maxwell** scopre:



1) Le leggi che governano l'elettricità e il magnetismo

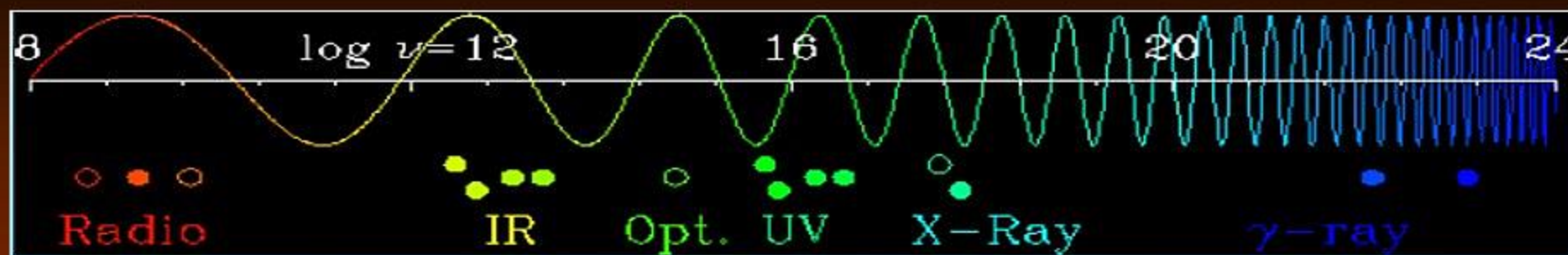
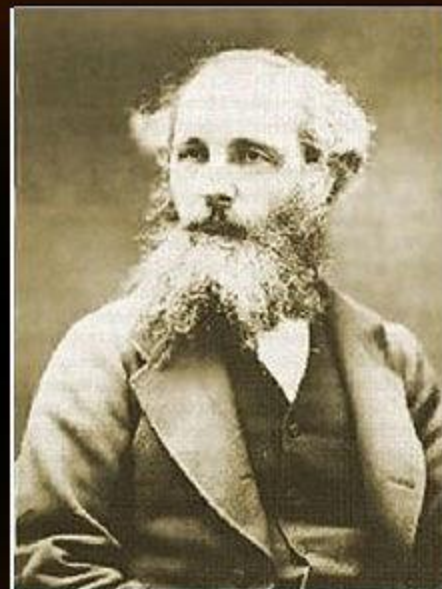
2) L'esistenza delle onde elettromagnetiche  
*es: un elettrone che oscilla nello spazio genera un campo elettromagnetico che si propaga sotto forma di onda.*

3) La velocità di propagazione delle onde è pari  
a circa 300.000 km/sec

# LA VELOCITÀ DELLA LUCE

Maxwell vide che la velocità delle onde elettromagnetiche era identica a quella della luce.

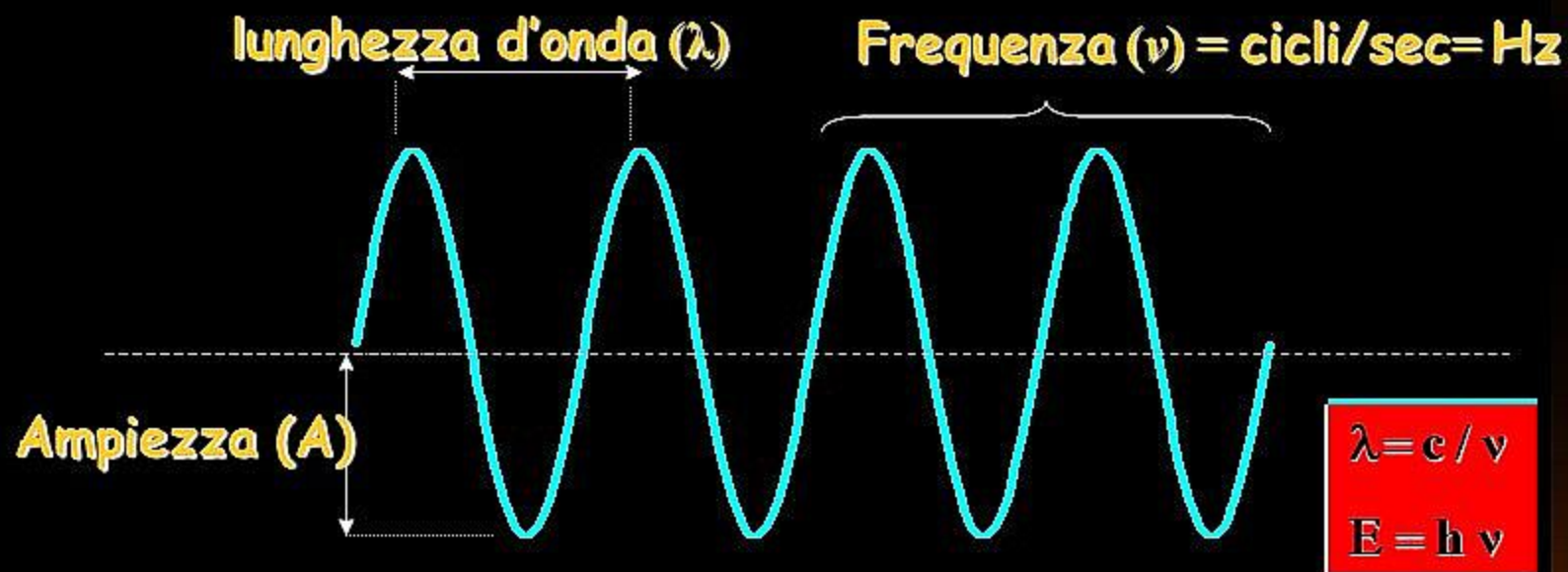
Da questo fatto ne dedusse che la stessa luce era un'onda elettromagnetica che viaggia alla velocità  $C = 300.000 \text{ km/sec}$ .





# LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

La luce è un'onda elettromagnetica, a cui è associata una **lunghezza d'onda** (distanza fra due picchi consecutivi), un'**ampiezza** (altezza dei picchi) e una **frequenza** ( $\nu$ )



La luce trasporta un' **energia** che aumenta al diminuire della sua **lunghezza d'onda** ( $\lambda$ ).



# RELAZIONE FRA ENERGIA E FREQUENZA

$$E = h \times \nu$$

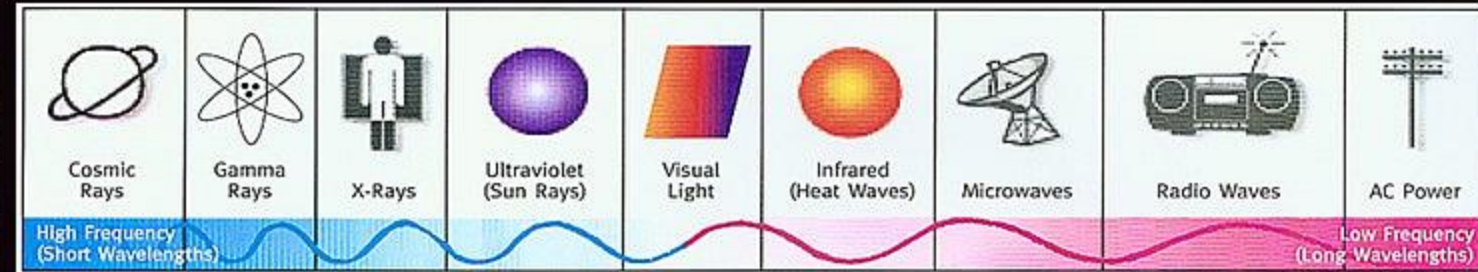
dove :

**E**, è l'energia dell'onda (joule)

**$\nu$**  , la frequenza (cicli/s *ovvero* Hz)

**h**, e' la costante di Plank (j s)

(**h** =  $6,62 \cdot 10^{-34}$  joule sec)

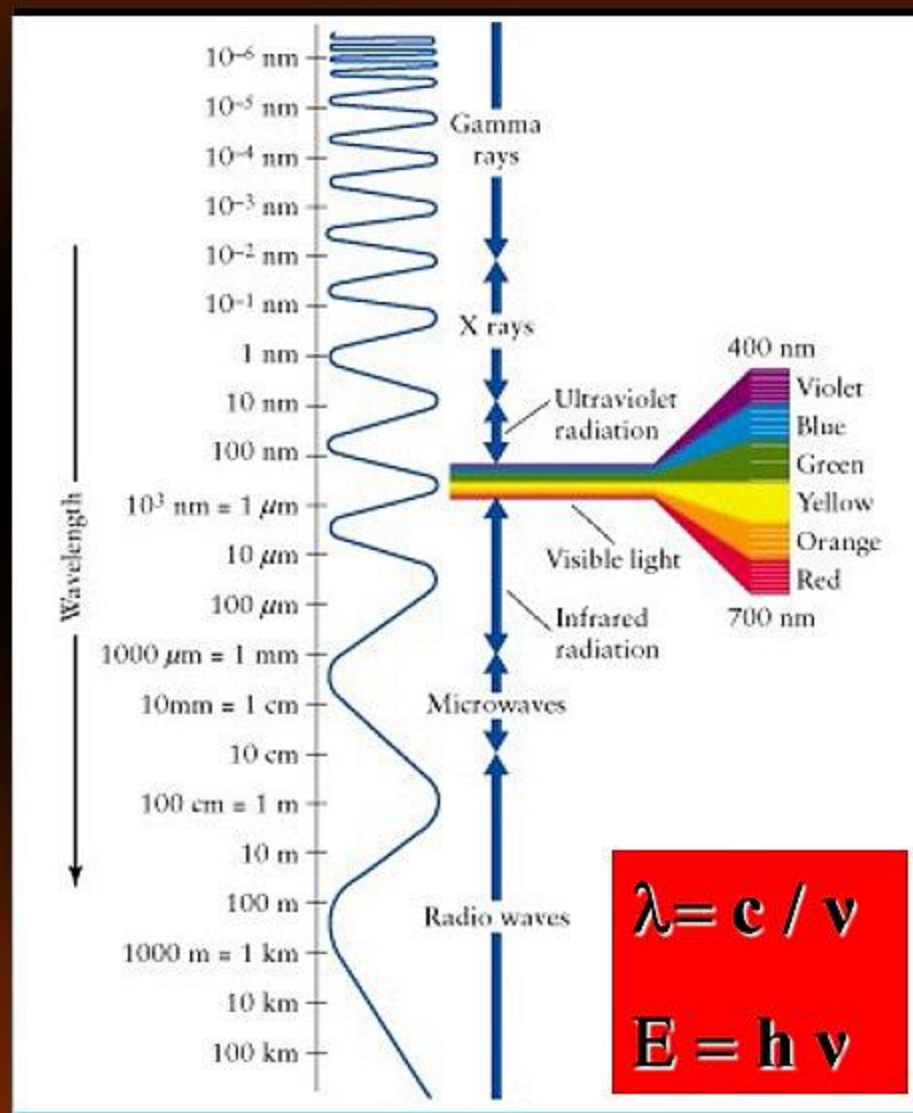


$$\lambda = c / \nu$$

$$E = h \nu$$

**E**

# LA LUCE è un'onda elettromagnetica



La luce visibile è solo un tipo di radiazione elettromagnetica emessa dai corpi.

Ogni tipo di radiazione elettromagnetica viaggia alla velocità della luce:

$V = \underline{300.000 \text{ km/sec}}$

# NATURA DUALISTICA DELLA LUCE

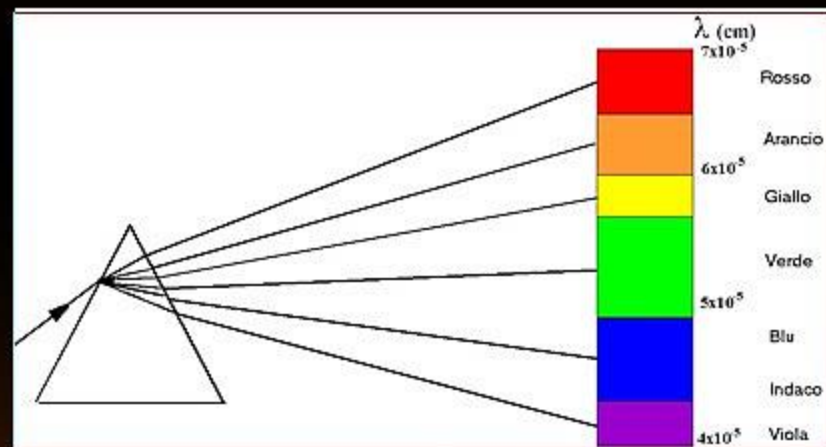
(Onda/**Particella**)

Alcuni fenomeni si possono spiegare solo assumendo che la **luce** sia costituita da un'onda e altri da una **particella**.

Onda o **Particella** appaiono come aspetti differenti della stessa cosa.

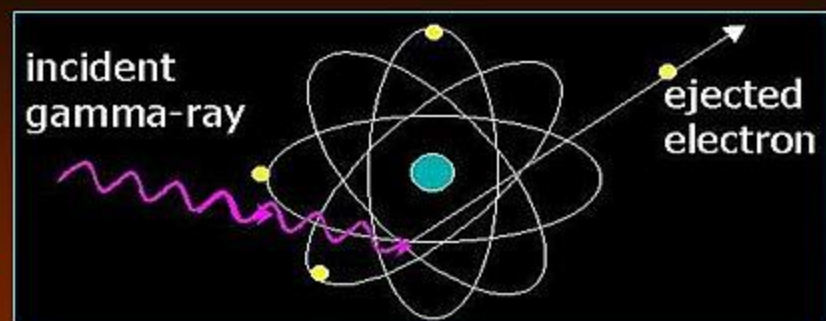
L'equazione di Planck (*onda*)

$$E = h \nu$$



L'equazione di Einstein (*particella*)

$$E = m c^2$$





# NATURA DUALISTICA DELLA LUCE

(Onda/Particella)

Onda o Particella appaiono come aspetti differenti della stessa cosa.

## Onda

- Priva di massa
- Diffusa nello spazio  
*(dimensioni mal definite)*
- Caratterizzata da:  
Energia, ampiezza  $A$ ,  
Lungh.d'onda  $\lambda$ , Frequenza  $\nu$

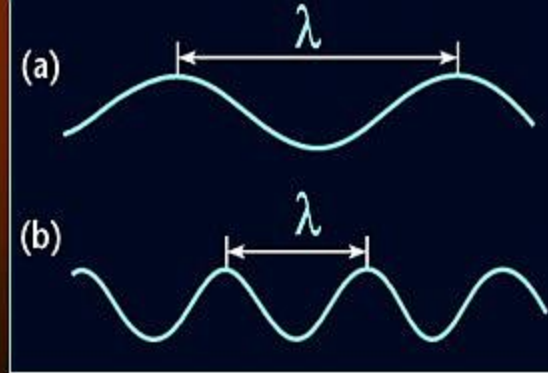
## Particella

- Possiede massa
- Localizzata in un punto  
*(dimensioni finite)*
- Caratterizzata da:  
Energia, ?;

Similitudine: trasporto di energia tra due punti....

Anche se le particelle lo possono fare con velocità diverse a seconda della loro massa-energia.

# ENERGIA DI UN'ONDA



Scambio di energia per quanti

Scambio di energia in modo continuo

dove:

$\nu$  = Frequenza (n° cicli/ sec) ;  $h$  = cost. di Plank ;  $C$  = velocità della luce

$E$  = Energia ;  $m$  = massa ;  $V$  = Velocità del corpo ;  $P$  = Quantità di moto

$$E = mc^2 = h \nu$$

$$\nu = mc^2/h$$

$$\lambda = c / \nu$$

$$\lambda = h / mc$$

Per un qualsiasi corpo in movimento:

$$\lambda = h/(mv) = h/p$$

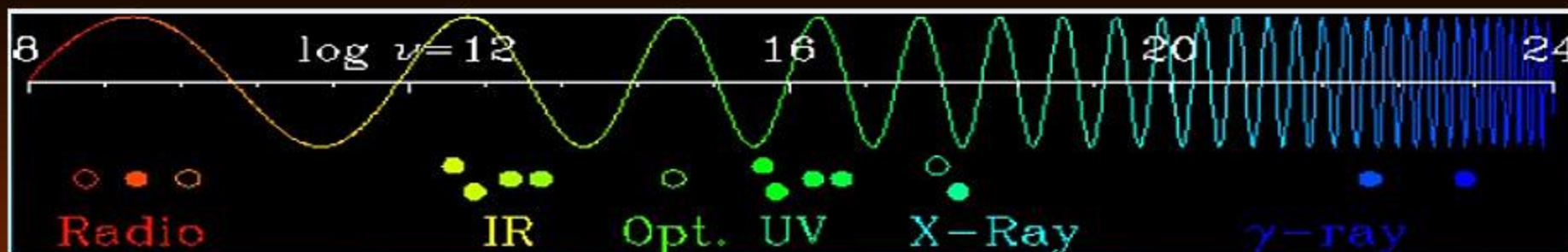
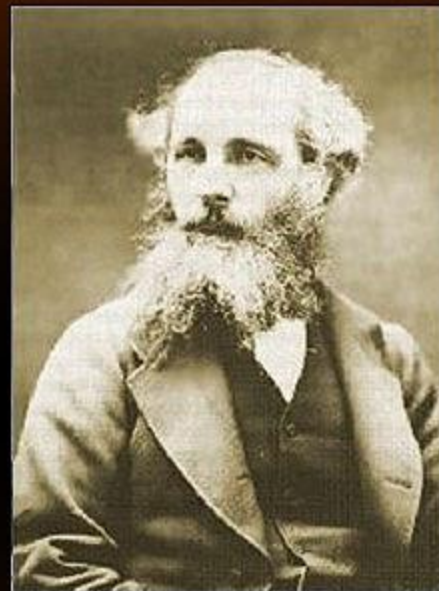
# LA VELOCITÀ DELLA LUCE

$$c = \lambda \nu = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

lunghezza d'onda

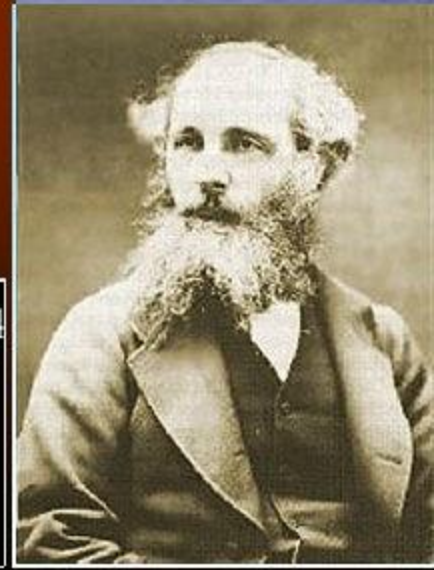
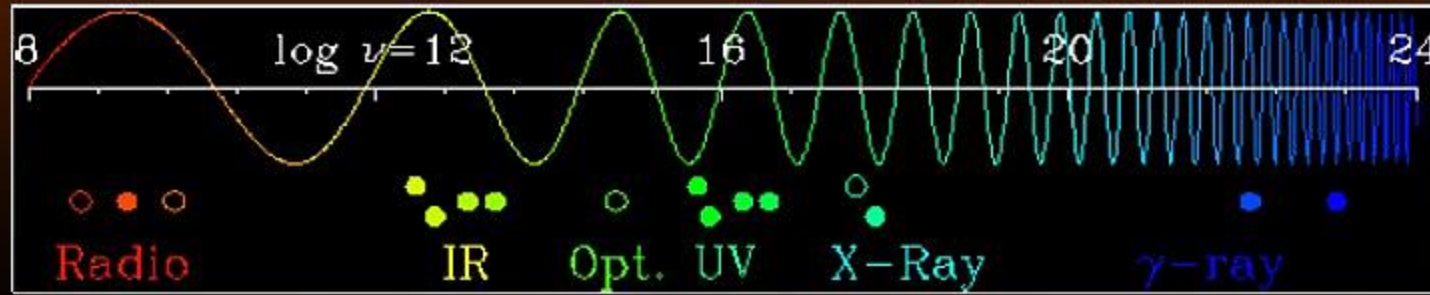
frequenza

Questo è indipendente dal sistema di riferimento e quindi non soddisfa la relatività galileiana





# IL PROBLEMA DELL'ETERE



Tutti i movimenti ondulatori si propagano in qualche elemento: le onde del mare si propagavano attraverso l'acqua, le onde sonore attraverso l'aria... ecc.

Convinto che le onde non potessero propagarsi nel vuoto, si vide bene di teorizzare l'esistenza di una sostanza che permettesse di trasportare le onde elettromagnetiche: questo elemento fu chiamato

"etere luminifero"

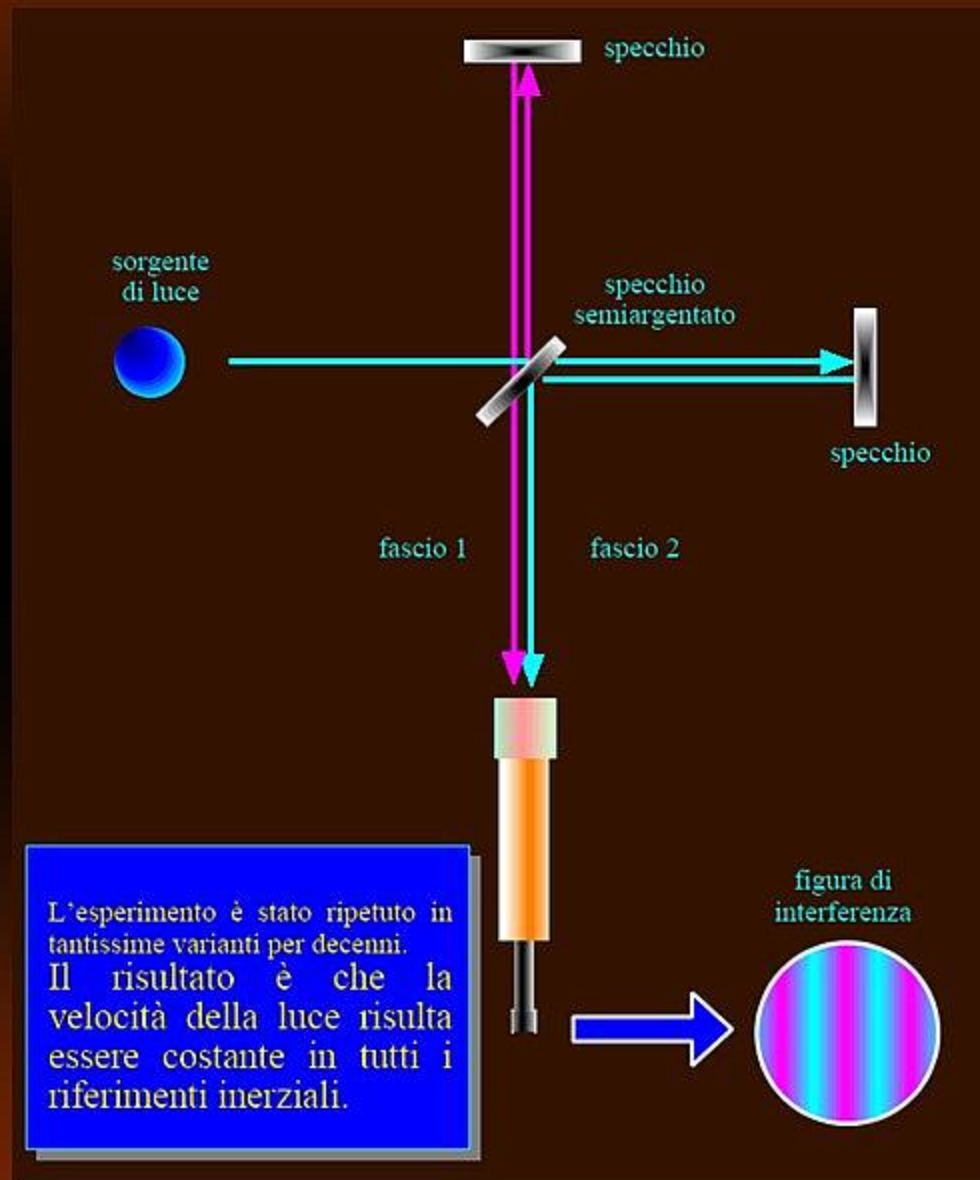
.....ma che cosa è l'etere ?

# VELOCITÀ DELLA LUCE = Cost.

Per 40 anni si è cercato di rilevare l'esistenza dell'etere....

**Michelson-Morely**, nel 1887, dopo molti esperimenti, riuscirono a dimostrare:

- l'etere non modifica la velocità della luce ...
- l'etere non esiste ...
- la luce viaggia sempre alla stessa velocità !!!  
 **$C=300.000$  km/s**





# VELOCITÀ DELLA LUCE = Cost.

Per l'Osservatore sul treno  
 $V = 300.000 \text{ km/s}$

A quale velocità si muove  
la **luce** della torcia ?

The Speed of Light



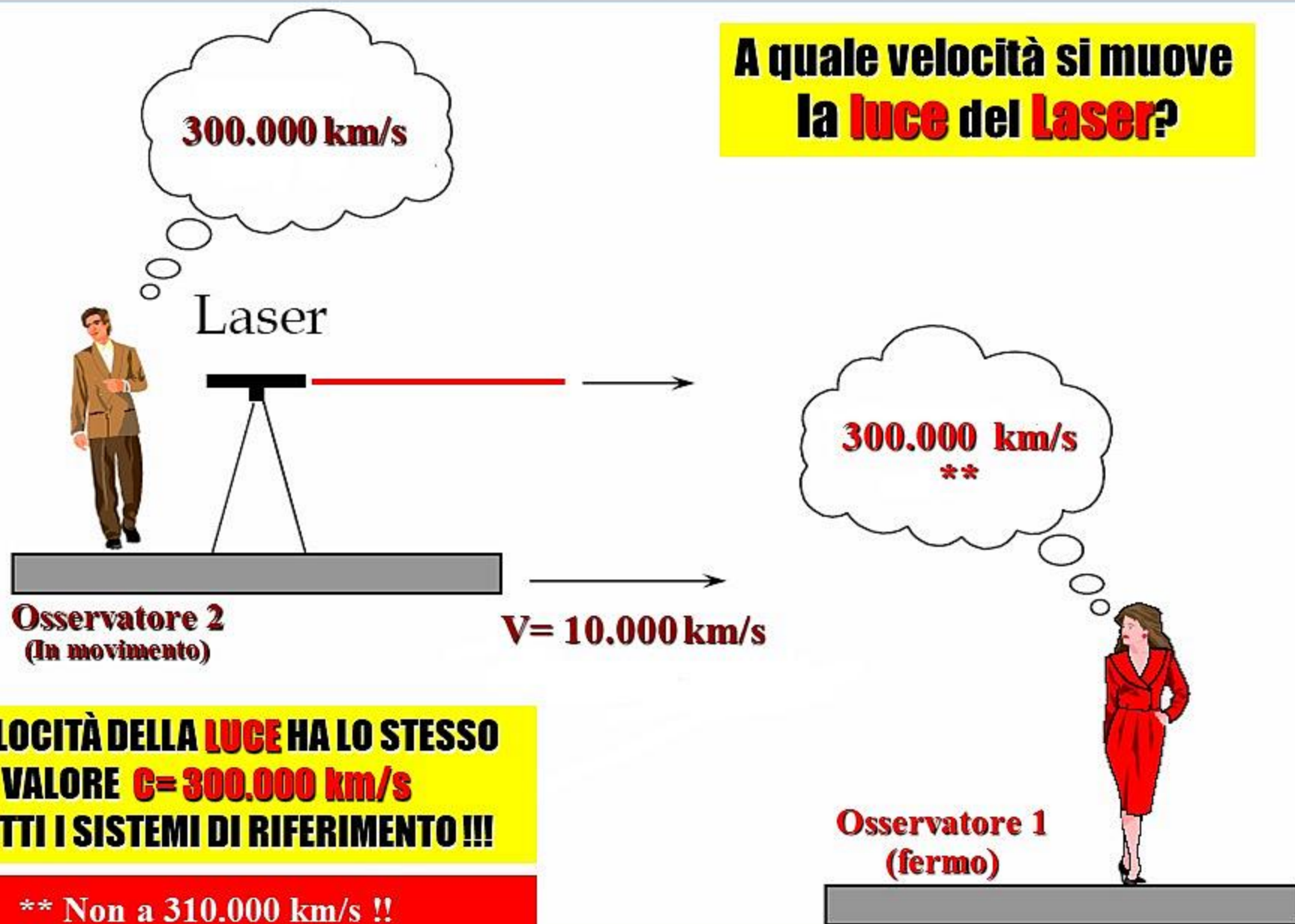
LA VELOCITÀ DELLA **LUCE** HA LO STESSO  
VALORE  **$C = 300.000 \text{ km/s}$**   
IN TUTTI I SISTEMI DI RIFERIMENTO !!!

Per l'Osservatore fermo  
 $V = 300.000 \text{ km/s}$



# VELOCITÀ DELLA LUCE = Cost.

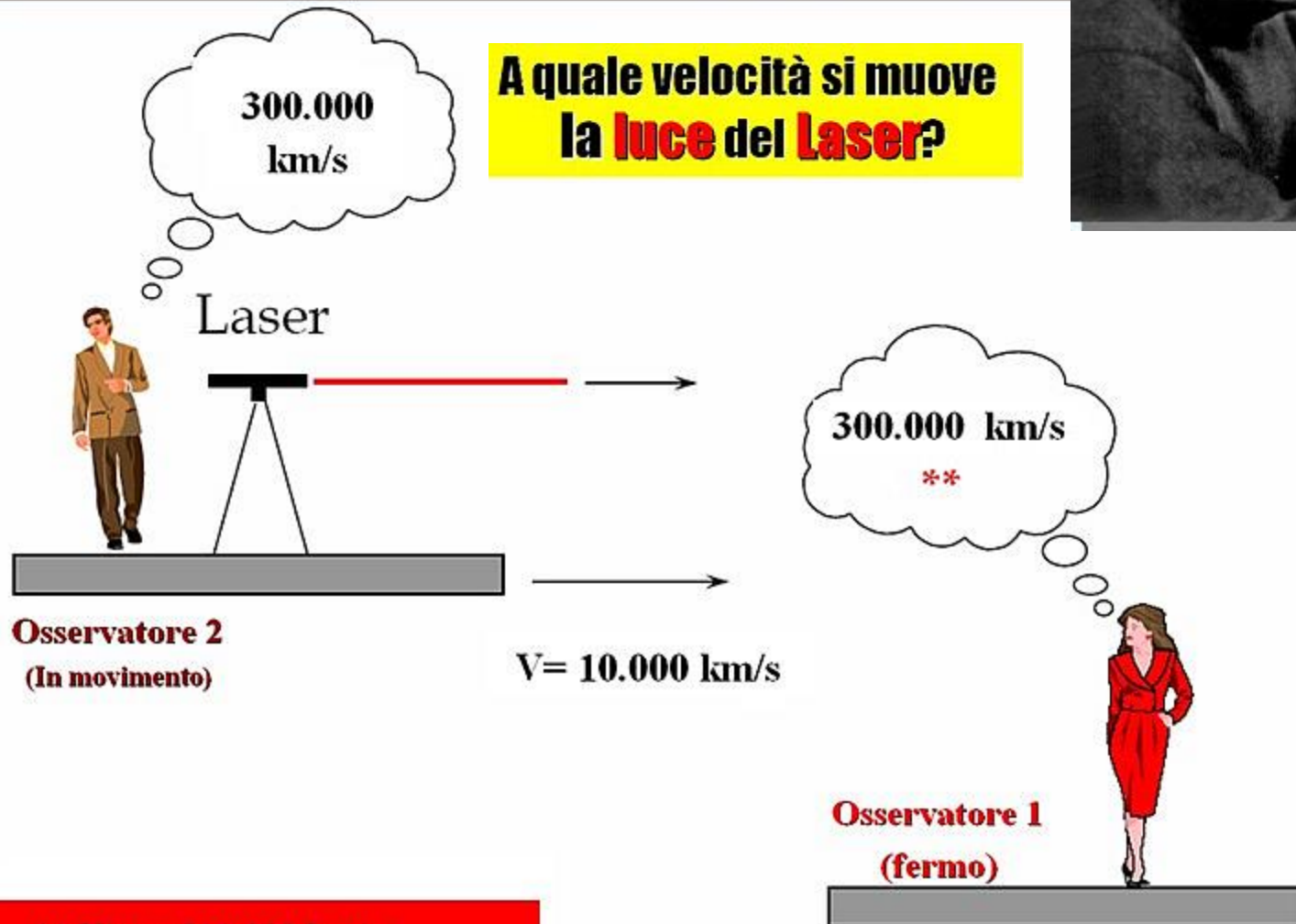
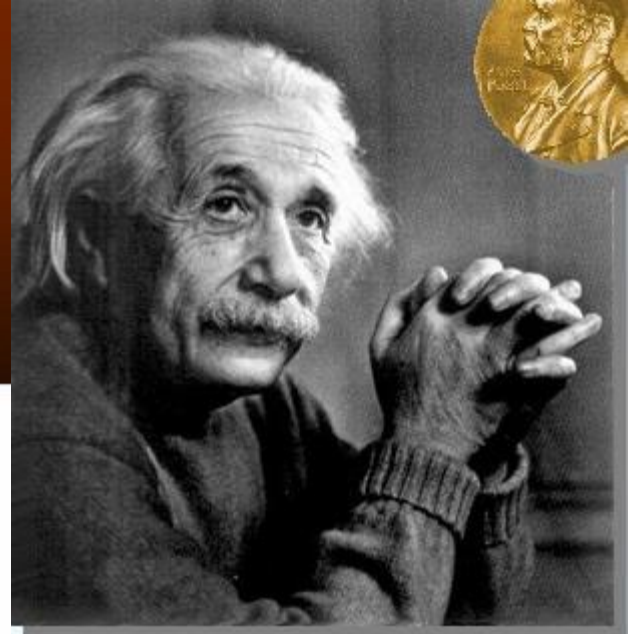
A quale velocità si muove  
la **luce** del **Laser**?



LA VELOCITÀ DELLA **LUCE** HA LO STESSO  
VALORE **C=300.000 km/s**  
IN TUTTI I SISTEMI DI RIFERIMENTO !!!

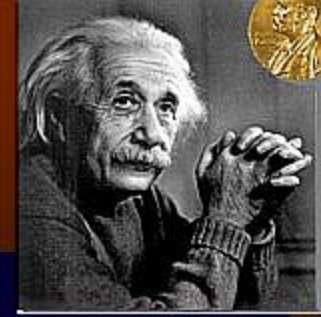
\*\* Non a 310.000 km/s !!

# $V_{\text{LUCE}} = \text{cost}$ , CHE FARE ?



\*\* Non a  $310.000 \text{ km/s}$

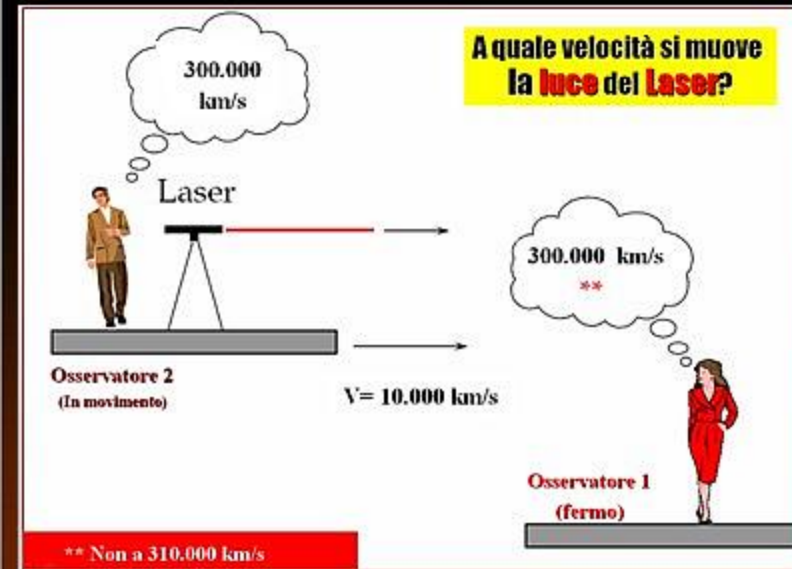
# LA VELOCITÀ DELLA LUCE



Per spiegare questo risultato, nel 1905 Einstein propose la Teoria della Relatività basata su due postulati:

- le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali.
- la velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore  $c$  in tutte le direzioni e in tutti i sistemi di riferimento inerziali.  
( $C=300.000$  km/s è una costante universale)

## The Speed of Light





# FISICA CLASSICA – FISICA MODERNA

che cosa cambia?

Per spiegare questo risultato, nel 1905 Einstein propose la Teoria della Relatività basata su due postulati:

- le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali.
- la velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore  $c$  in tutte le direzioni e in tutti i sistemi di riferimento inerziali.  
( $C=300.000$  km/s è una costante universale)

$t_1$  = TEMPO rilevato dall'osservatore sul treno.

$t_2$  = TEMPO rilevato dall'osservatore fermo.

## Adding Velocities



FISICA CLASSICA: (durata evento)

$t_1=t_2$

Osser.  
fermo

$$V_{\text{palla}} = V_{\text{relativa}} + V_{\text{treno}}$$

## The Speed of Light



FISICA MODERNA: (durata evento)

$t_1 < t_2$

$V_{\text{luce}} = 300.000$  km/s ,  
per tutti gli osservatori

# LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ

La teoria di Einstein è basata su due postulati fondamentali:

1. Le leggi della **fisica classica** sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento **inerziali**; **Principio di relatività**.
1. La **luce** si propaga nel vuoto a una velocità "c" che è **indipendente dal moto della sorgente**;  
La velocità della luce è una **costante UNIVERSALE**.

Nel vuoto, **c = 299.792.458 m/s**



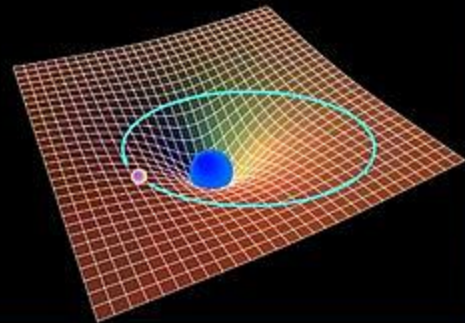
# CONSEGUENZE DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ

Le principali conseguenze della relatività sono:



1. La durata di un intervallo temporale vista da un sistema di riferimento in moto è diversa (non esiste il "tempo universale", dilatazione della scala dei tempi);
2. La lunghezza di un oggetto vista da un sistema di riferimento in moto è diversa da quella rilevata da fermo, (contrazione delle lunghezze).
3. La massa non si conserva, ma varia con la velocità.
4. La massa è una forma dell'energia;  $E = m c^2$

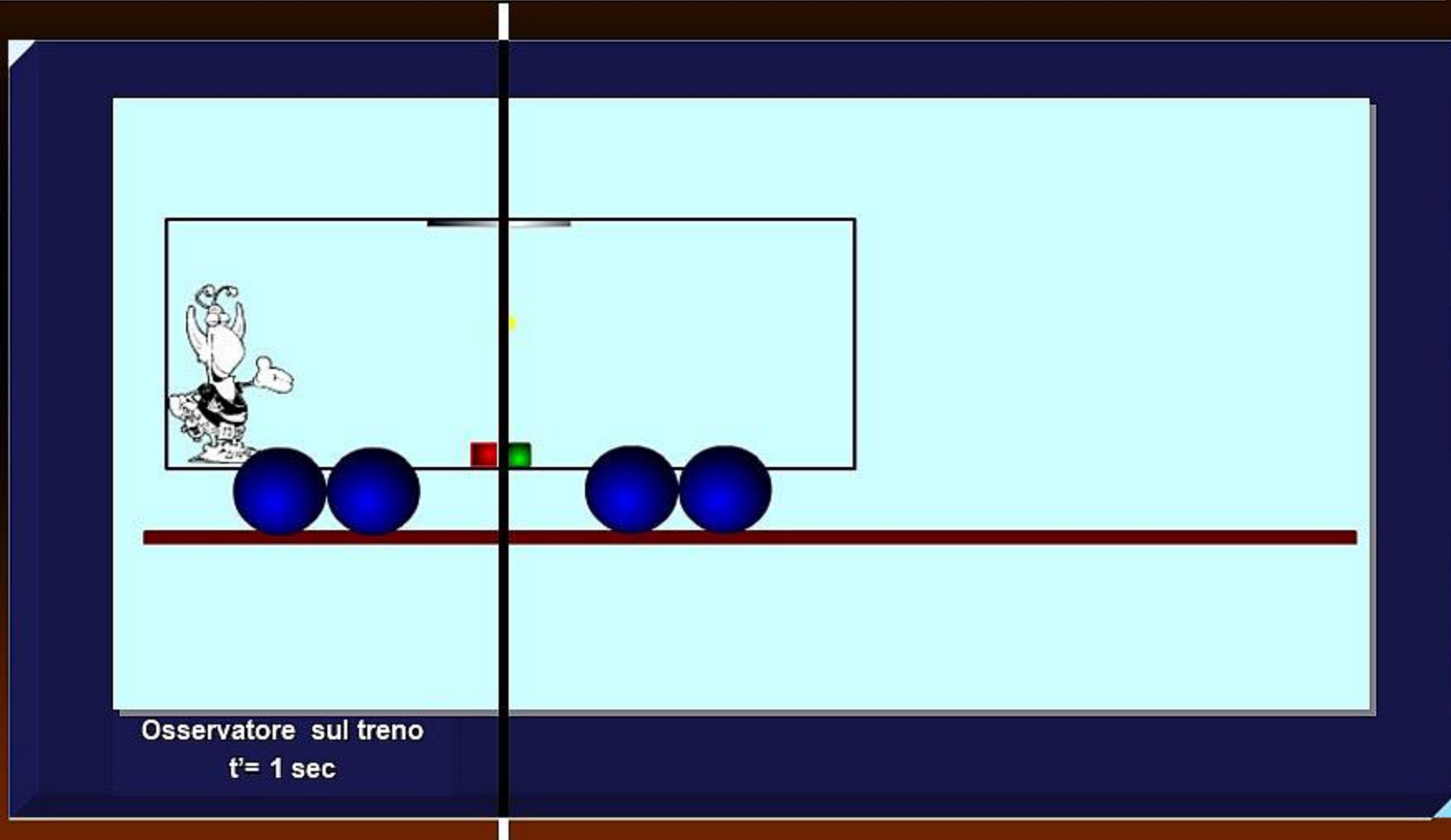
**Einstein** (1905 circa) elaborò dapprima la teoria della relatività ristretta o speciale, cioè relativa ai sistemi di riferimento inerziali. Dopo elaborò la teoria della relatività generale.





# DILATAZIONE DEL TEMPO

Un **impulso luminoso** è emesso da un **dispositivo sul pavimento** del treno. L'impulso luminoso rimbalza dallo specchio sul soffitto ed è riflesso su un **rivelatore** sul pavimento. Il tempo  $t'$ , dall'emissione alla rilevazione del segnale, è rilevato dall'osservatore sul treno.

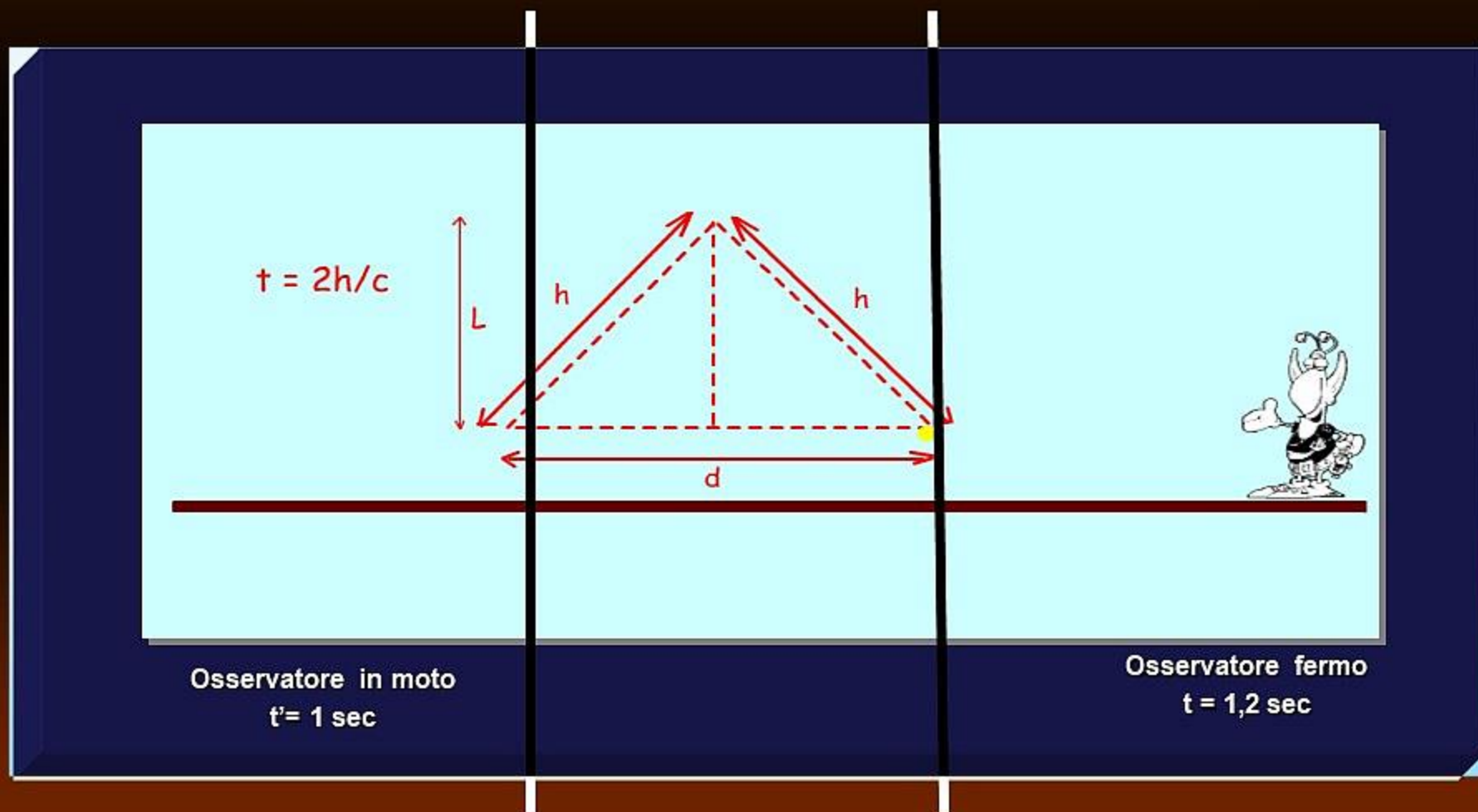


# DILATAZIONE DEL TEMPO

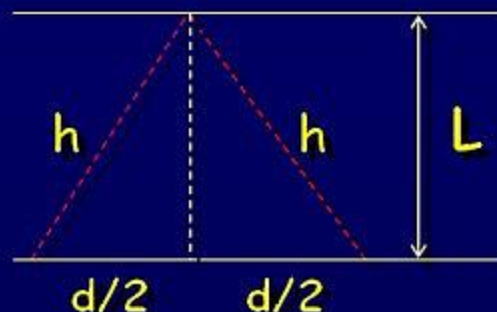
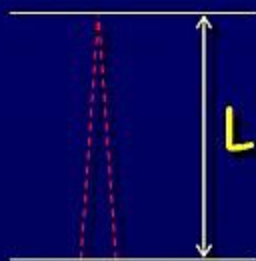
Il treno si muove a **velocità costante**.

Due osservatori, uno sul treno in moto e l'altro fermo a terra, rilevano i tempi  $t'$  e  $t$ , dall'**emissione** alla **rilevazione** del **segnale**.

ENTRA IN GIOCO IL TEMPO !!!



# DIMOSTRAZIONE



Per l'osservatore in moto  
si ha:

$$t' = \frac{2L}{c}$$

Per l'osservatore fermo  
si ha:

$$t = \frac{2h}{c}$$

Il treno si muove alla velocità  $v$ , pertanto  $d = v t$

Applicando il teorema di PITAGORA, si ha:  $h^2 = (\frac{1}{2}d)^2 + L^2$

Sostituendo ad  $h = (c t / 2)$ ,  $d = v t$  e a  $L = c t' / 2$  si ha:

$$\left(\frac{ct}{2}\right)^2 = \left(\frac{vt}{2}\right)^2 + \left(\frac{ct'}{2}\right)^2$$

Semplificando si ottiene:



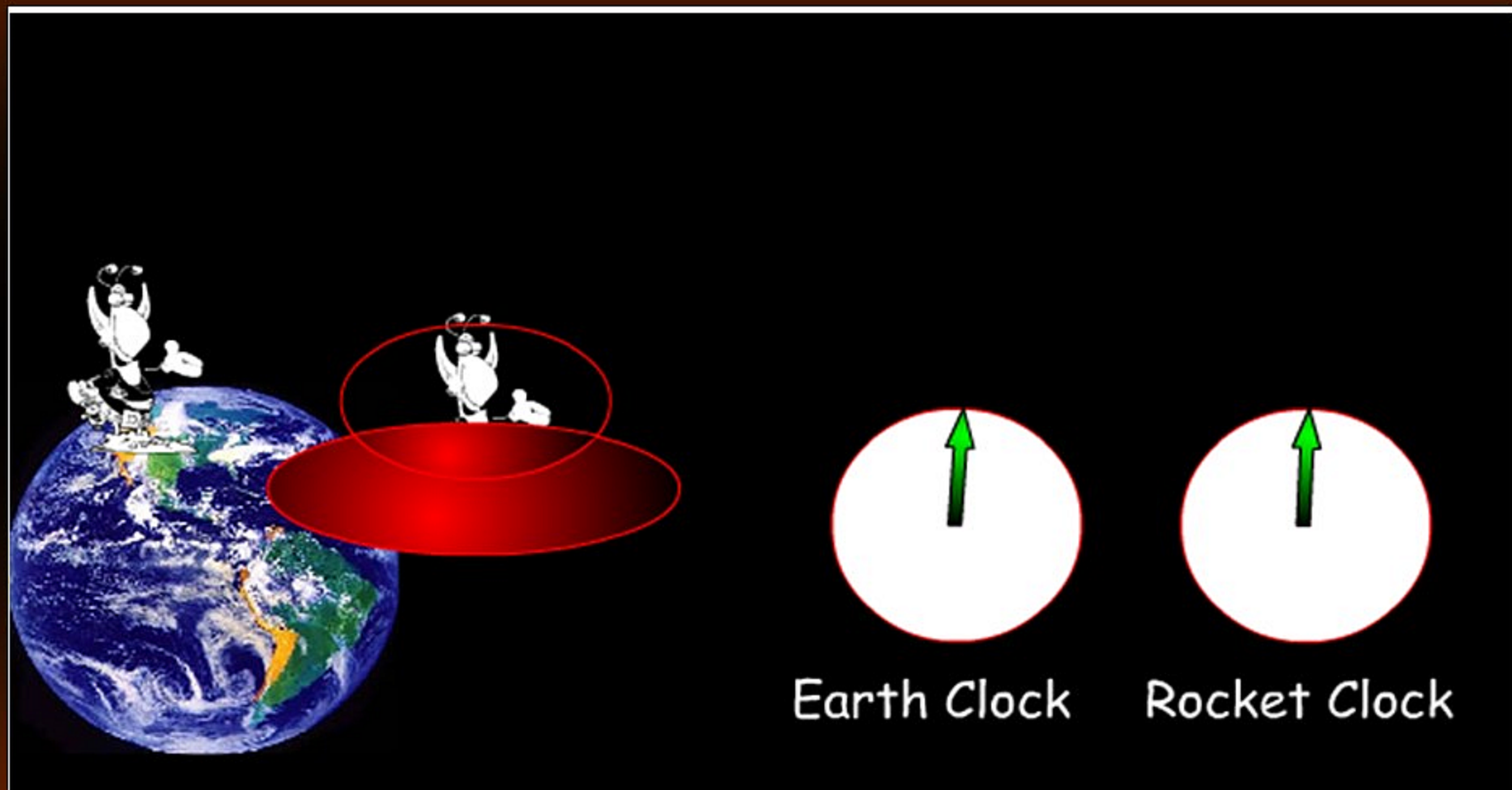
$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$





# DILATAZIONE DEL TEMPO

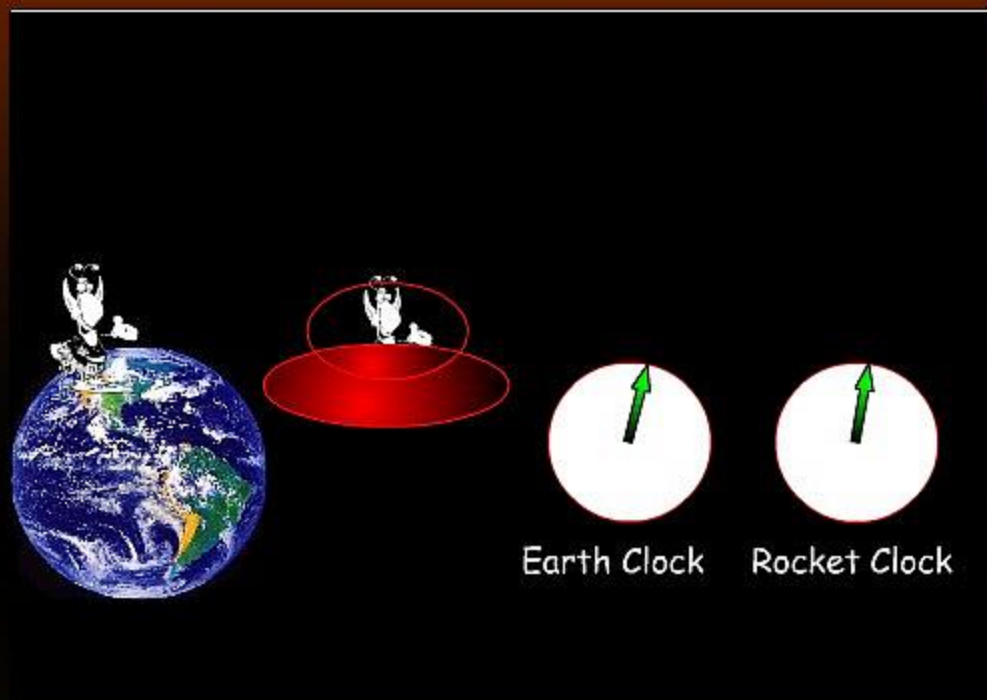
## PARADOSSO DEI GEMELLI



Orologio  
dell'osservatore  
a terra

Orologio  
dell'osservatore  
sull'astronave

# DILATAZIONE DEL TEMPO



Orologio dell'osservatore a terra

Orologio dell'osservatore sull'astronave

L'orologio della stazione Russa MIR, che viaggiava alla Velocità di 7,7 km/s , in un anno ha ritardato di 0,01sec ..... valore molto piccolo perché il rapporto v/c era piccolo. ( $v/c = 2,566 \text{ E-}5$ )

Con  $v/c=0,991$  avremmo avuto:  
 - Orologio a terra = 365 di (1di = 1 giorno)  
 - Orologio nella MIR = 48 di (ritardo= 317 di)

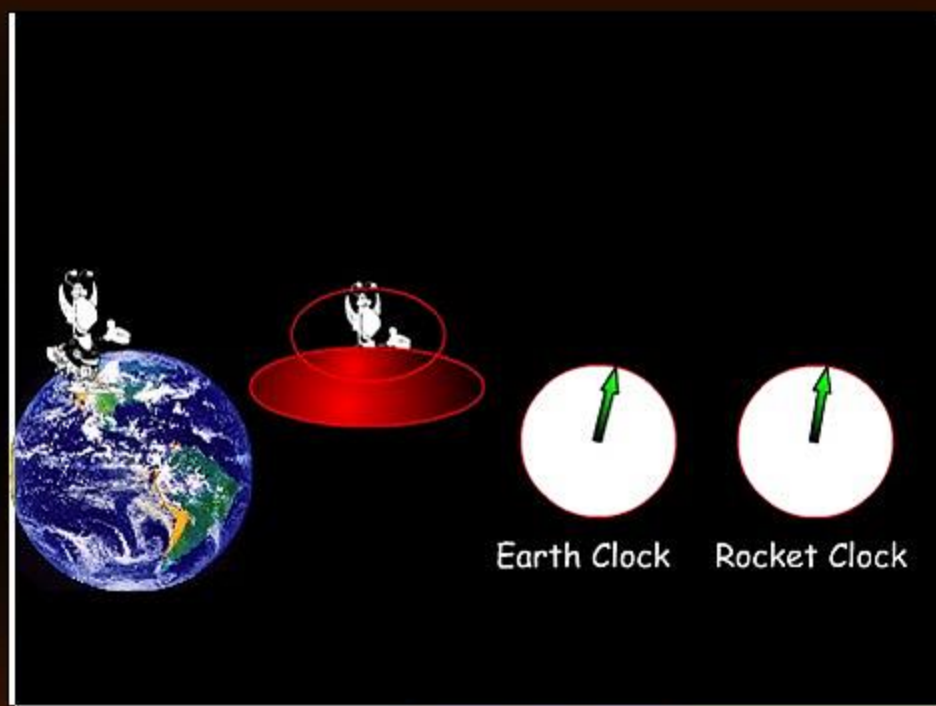
Rapporto v/c	Velocità in (Km/s)	Orologio a terra (di)	Orologio astronave (di)
0	-	365,0	365,0
2,56667E-05	7,7	365,0	365,0
0,068965517	20.690	365,0	364,1
0,103448276	31.034	365,0	363,0
0,137931034	41.379	365,0	361,5
0,172413793	51.724	365,0	359,5
0,206896552	62.069	365,0	357,1
0,24137931	72.414	365,0	354,2
0,275862069	82.759	365,0	350,8
0,310344828	93.103	365,0	347,0
0,344827586	103.448	365,0	342,6
0,379310345	113.793	365,0	337,7
0,413793103	124.138	365,0	332,3
0,448275862	134.483	365,0	326,3
0,482758621	144.828	365,0	319,7
0,517241379	155.172	365,0	312,4
0,551724138	165.517	365,0	304,4
0,586206897	175.862	365,0	295,7
0,620689655	186.207	365,0	286,2
0,655172414	196.552	365,0	275,7
0,689655172	206.897	365,0	264,3
0,724137931	217.241	365,0	251,7
0,75862069	227.586	365,0	237,8
0,793103448	237.931	365,0	222,3
0,827586207	248.276	365,0	204,9
0,862068966	258.621	365,0	185,0
0,896551724	268.966	365,0	161,7
0,931034483	279.310	365,0	133,2
0,951034483	285.310	365,0	112,8
0,971034483	291.310	365,0	87,2
0,991034483	297.310	365,0	48,8
MIR-Russa Diff.tempo=			-0,01 sec.



# DILATAZIONE DEL TEMPO

Con  $v \rightarrow 0$  abbiamo  $t \rightarrow t'$

Con  $v \rightarrow c$  abbiamo  $t' \rightarrow 0$



Orologio dell'osservatore a terra ( $t$ )

Orologio dell'osservatore sull'astronave ( $t'$ )

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

Rapporto $v/c$	Velocità in (Km/s)	Orologio a terra (anni)	Orologio astronave (anni)
0	-	100,0	100,0
0,03448276	10.345	100,0	99,9
0,06896552	20.690	100,0	99,8
0,10344828	31.034	100,0	99,5
0,13793103	41.379	100,0	99,0
0,17241379	51.724	100,0	98,5
0,20689655	62.069	100,0	97,8
0,24137931	72.414	100,0	97,0
0,27586207	82.759	100,0	96,1
0,31034483	93.103	100,0	95,1
0,34482759	103.448	100,0	93,9
0,37931034	113.793	100,0	92,5
0,4137931	124.138	100,0	91,0
0,44827586	134.483	100,0	89,4
0,48275862	144.828	100,0	87,6
0,51724138	155.172	100,0	85,6
0,55172414	165.517	100,0	83,4
0,5862069	175.862	100,0	81,0
0,62068966	186.207	100,0	78,4
0,65517241	196.552	100,0	75,5
0,68965517	206.897	100,0	72,4
0,72413793	217.241	100,0	69,0
0,75862069	227.586	100,0	65,2
0,79310345	237.931	100,0	60,9
0,82758621	248.276	100,0	56,1
0,86206897	258.621	100,0	50,7
0,89655172	268.966	100,0	44,3
0,93103448	279.310	100,0	36,5
0,95103448	285.310	100,0	30,9
0,97103448	291.310	100,0	23,9
0,99103448	297.310	100,0	13,4

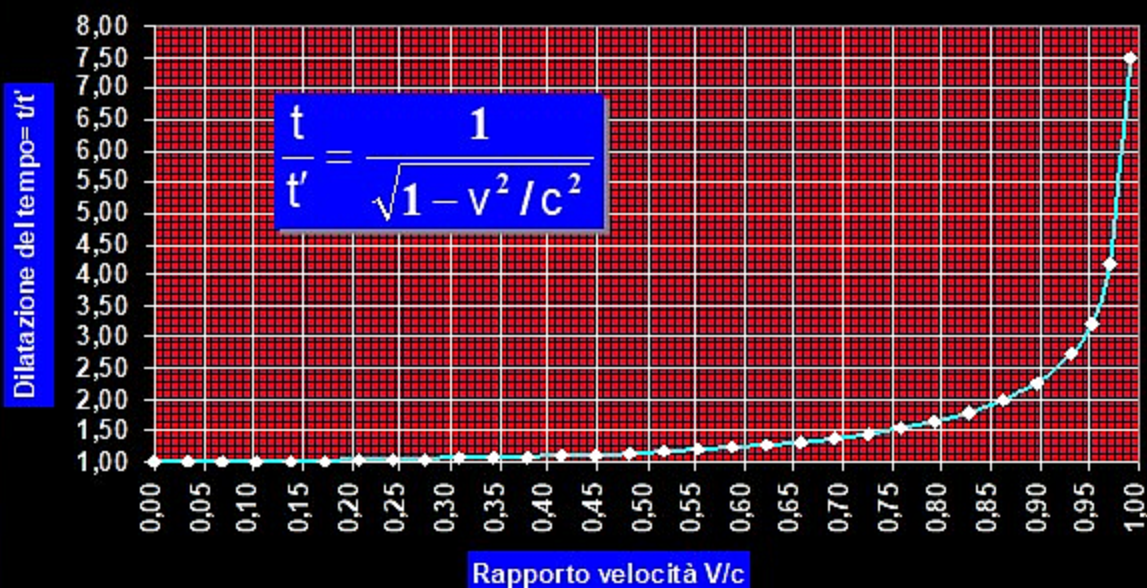


# DILATAZIONE DEL TEMPO



Con  $v \rightarrow 0$  abbiamo  $t \rightarrow t'$   
Con  $v \rightarrow c$  abbiamo  $t' \rightarrow 0$

## DILATAZIONE DEL TEMPO $t/t'$ IN FUNZIONE DEL RAPPORTO $V/c$



Orologio dell'osservatore a terra



Orologio dell'osservatore sull'astronave



# CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

Analogamente per il **tempo**, le **trasformazioni di Lorentz** possono essere usate per vedere come varia la misura della **distanza** nei due sistemi di riferimento.

Soltanto le distanze **lungo il verso del moto** sono influenzate.

Infatti troviamo:

$$l = l' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

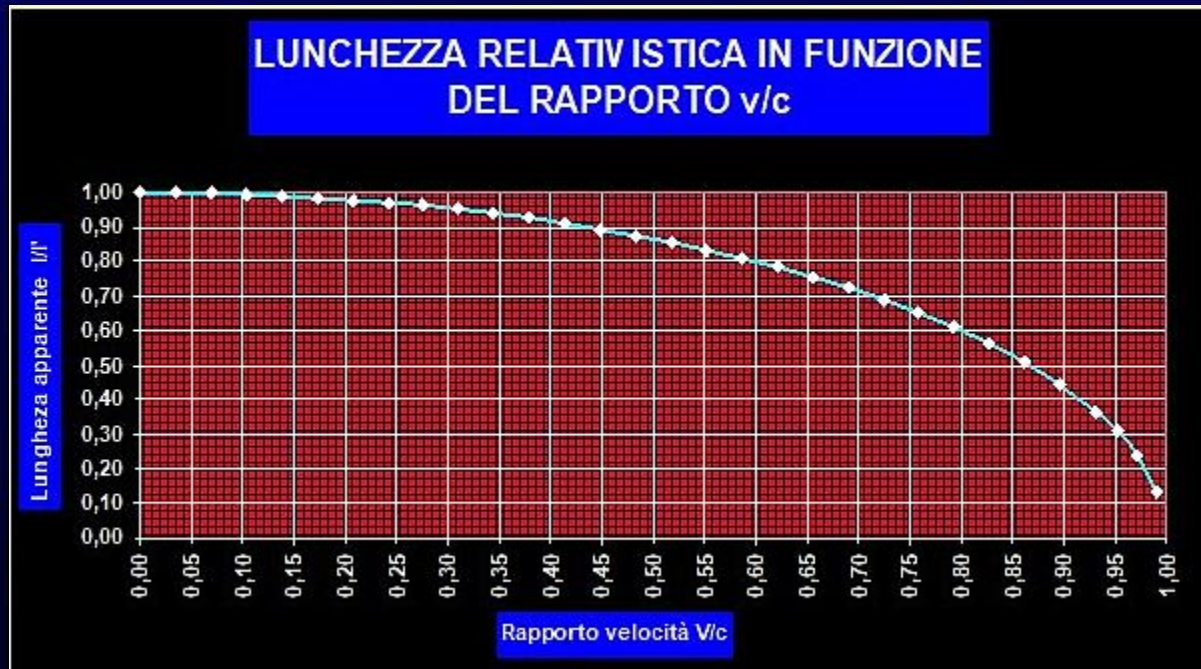
Dove la **l** è una lunghezza di un oggetto nel senso del moto, misurata dall'osservatore fermo, ed **l'** è la lunghezza dello stesso oggetto misurata dall'osservatore che si muove alla velocità **v**.

L'osservatore fermo vede quindi una **contrazione nella** lunghezza di un oggetto **misurata** lungo il verso del moto.



# CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

$$l = l' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$



Velocità v/c	lunghezza apparente
0	1.000
0.2	0.980
0.4	0.917
0.6	0.800
0.8	0.600
0.9	0.436
0.95	0.312
0.99	0.141
0.995	0.100
0.999	0.045
0.9999	0.014

**NB:** Le trasformazioni di Lorentz sono simmetriche .... l'astronauta in moto vede la terra contrarsi, l'osservatore a terra vede l'astronave in moto contrarsi.



# CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE



Un oggetto in moto si contrae lungo la direzione del moto rispetto ad uno identico a riposo .....



$$v = 0,1 c$$



$$v = 0,865 c$$



$$v = 0,99 c$$



$$v = 0,999 c$$

# LA CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

Come misuro la lunghezza di una asta se questa è in movimento?

Devo **simultaneamente** determinare la posizione del punto iniziale e del punto finale dell'asta

La simultaneità è relativa



Una lunghezza è relativa!

# LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

Le equazioni di **Lorentz** che descrivono la **dilatazione del tempo** e la **contrazione delle lunghezze**, sono:

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

$$l = l' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Il peso delle equazioni di **Lorentz** si fa maggiormente sentire quando la velocità **v** si avvicina alla velocità **c** della luce.

Dove **t** ed **l** si riferiscono al sistema di riferimento fermo, mentre **t'** ed **l'** a quello in moto.

- NB: - La **lunghezza** è influenzata solo nel **verso del moto**.  
- Per la luce in se il tempo e la distanza non hanno significato. La luce esiste in un universo dove il tempo è istantaneo e tutte le distanze sono infinitamente piccole.



# MASSA RELATIVISTICA

Possiamo viaggiare alla **velocità della luce**?

La **teoria della Relatività** dice **no!**

Infatti la **massa relativistica** di un corpo in movimento è data dalla seguente relazione:

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

Dove: **m'** è la **massa a riposo**, ovvero la massa del corpo con  $v = 0$ .

**m** è la **massa relativistica** che varia con la velocità **v**.

ovvero la massa del corpo alla velocità **v**.

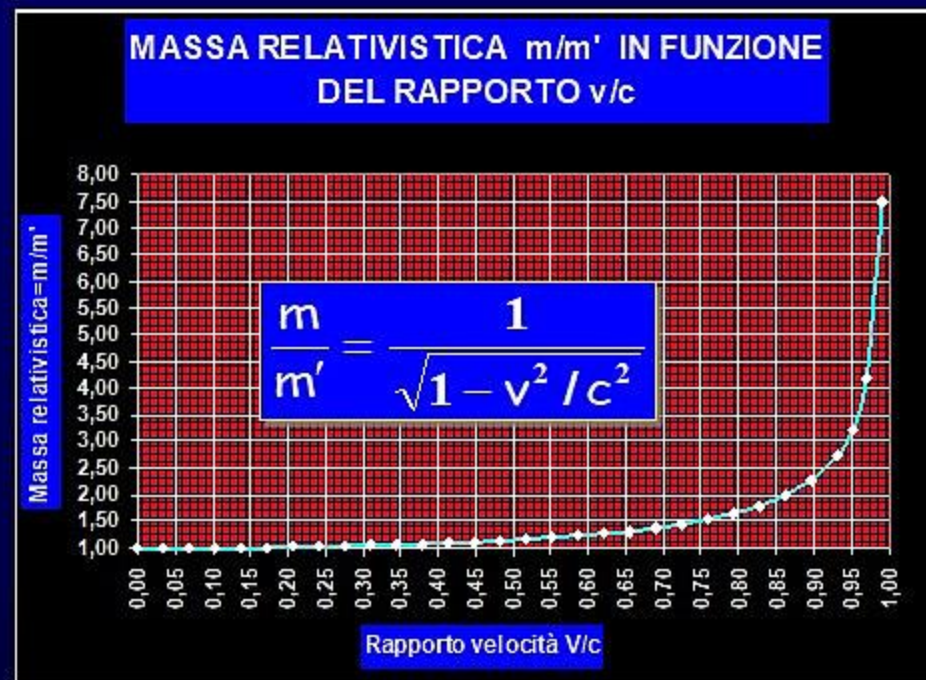
Quando la velocità **v** si avvicina a **c** la massa tende ad infinito.

E per questo motivo **che non possiamo viaggiare alla velocità della luce e tanto meno oltre!!**

# RAPPORTO = $m/m'$

Il rapporto tra  $m/m'$  è dato dalla seguente relazione:

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



Dove:  $m'$  è la **massa a riposo**, ovvero la massa del corpo con  $v = 0$ .

$m$  è la **massa relativistica** che varia con la velocità  $v$ .  
ovvero la massa del corpo alla velocità  $v$ .

Quando la velocità  $v$  si avvicina a  $c$  il rapporto  $m/m'$  tende ad infinito.  
E per questo motivo che non possiamo viaggiare alla velocità della luce e tanto meno oltre!!



# DINAMICA RELATIVISTICA

Anche se la Teoria della Relatività ristretta si interessa solo di oggetti che si muovono a **velocità costante** e utile conoscere come varia **l'accelerazione** al variare della **forza**.

Dalla fisica classica sappiamo che:

$$\text{Forza} = \text{massa} \times \text{accelerazione}$$


**Newton** calcola **a** con la relazione:

$$a = \frac{F}{m}$$

**Einstein**, calcola **a** con la seguente relazione:

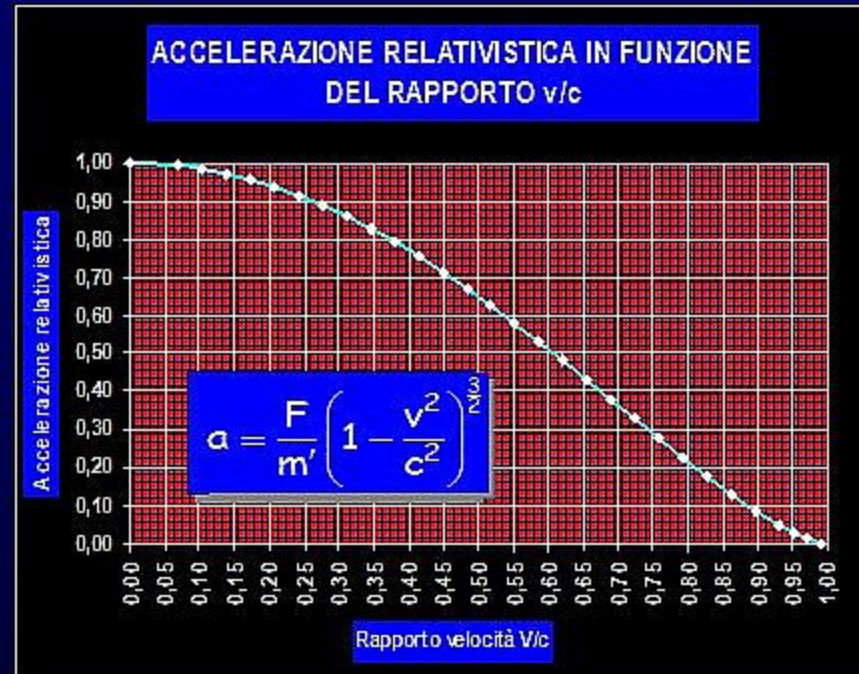
$$a = \frac{F}{m'} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$



# DINAMICA RELATIVISTICA

$$a = \frac{F}{m'} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

L'equazione di **Einstein** ci dice che se applichiamo una forza costante su un oggetto esso inizia ad accelerare, nel campo delle basse velocità, seguendo la legge di **Newton**.



Con l'aumento della velocità l'accelerazione **a** diventa **sempre più piccola**.

Si osserva che quando la **velocità** tende a **c** la massa aumenta in modo che l'accelerazione tende a **0**.

**La velocità della luce è irraggiungibile !!!!.... con  $m > 0$**

# ENERGIA RELATIVISTICA

Secondo **Newton**, l'energia cinetica  $E_k$  si calcola con la relazione:

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

Non è idonea per calcolo del moto ad alta velocità, con  $E_k$  tendente a  $\infty$ ,  $V$  tende a  $\infty$  !!!! **Assurdo**.

Secondo **Einstein**, l'energia cinetica relativistica si calcola con la relazione:

The diagram shows the equation  $E_k = \frac{m'c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m'c^2$ . The term  $E_k$  is circled and labeled "Energia cinetica relativistica". The fraction  $\frac{m'c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  is circled and labeled "Energia totale relativistica". The term  $m'c^2$  is circled and labeled "Energia a riposo".

È idonea per il moto delle particelle ad alta velocità. Infatti, con  $E_k$  tendente a  $\infty$ ,  $V$  tende a  $c$ , come nella realtà.



# I LIMITI DELLA FISICA CLASSICA

...moto alle alte velocità.

## MECCANICA



Newton 1686

$$F = m a$$

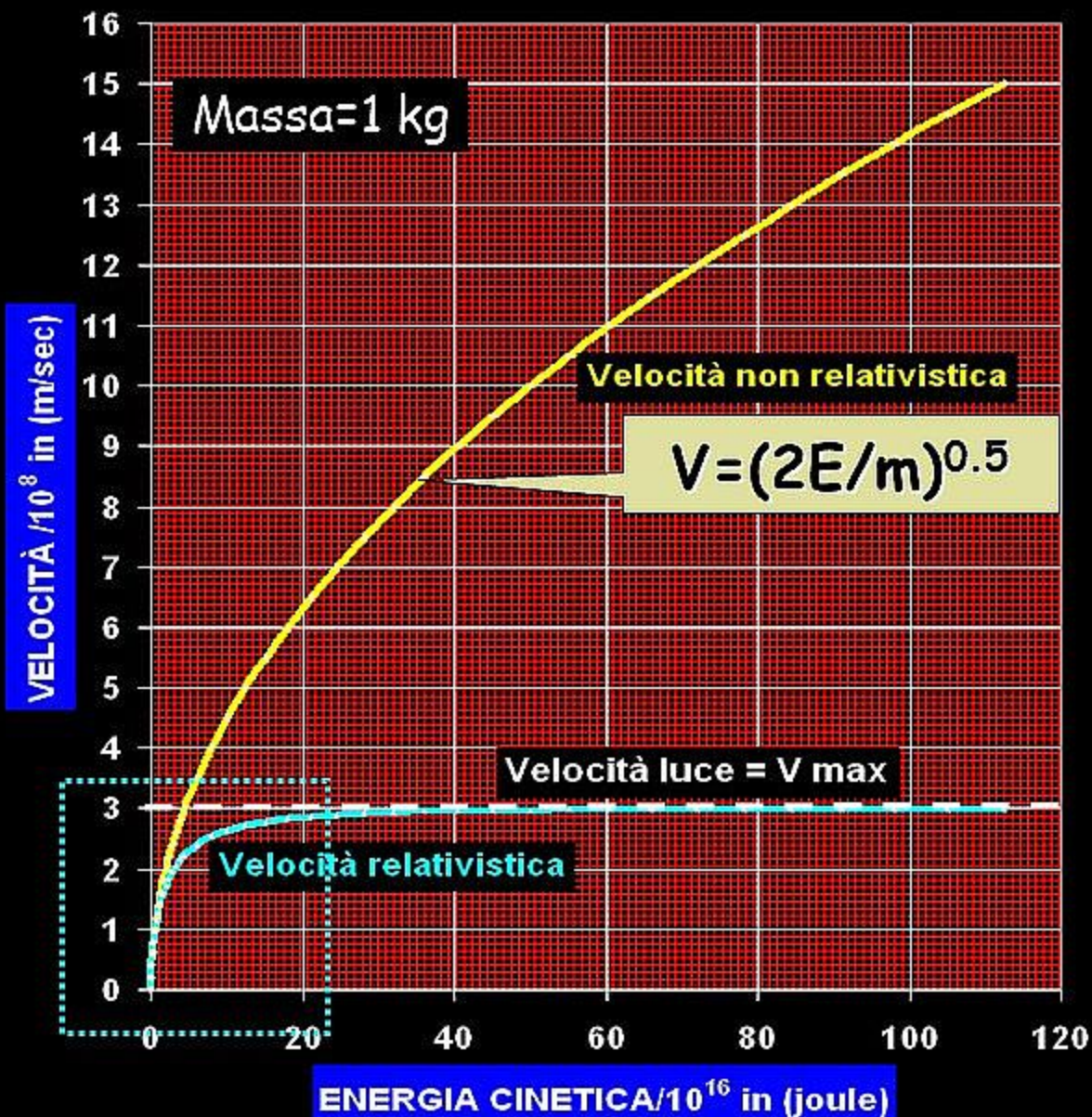
Equazione  
del moto

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2$$

ovvero

$$v = (2E/m)^{0.5}$$

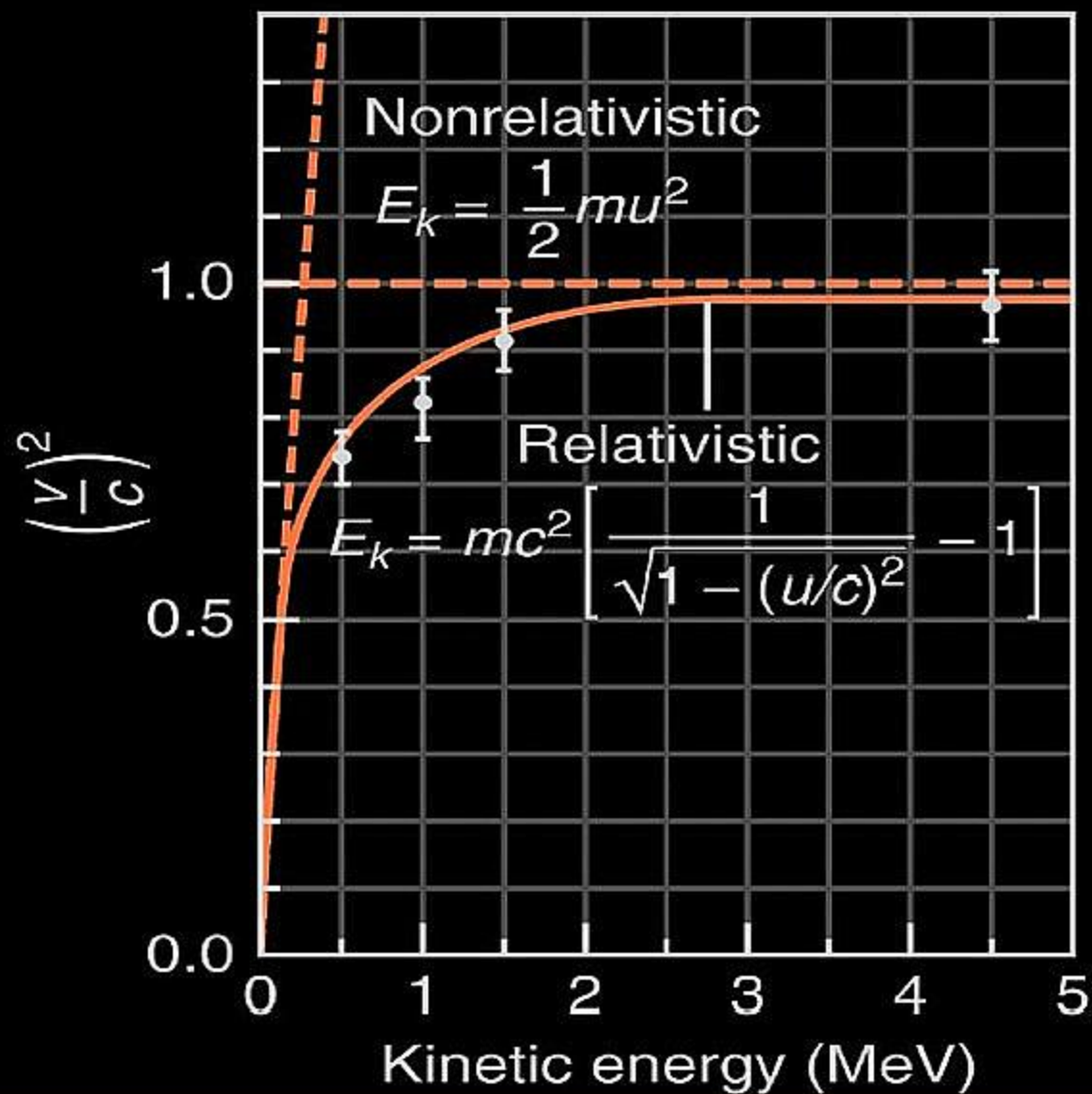
## ANDAMENTO DELLA VELOCITÀ RELATIVISTICA IN FUNZIONE DELL'ENERGIA CINETICA





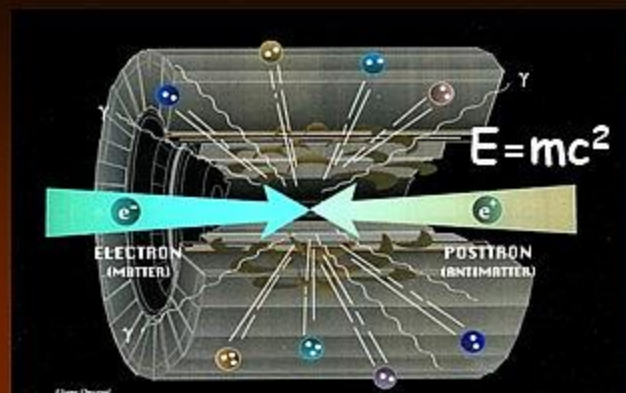
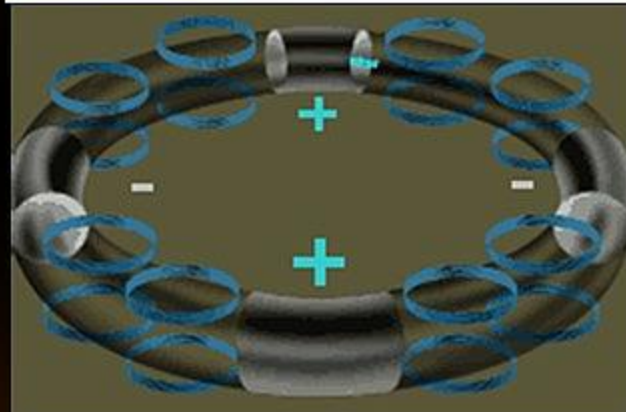
# I LIMITI DELLA FISICA CLASSICA

Il problema del moto alle alte velocità ....

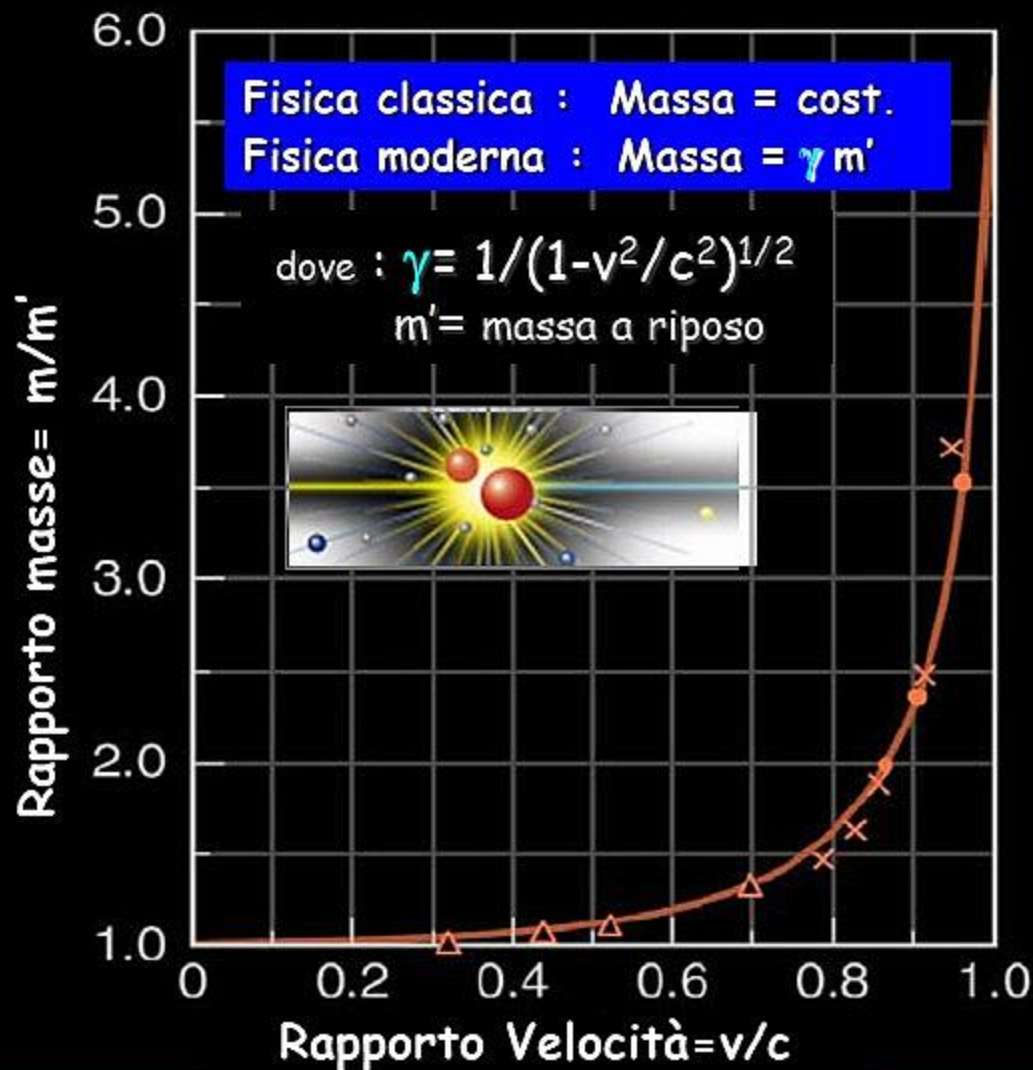


# I LIMITI DELLA FISICA CLASSICA

Il problema del moto alle alte velocità ....



## La massa varia con la velocità

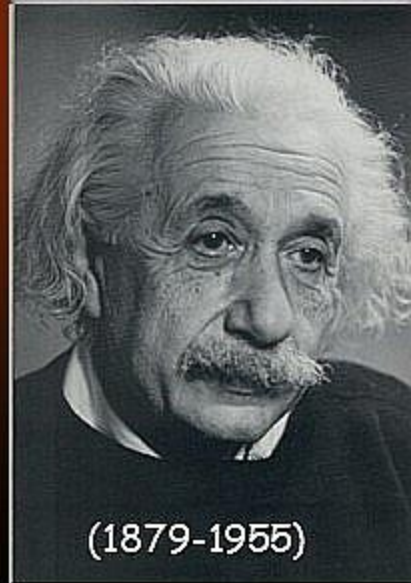




# EQUIVALENZA TRA MASSA ED ENERGIA

.....La materia è una forma dell'energia.

Sapendo che,  $E_k = E_T - mc^2$  con velocità = 0 ed  $E_k = 0$   
si ottiene:  $E_T = mc^2$ , l'energia totale relativistica.  
... la più famosa formula della Fisica moderna!!!



$$E = m \times c^2$$

dove :

**E**, è l'energia prodotta (joule)

**m**, la massa trasformata in energia (kg)

**C**, e' la velocità della luce (m/sec)

(**C** = 300.000.000 m/sec)

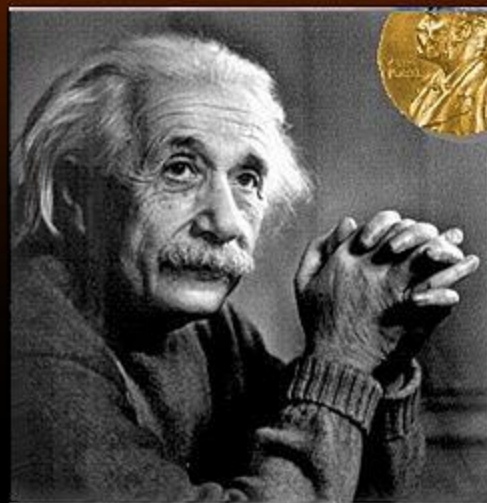
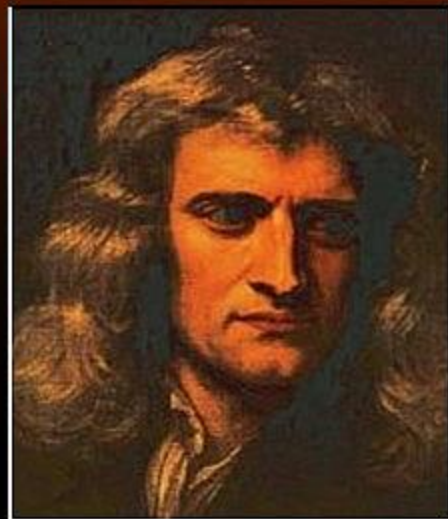
$E(1\text{kg}) = 90.000.000.000.000.000$  jaule = **216.000.000 TEP**



# FISICA CLASSICA

# FISICA MODERNA

... cos'è in conflitto e che cosa cambia?



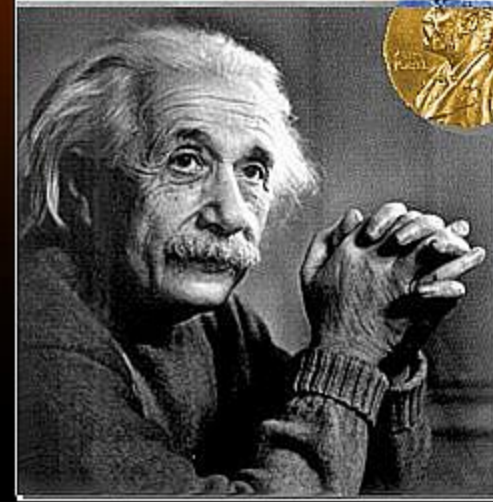
**Newton** dice:

**Gli intervalli di tempo e dello spazio sono assoluti ed indipendenti dal movimento dell'osservatore ....  
La velocità della luce è relativa.**

**Einstein** dice:

**La velocità della luce è assoluta ed indipendente dal movimento dell'osservatore ....  
Gli intervalli di tempo e dello spazio sono relativi.**

# Questa è la Teoria della relatività!



**Newton** dice: (1°teoria)

Gli intervalli di tempo e dello spazio sono assoluti ed indipendenti dal movimento dell'osservatore ....

La velocità della luce è relativa.

**Einstein** dice: (2°Teoria)

La velocità della luce è assoluta ed indipendente dal movimento dell'osservatore ....

Gli intervalli di tempo e dello spazio sono relativi.



# ESEMPIO

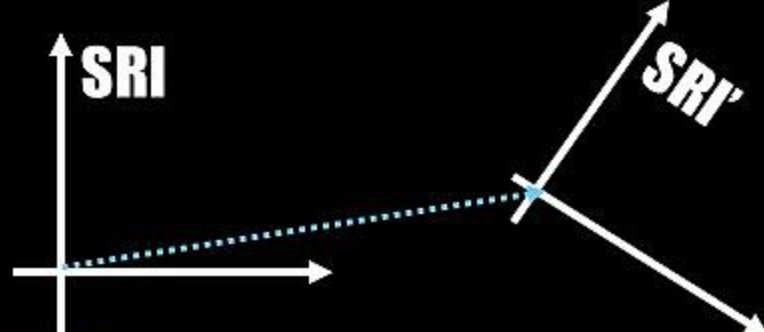
Si parte per un pianeta che dista **8 anni luce** dalla terra.  
La velocità dell'astronave è di **0,8c**, calcolare : t, t', L'.



$L_0 = 8 \text{ a.l}$ $v = 0,8c$	A terra	Nell'astronave
<b>Durata viaggio (A+B)</b> tempo misurato:	$t = (8+8)/0,8c = 20\text{a}$ dall'osservatore a terra	$t' = t \sqrt{1 - (v/c)^2} = 20 \text{ a} \cdot 0,6 = 12 \text{ a}$ dall'osservatore nell'astronave
<b>Velocità</b>	$V = 0,8c$	$V' = 0,8c$
<b>Spazio percorso</b> nel proprio sist. di riferimento	$L_0 = (8+8) \text{ a.l}$ Spazio reale (Andata+Ritorno)	$L' = v' \cdot t' = 0,8c \cdot (6+6)\text{a} = (4,8+4,8)\text{a.l}$ spazio misurato dall'osservatore nell'astronave
<b>Contraazione delle lunghezze</b>	NB: Con $V > 0$ , abbiamo $L' < L_0$	$L'/L_0 = 4,8/8 = 0,6 = \sqrt{1 - (v/c)^2}$
<b>Dilatazione del tempo</b>	$t/t' = 20/12 = 1,66 = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = 1/0,6$	$\sqrt{1 - (v/c)^2}$ = Coeff. di Lorentz a.l = anni luce c = velocità della luce (A+B) = Andata + ritorno



# CONCLUSIONE



**Galileo - Newton :**  
Stesse leggi della MECCANICA  
in ogni SRI (Sistema Riferimento Inerziale)

**Relatività di Einstein (1905):**  
Stesse leggi della FISICA  
in ogni SRI

**Trasformazioni di Galileo:**

- Tempo assoluto
- Composizione lineare delle velocità

**Trasformazioni di Lorentz:**

- Tempo relativo

(Entra in gioco il Tempo)

- $c =$  Velocità ass.  $\sim 300.000$  km/s

**PROBLEMI:**

- Sperimentalmente " $c = \text{cost}$ "
- Massa = cost
- $V^2 = 2E/m$ ,  $V =$  tutti i valori !!!
- Moto alle alte velocità.

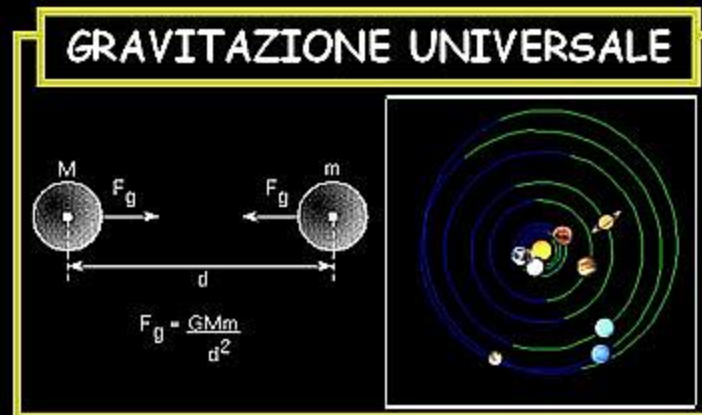
**CONSEGUENZE:**

- Non-conservazione della massa
- Dilatazione dei tempi
- Contrazione delle lunghezze
- .....

# Newton e Einstein

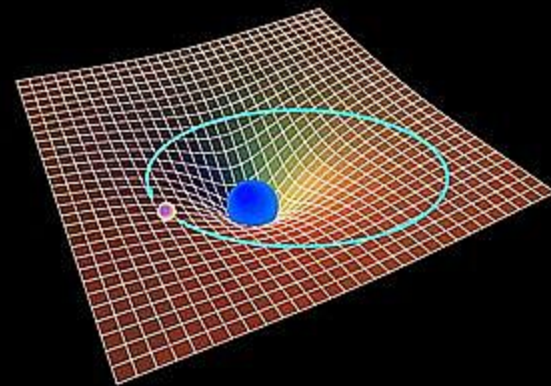
**Newton: gravità è una forza**

La Terra si muove su orbita curva intorno al Sole perché la gravità solare la costringe ad allontanarsi dal suo cammino rettilineo naturale



**Einstein: gravità è curvatura**

La massa del Sole distorce la geometria dello spazio vicino alla Terra e questa si muove liberamente lungo un cammino il più possibile rettilineo ( $\approx$  ellisse ) in questo ambiente deformato.





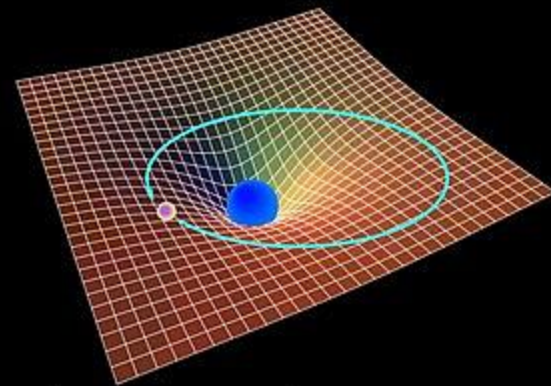
# Newton e Einstein

**Newton: gravità è una forza**

La Terra si muove su orbita curva intorno al Sole perché la gravità solare la costringe ad allontanarsi dal suo cammino rettilineo naturale



**Einstein: gravità è curvatura**



**CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE  
+  
DILATAZIONE DEI TEMPI**

=

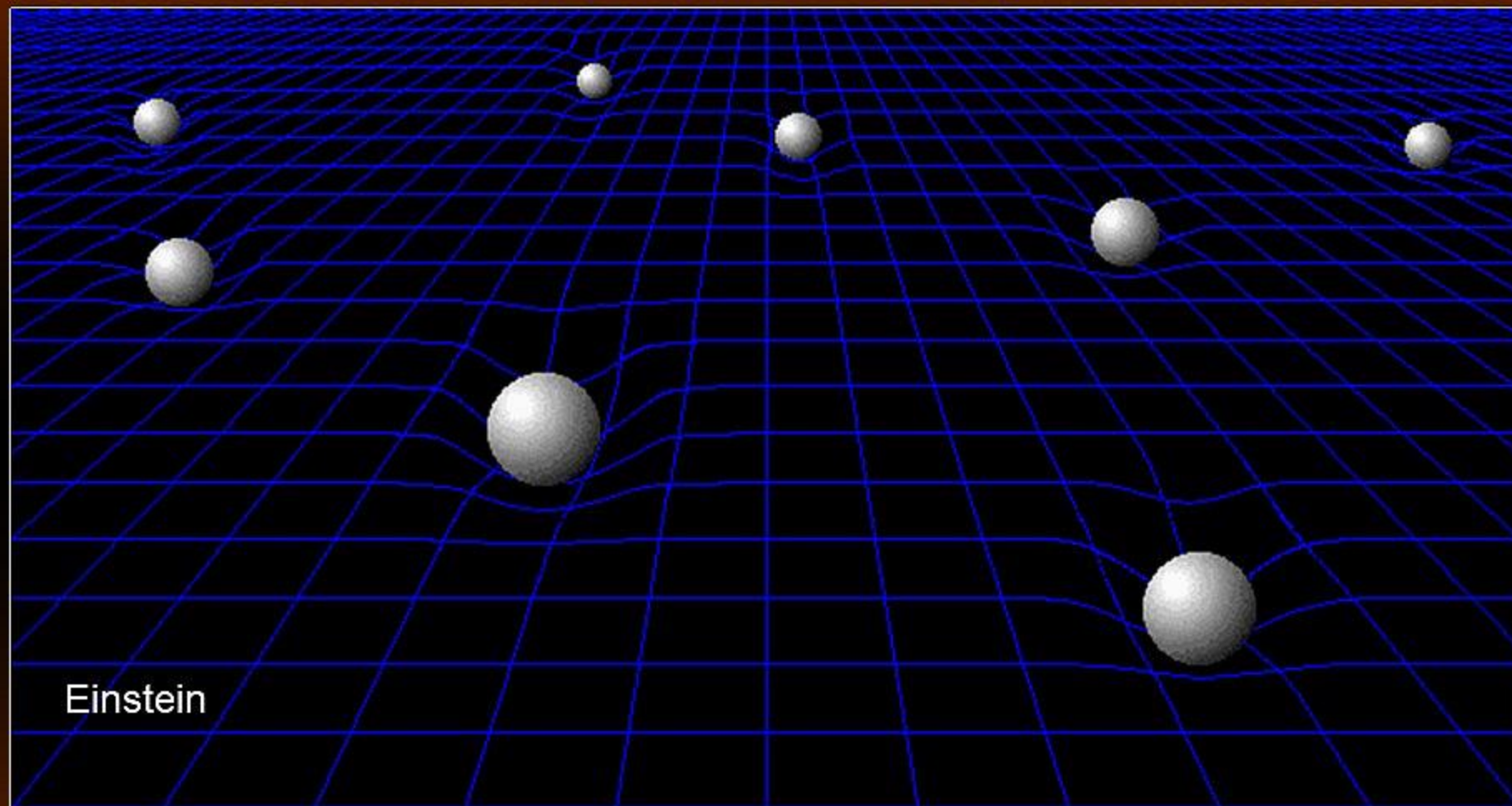
**SPAZIO-TEMPO  
SONO  
ELASTICI**

=

**TESSUTO  
IN  
GOMMA**



# CAMPI GRAVITAZIONALI



**CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE  
+  
DILATAZIONE DEI TEMPI**

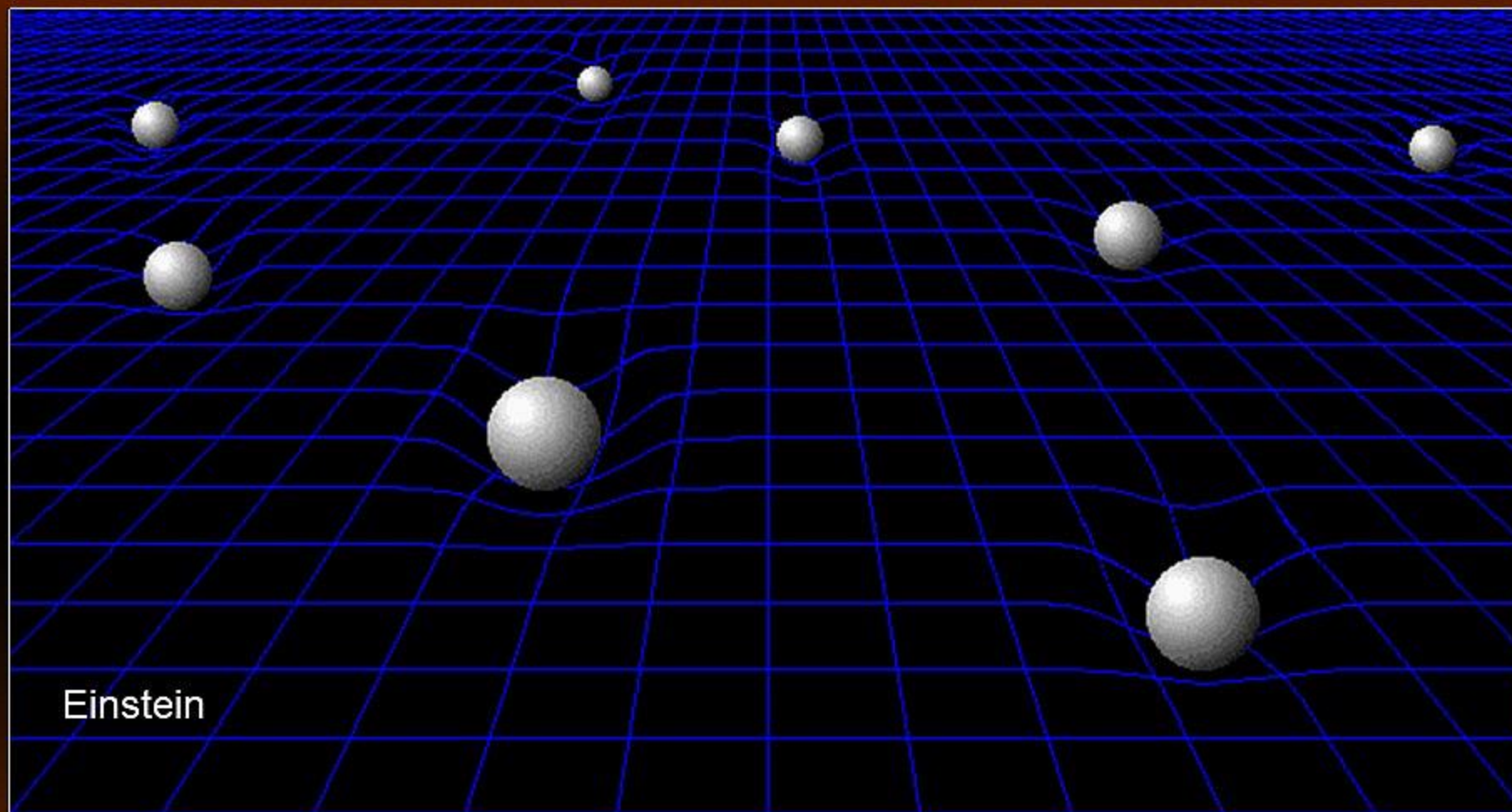
=

**SPAZIO-TEMPO  
SONO  
ELASTICI**

=

**TESSUTO  
IN  
GOMMA**

# CAMPI GRAVITAZIONALI



**Lo spazio dice alla materia come muoversi ....  
..... la materia dice allo spazio come piegarsi.**



A black and white photograph of Albert Einstein, looking towards the camera with a questioning expression. He is pointing his right hand towards a chalkboard. A blue speech bubble is superimposed over the image, containing the Italian text "Tutto chiaro fin qui?".

Tutto chiaro  
fin qui?

Caption  
City