

# Il “samba” del tempo relativo

Albert Einstein e l’orologio  
“impazzito”

# Il tempo nella Fisica classica

Per Aristotele il tempo era “cambiamento”

Le “qualità primarie” di Galileo Galilei: il tempo diventa una “grandezza fisica”

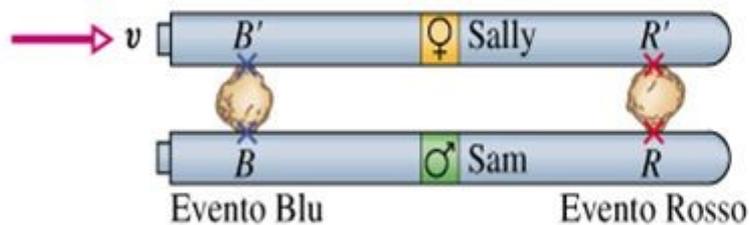
Tempus est Absolutum: invarianza per tutti i sistemi di riferimento di tempo e lunghezza

# IL SECONDO PRINCIPIO DI RELATIVITÀ E LE SUE CONSEGUENZE

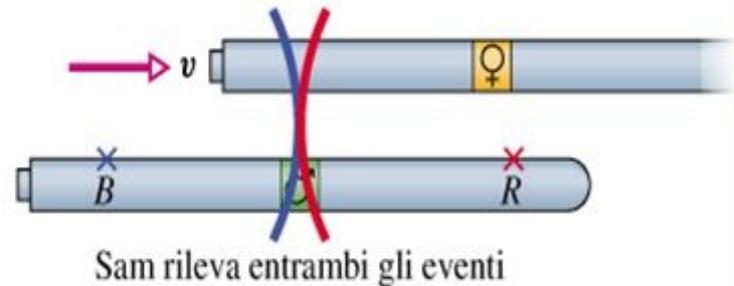
- LA VELOCITÀ DELLA LUCE È LA STESSA PER TUTTI I SISTEMI DI RIFERIMENTO
- Dal secondo principio di relatività alla relatività della simultaneità

# LA "RIVOLUZIONE" DI EINSTEIN

## La simultaneità è relativa!

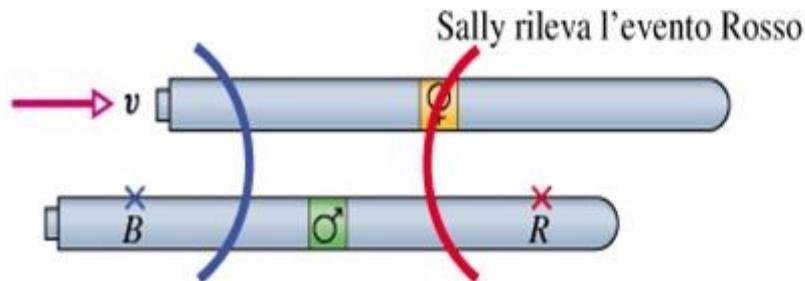


(a)



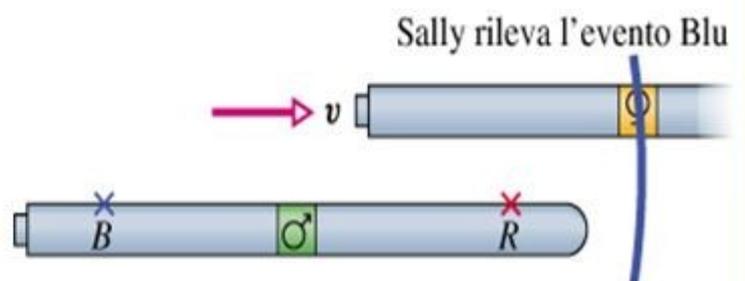
Sam rileva entrambi gli eventi

(c)



Sally rileva l'evento Rosso

(b)



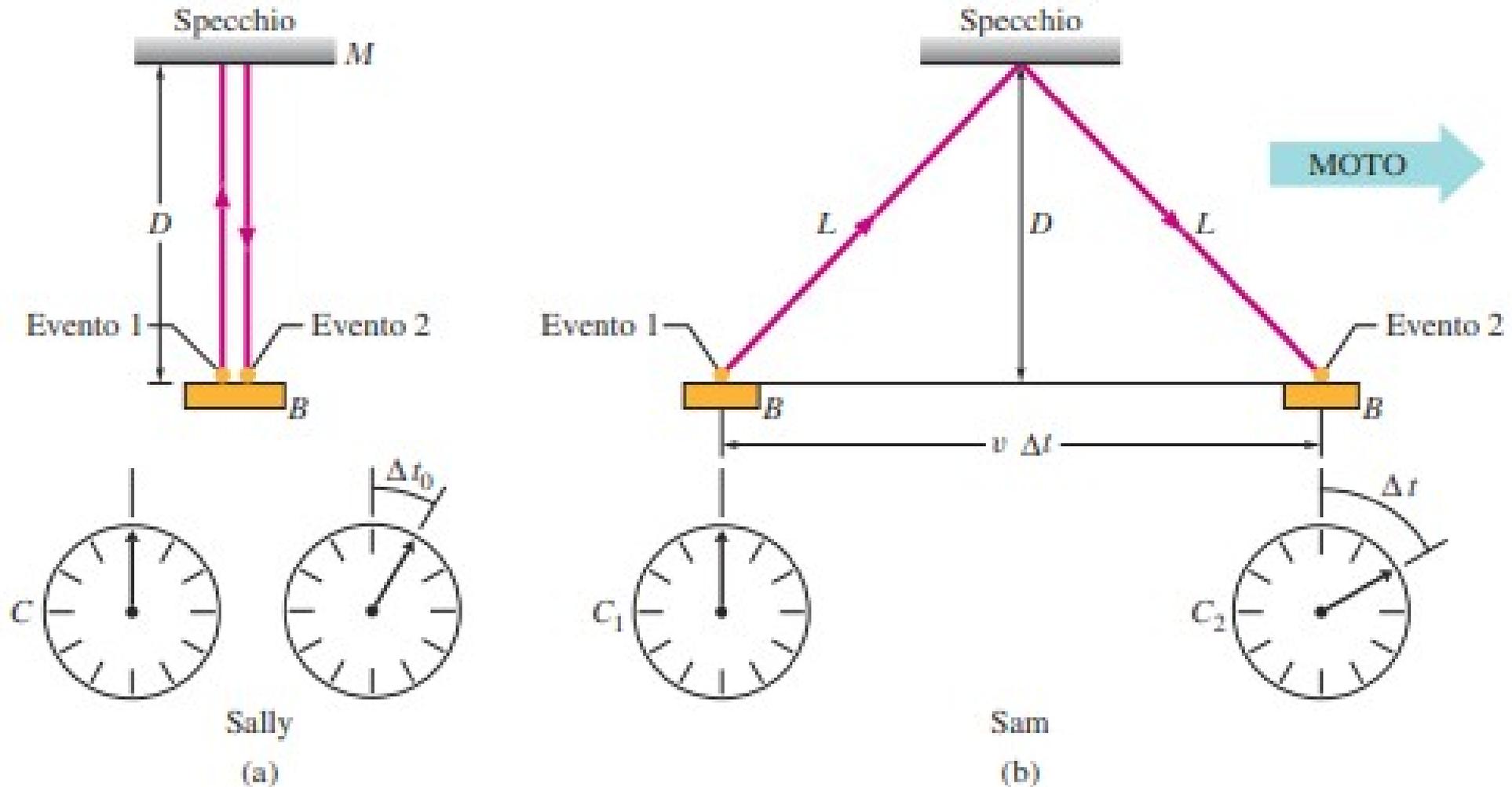
Sally rileva l'evento Blu

(d)

I due segnali inviati dal centro agli estremi A e B vengono ricevuti contemporaneamente per l'osservatore che si muove solidale con esso

Per l'osservatore che vede il razzo muoversi con velocità  $V$ , viene ricevuto prima il segnale inviato verso la coda del razzo

# Dilatazione del tempo



L'osservatore solidale col razzo vede il raggio luminoso percorrere una distanza  $2L$  nel tempo alla velocità  $c$  nel tempo

$$\Delta t_0 = \frac{2L}{c}$$

L'osservatore  $O$  fermo, che vede il razzo viaggiare a velocità  $V$ , vedrà il raggio luminoso percorrere uno spazio più lungo alla stessa velocità  $c$ .

Per lui lo stesso fenomeno sarà avvenuto in un tempo più lungo!!!

## Calcoli

$$\left(\frac{c \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \Delta t}{2}\right)^2 + L^2$$

$$(c^2 - v^2) \cdot \Delta t^2 = c^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot \Delta t^2 = 4L^2$$

$$\Delta t = \frac{\frac{2L}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Fattore di Lorentz

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

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \Delta t_0 \cdot \gamma$$

Quindi per chi viaggia il tempo trascorso per lo stesso fenomeno è minore: quindi possiamo dire che chi viaggia invecchia più lentamente ...

Sorgono però due problemi:

1. Se la velocità del viaggio è costante come fanno i due osservatori a confrontare tra di loro i tempi trascorsi (se hanno velocità diverse si allontaneranno per sempre ...)
2. Il problema dei sistemi inerziali ...

# Sistemi di riferimento inerziali

Sono sistemi di riferimento che rispettano il principio di inerzia, cioè che non essendo soggetti a forze si muovono di moto rettilineo uniforme.

I° principio di Relatività: tutte le leggi della Fisica sono invarianti per sistemi di riferimento inerziali.

# Principi della dinamica

- I. Un corpo non soggetto a forze mantiene costante la sua velocità (principio di inerzia)
2. Un corpo soggetto a una forza  $\mathbf{F}$  subisce un'accelerazione  $\mathbf{a}$  legata alla forza dalla relazione  $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ , dove  $m$  è la massa inerziale o inerzia.

3. Se un corpo A esercita una forza  $F$  su un corpo B, allora B reagisce su A con una forza eguale e contraria (principio di reazione)

Queste sono le leggi che regolano il comportamento di tutti i corpi materiali: esse dunque mantengono la stessa forma per tutti i sistemi inerziali ...

II<sup>d</sup> Law of dynamics

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

m = MASSA  
INERZIALE

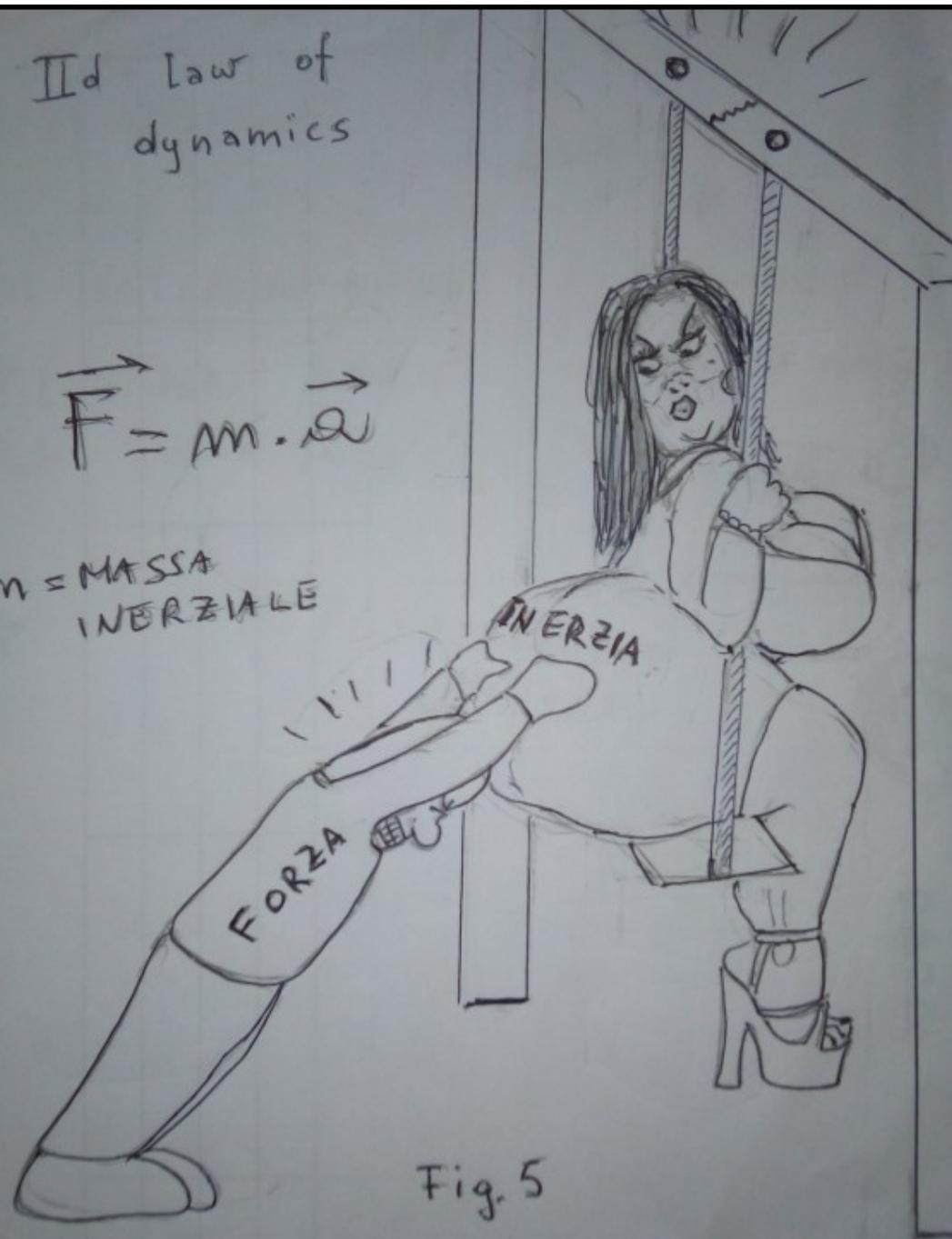


Fig. 5

Ce ne accorgiamo se lanciamo in aria una moneta in verticale quando la macchina è ferma, e quando si muove con velocità costante ...

La moneta ci torna in mano.

Il fenomeno avviene allo stesso modo in tutti i sistemi inerziali ...

... ma se acceleriamo cosa succede?

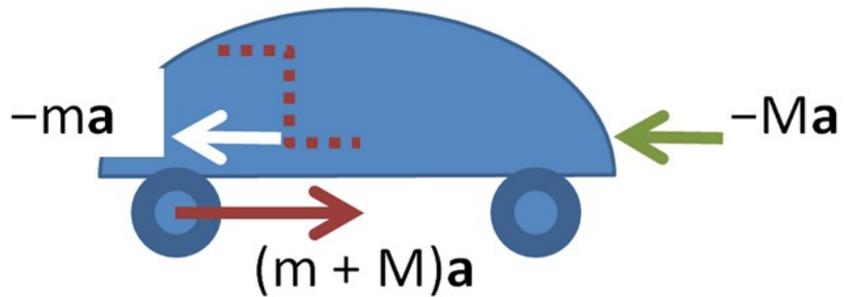
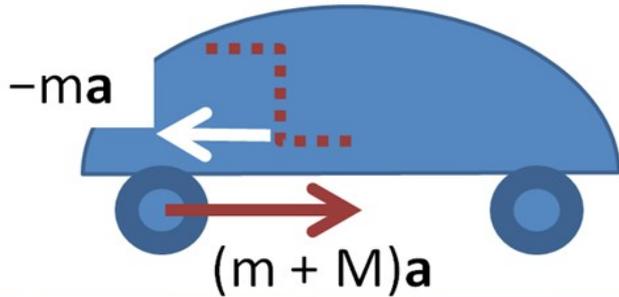
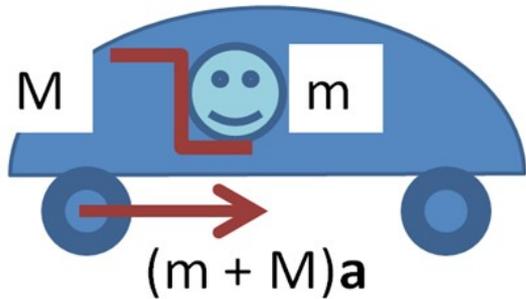
# Forze di inerzia (forze “fittizie”)

Sono forze prodotte dall'accelerazione del sistema di riferimento.

Se l'auto accelera, noi che per il principio di inerzia manteniamo costante la nostra velocità ci sentiamo spinti indietro verso il sedile, perché è lui che ci sta spingendo in avanti ...

Se frena noi per il principio di inerzia rispetto all'abitacolo ci sentiamo spinti in avanti

Se l'auto svolta a destra, noi tendendo a mantenere il nostro moto siamo spinti verso sinistra, cioè verso l'esterno della curva (forza centrifuga).



Quindi da quello che succede dentro l'abitacolo mi rendo conto se mi sto muovendo o no, ma solo in un sistema di riferimento accelerato (“non inerziale”), perché in esso sono presenti le forze di inerzia.

Si dà il caso che dei due gemelli, l'astronauta per allontanarsi dalla Terra dovrà accelerare con il suo razzo e per tornare dovrà decelerare,

Pertanto ...

... a quel punto la capsula spaziale sarà un sistema non inerziale e quindi chi è dentro sperimentando su di sé e su ciò che ha intorno le forze di inerzia, saprà che si sta muovendo, al contrario del gemello rimasto a Terra (sistema inerziale o quasi).

# Paradosso dei gemelli

In sostanza se di due gemelli uno viaggia nello spazio con velocità  $v$  e l'altro sta fermo a Terra, se i due sistemi dei due gemelli sono inerziali, non si può dire chi viaggia e chi no, e quindi non si potrebbe dire chi invecchia più lentamente e chi più velocemente, perché in tutti i sistemi inerziali succedono esattamente le stesse cose (invarianza per sistemi inerziali)

# Risoluzione del paradosso

Il confronto tra i tempi di uno stesso fenomeno non è più tra chi si muove e chi sta fermo, ma tra chi è in un sistema non inerziale e chi è in un sistema inerziale. Dato che solo il primo osservatore è sicuramente in movimento (e se ne accorge!), il tempo per lui trascorrerà più lentamente.

**ECCO PERCHÉ IL GEMELLO  
ASTRONAUTA È PIÙ GIOVANE.**

Adesso però il problema diventa un altro:

Ma la Terra è davvero un sistema inerziale? E, più in generale, i sistemi di riferimento “inerziali” esistono veramente? E rispetto a cosa posso dire in assoluto che un sistema è inerziale o no?

# Mach critica Newton

Per il principio di inerzia un sistema inerziale dovrebbe essere nel vuoto!

Ma

1. il vuoto non è un riferimento materiale
2. Si dà il caso che l'Universo non sia vuoto, ma dentro ci sia un sacco di massa, e la massa provoca la gravità ...

# Legge della gravitazione universale

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Così Newton si inventa il sistema di riferimento delle stelle fisse come “assolutamente inerziale”, e dice: “l’acqua nel secchio che gira incurva la superficie perché ruota rispetto alle stelle fisse che sono un sistema inerziale assoluto, e quindi il secchio è un sistema non inerziale perché l’acqua che ruota con lui sente la forza centrifuga, una forza di inerzia!”

Problema risolto? Macché ...

Per Ernst Mach (1838 – 1916) dichiarare che le stelle fisse sono un sistema assolutamente inerziale è impossibile: bisognerebbe prendere un altro riferimento assolutamente inerziale che non c'è!

**I SISTEMI INERZIALI NON ESISTONO!!!**

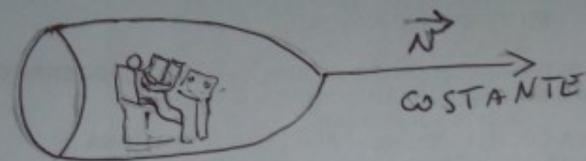
Per Mach invece gli effetti di inerzia ci sono perché il secchio ruota rispetto alle stelle fisse ma non perché siano un sistema inerziale, bensì perché essi rappresentano la massa dell'Universo!

In altre parole:

BISOGNA RIFORMULARE LE LEGGI  
DELLA FISICA SENZA CHIAMARE IN  
CAUSA I SISTEMI INERZIALI, MA  
PRENDENDO COME RIFERIMENTO LA  
DISTRIBUZIONE DI MASSA  
NELL'UNIVERSO ...



Fig. 7



SISTEMA DI RIFERIMENTO INERZIALE



Fig. 9

# La risposta di Albert Einstein

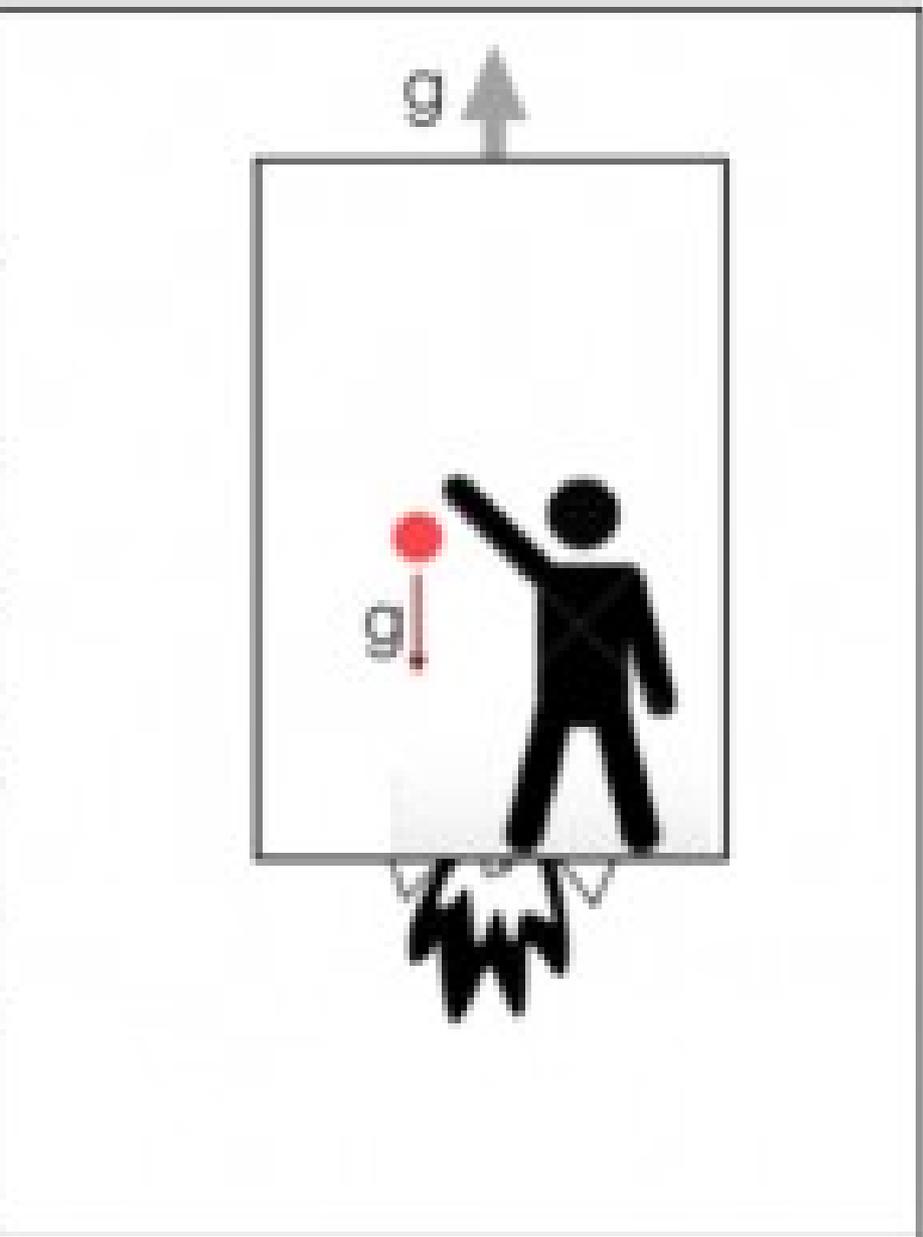
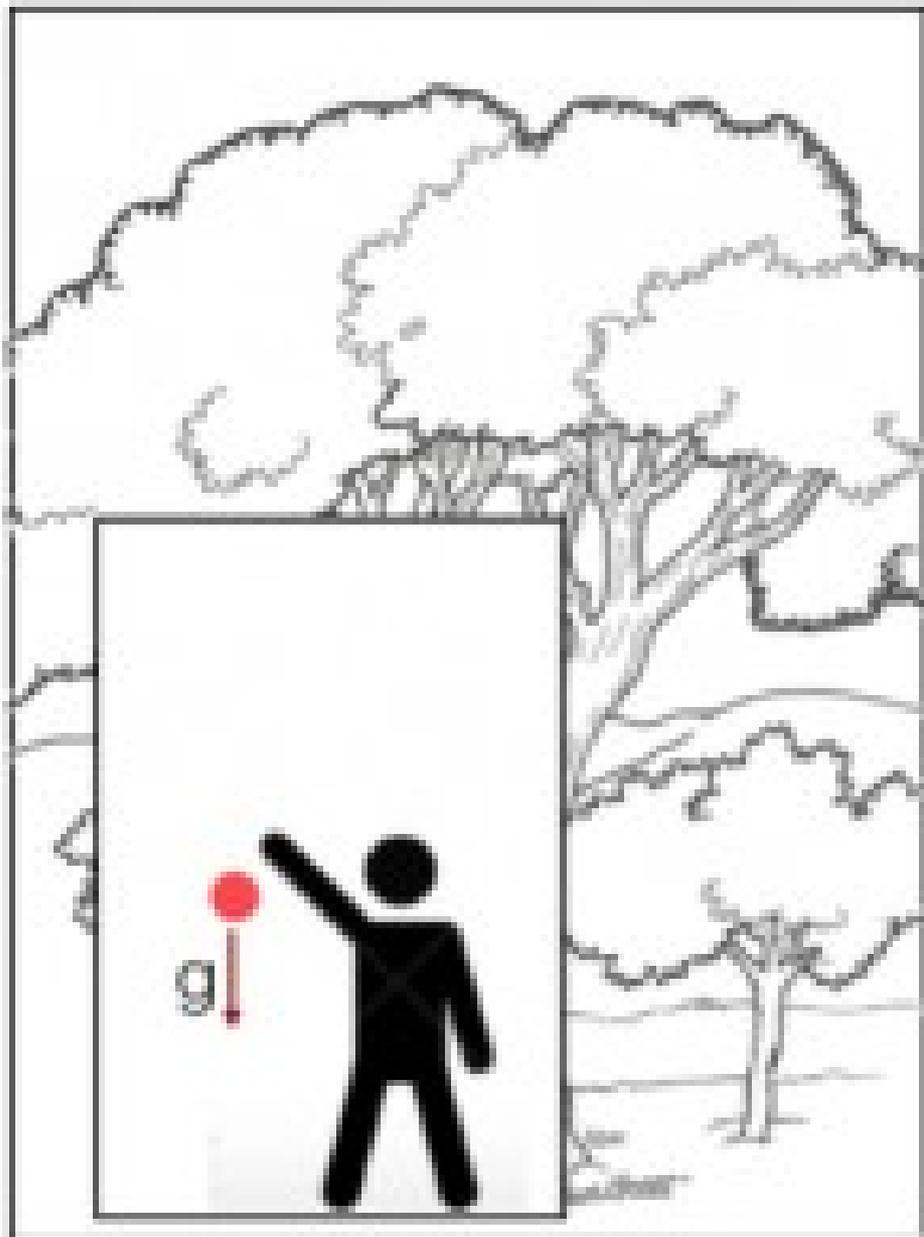
Principio di equivalenza: la massa inerziale è equivalente alla massa gravitazionale, il che significa che la massa risponde allo stesso modo alle forze di inerzia e alla gravità.

In pratica le forze di inerzia agiscono come un peso ...

... pertanto si può simulare il peso accelerando una capsula spaziale nel vuoto.

Pertanto un osservatore che senta la gravità per il principio di equivalenza è equiparato ad uno che si trovi in un sistema non inerziale

...



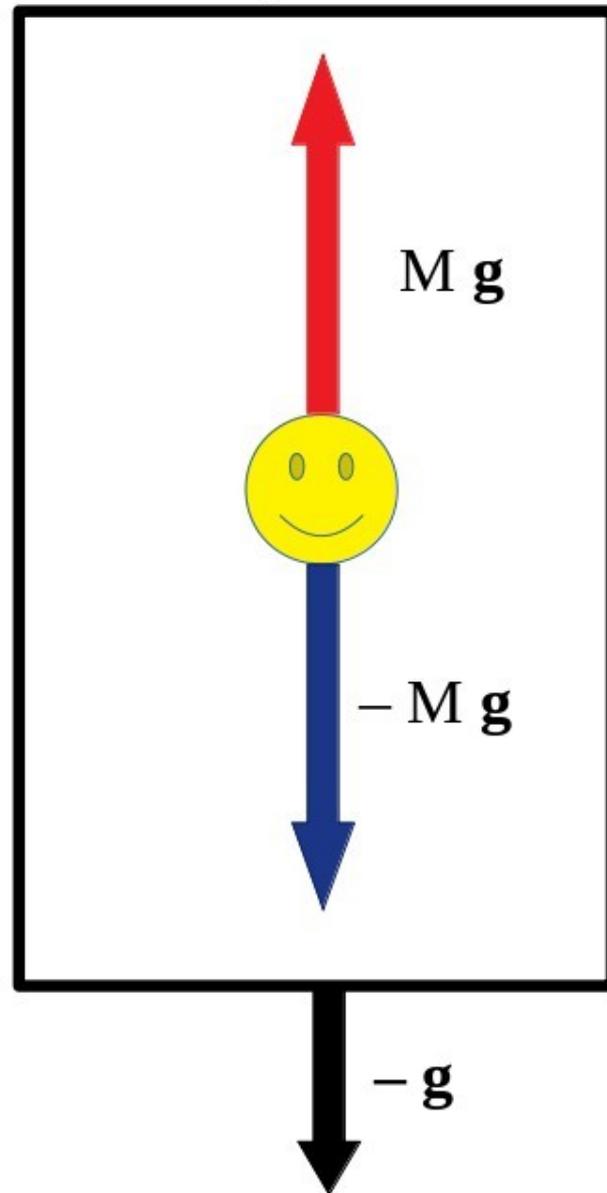
Allo stesso modo le forze di inerzia si possono sommare vettorialmente alla forza gravità e in opportune condizioni possono annullarla!

Ad esempio l'ascensore in caduta libera è un sistema di riferimento nel quale la forza di inerzia (prodotta dall'accelerazione di gravità) è opposta alla gravità stessa.

$$M \cdot (-\mathbf{a}) = M \cdot \mathbf{g}$$

Ascensore in caduta libera: la forza di inerzia annulla il peso

Condizioni di validità del principio di inerzia!



Per il principio di equivalenza ...



Assenza di peso:  
sistema inerziale

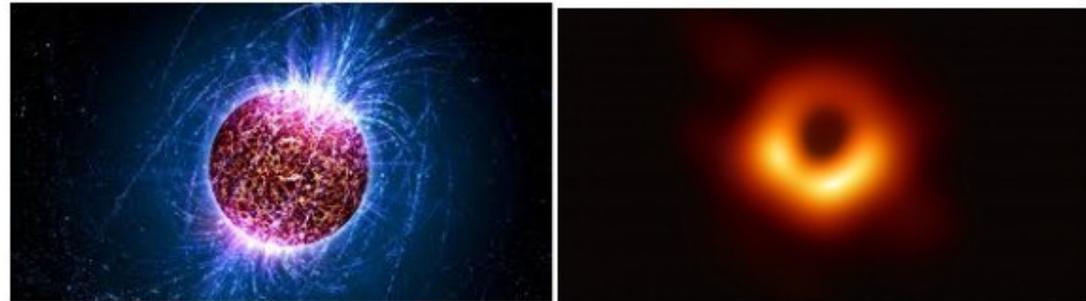


Presenza di peso:  
sistema non  
inerziale

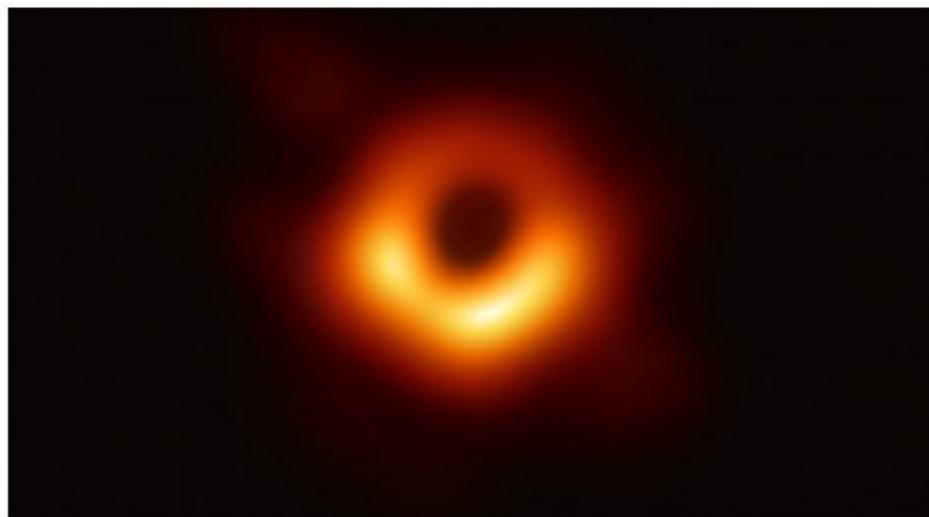
Verrebbe dunque da pensare che la sia vero il contrario: l'astronauta che viaggia nello spazio ed è senza peso è l'osservatore inerziale, mentre chi rimane a casa e sente la gravità è il sistema non inerziale. Quindi per il principio di equivalenza dovrebbe restare più giovane quest'ultimo!!

A meno ché ...

... non se lo pappi  
una stella di neutroni  
o un buco nero!!!  
Lì vicino la gravità è  
abbastanza forte  
perché l'effetto di  
rallentamento del  
tempo sia  
apprezzabile ...



Quindi per restare  
giovane  
l'astronauta  
dovrebbe  
soggiornare  
vicino ad un buco  
nero ... e questo  
lo farebbe molto  
felice ...



# Ricapitolando:

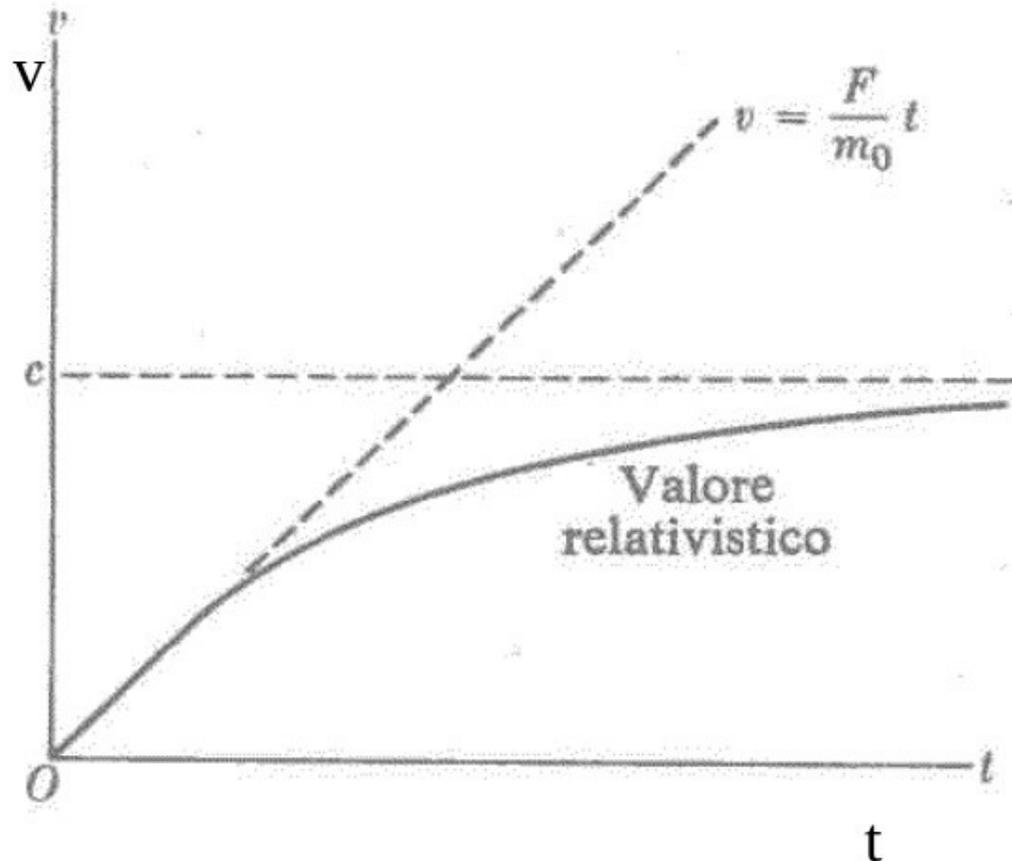
Ci sono due modi per invecchiare lentamente:

1. Partire con un'astronave accelerando fino a velocità prossima a quella della luce
2. Soggiornare in prossimità di una stella di neutroni o dell'orizzonte degli eventi di un buco nero.

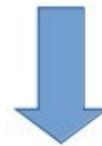
Ma è possibile?

# Viaggiare a velocità prossima a quella della luce: problemi

## 1. Il problema della massa

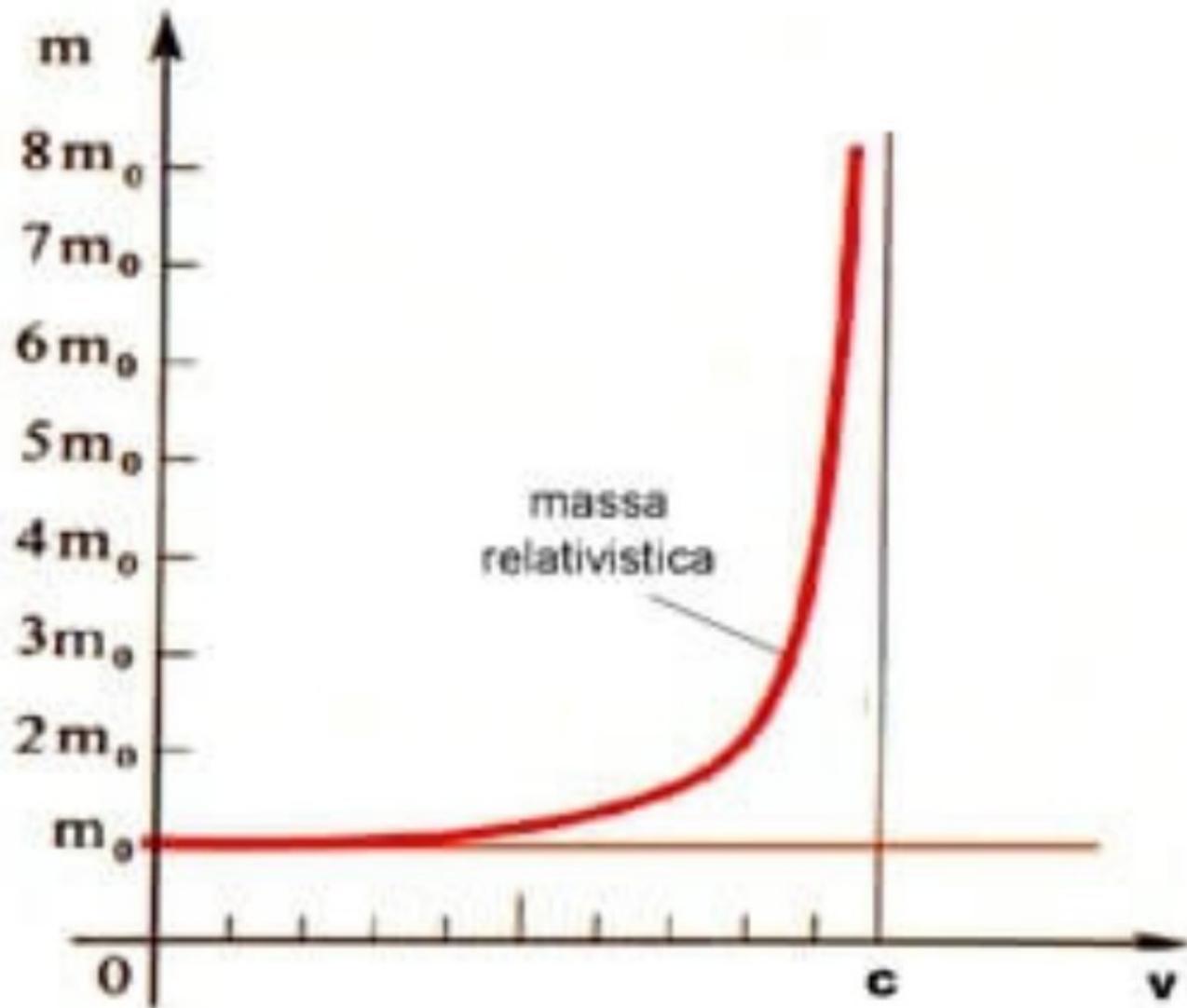


La velocità  $v$  tende a diventare costante ( $c$ ) quindi  $\mathbf{a}$  tende a 0



Per il II principio della dinamica  $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ , e se  $\mathbf{a}$  tende a 0, poiché esercitando una forza  $\mathbf{F}$  costante, la massa  $m$  tenderà all'infinito!!!

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





$N \approx C$

Fig. 35



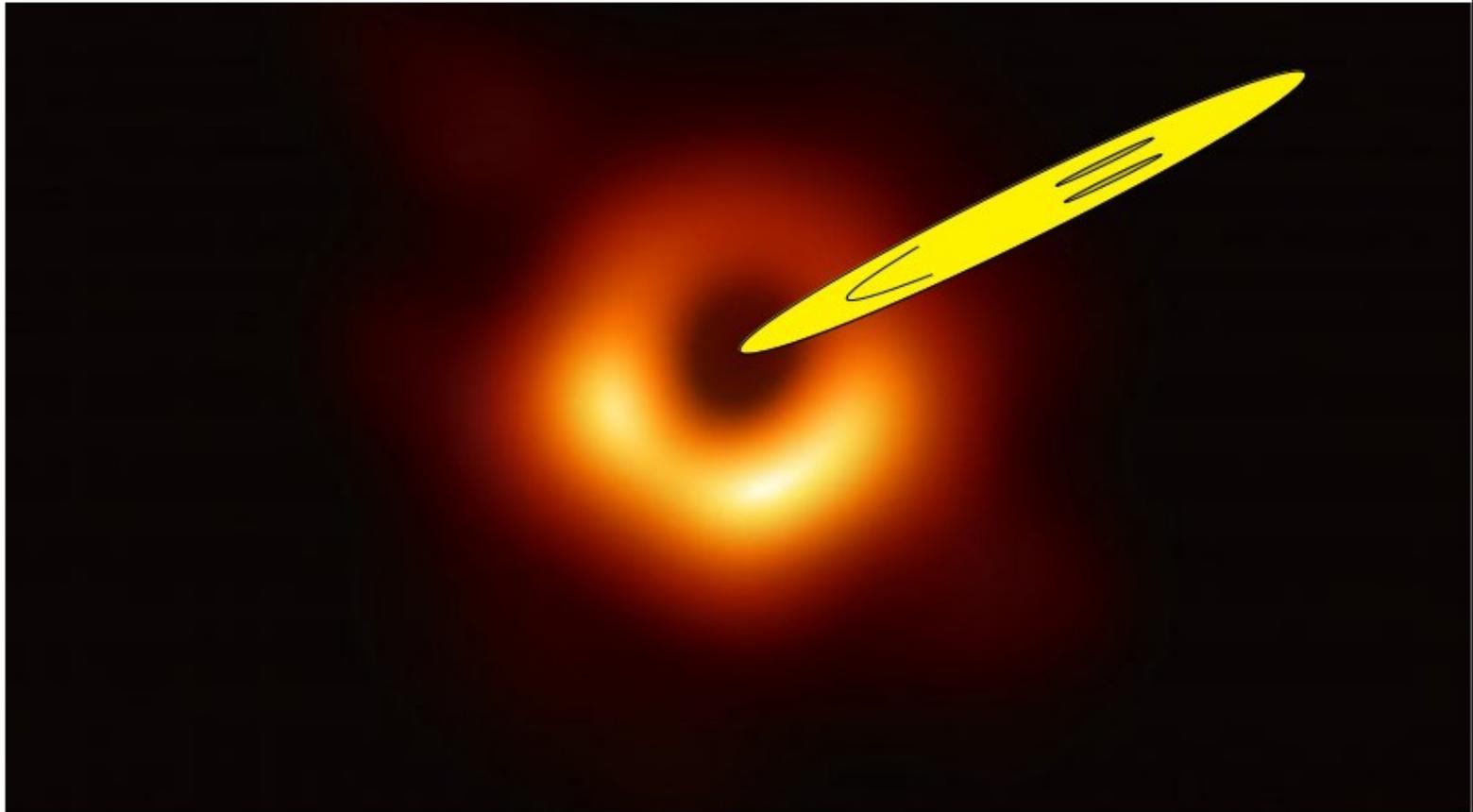
$$E = mc^2$$

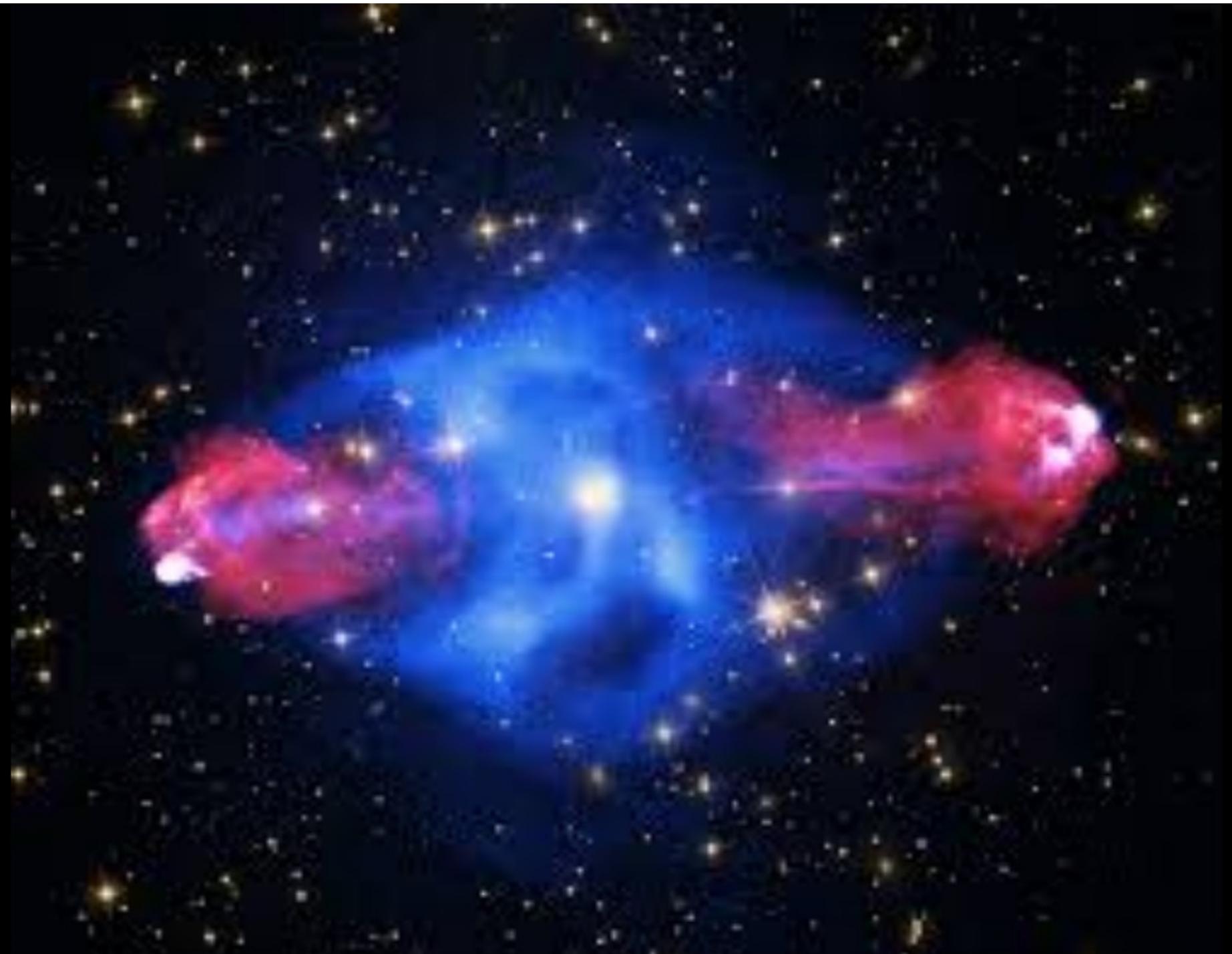
Per portare un razzo a velocità prossima a quella della luce occorre un'energia enorme!!!

$$\lim_{v \rightarrow c} E = \infty$$

# E i buchi neri?

Meglio non avvicinarsi!!!





# Conclusioni

D. Tutto questo ci servirà per andare nello spazio a cercare altri pianeti?

R. Temo di no!

D. Quindi la storia dei gemelli di cui uno più giovane è una bufala ...

... come il  
Chupacabras ...



... o l'esperimento di Philadelphia!



Ma allora a cosa ci  
serve tutto ciò?

# Almeno a due cose ...

1. A spingere la conoscenza oltre i limiti fisici dell'uomo, grazie al potere dell'immaginazione matematica

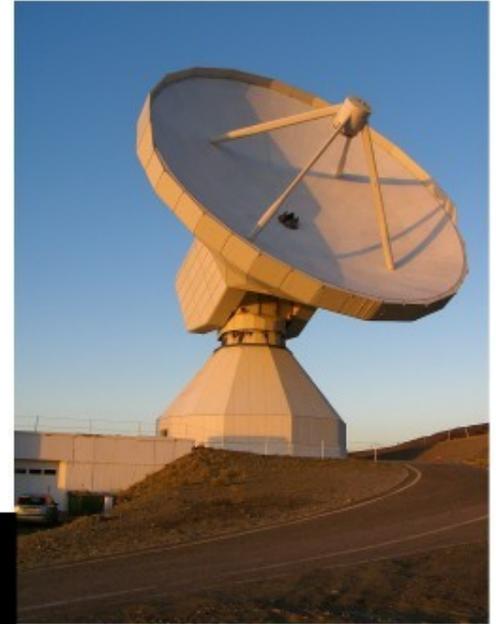
$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\psi} \not{D} \psi + hc \\ & + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + hc \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

CURVATURA DELLO SPAZIO  
TEMPO
DISTRIBUZIONE DELLA  
MATERIA

$$\begin{aligned} \hat{H}\Psi &= \left( \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \sum_i \left[ -\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + V_i(\alpha, x_i) \right] \right) \Psi = 0. \\ S_c &= \int_{t_i}^{t_f} \mathcal{L} dt = \int_{t_i}^{t_f} \left( \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right) dt \\ &= \frac{1}{2} m \omega \left( \frac{(x_i^2 + x_f^2) \cos \omega(t_f - t_i) - 2x_i x_f}{\sin \omega(t_f - t_i)} \right). \end{aligned}$$

## 2. A spingere la capacità tecnologica al massimo delle capacità umane!



Conosco due modi per portare la tecnologia umana ai massimi livelli:

Uno è la ricerca di base:  
la Fisica della materia elementare,  
l'Astronomia, l'Astrofisica e la  
Cosmologia

L'altro lo conoscete, dai ...

... è questo qui sotto ...



... così alla fine chiedo sempre  
alla gente che si lamenta:

“Voi cosa volete?”

A voi che mi avete ascoltato  
chiedo invece solo una cosa ...

Quando parlate ad altri di queste  
cose, fatelo anche voi.

Grazie