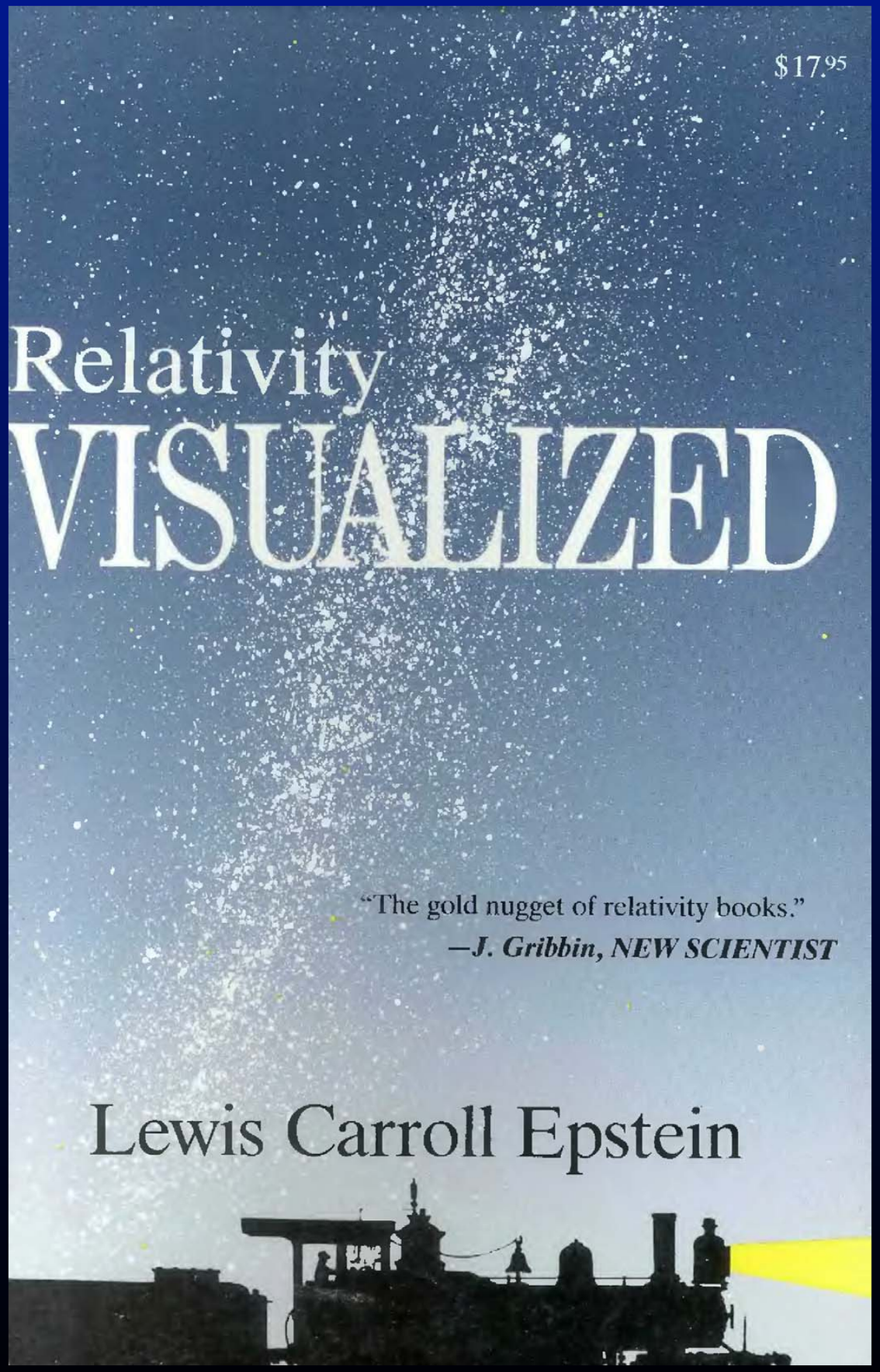
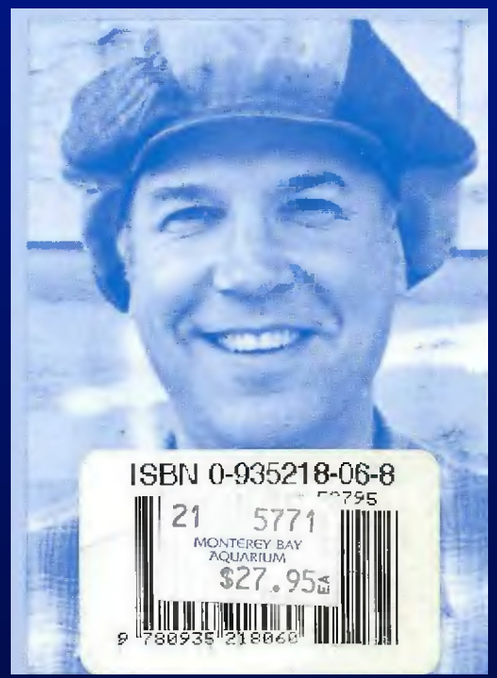
QUATTRO PASSI NELLO SPAZIOTEMPO

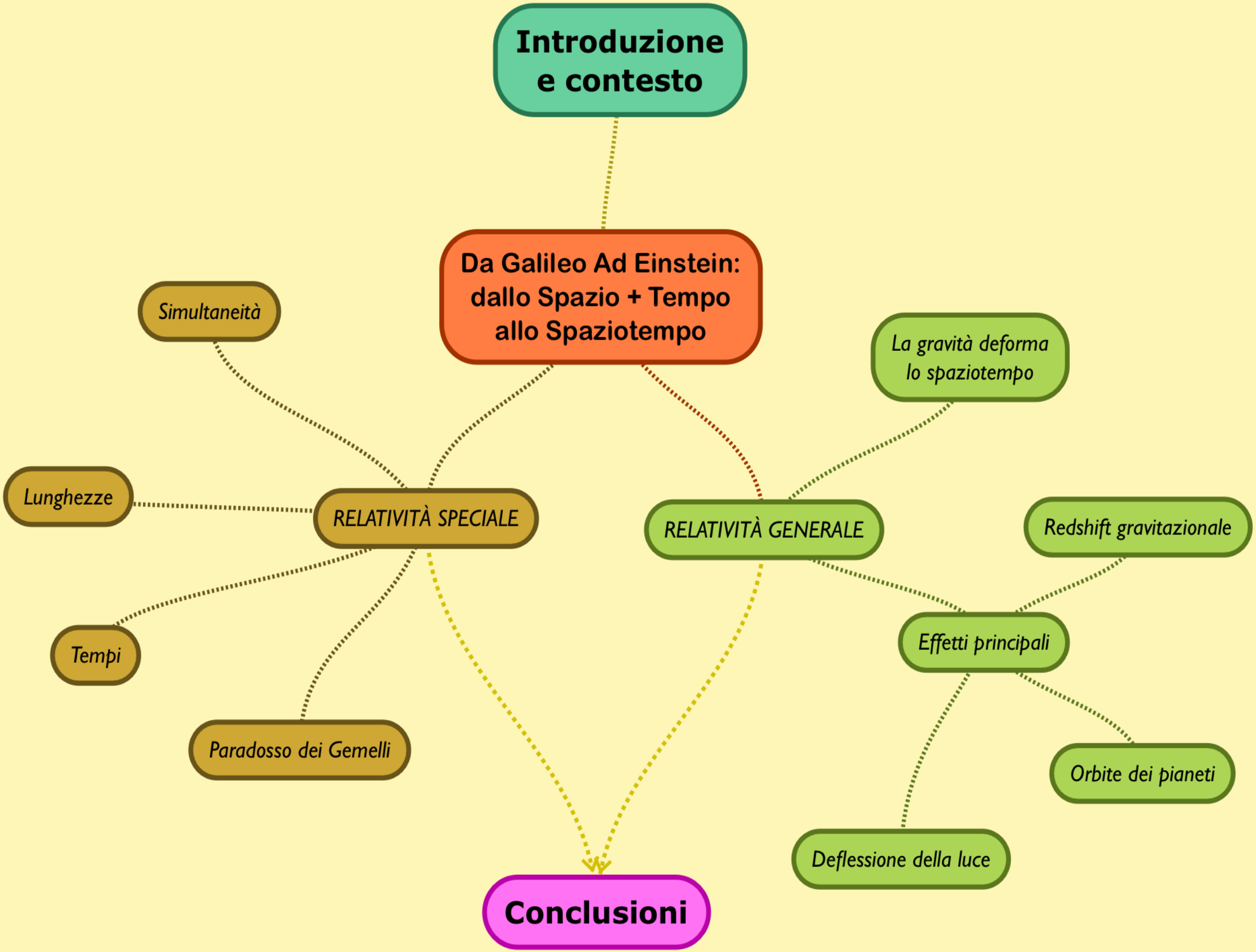
LA VISIONE DEL MONDO NELLA RELATIVITA' DI EINSTEIN

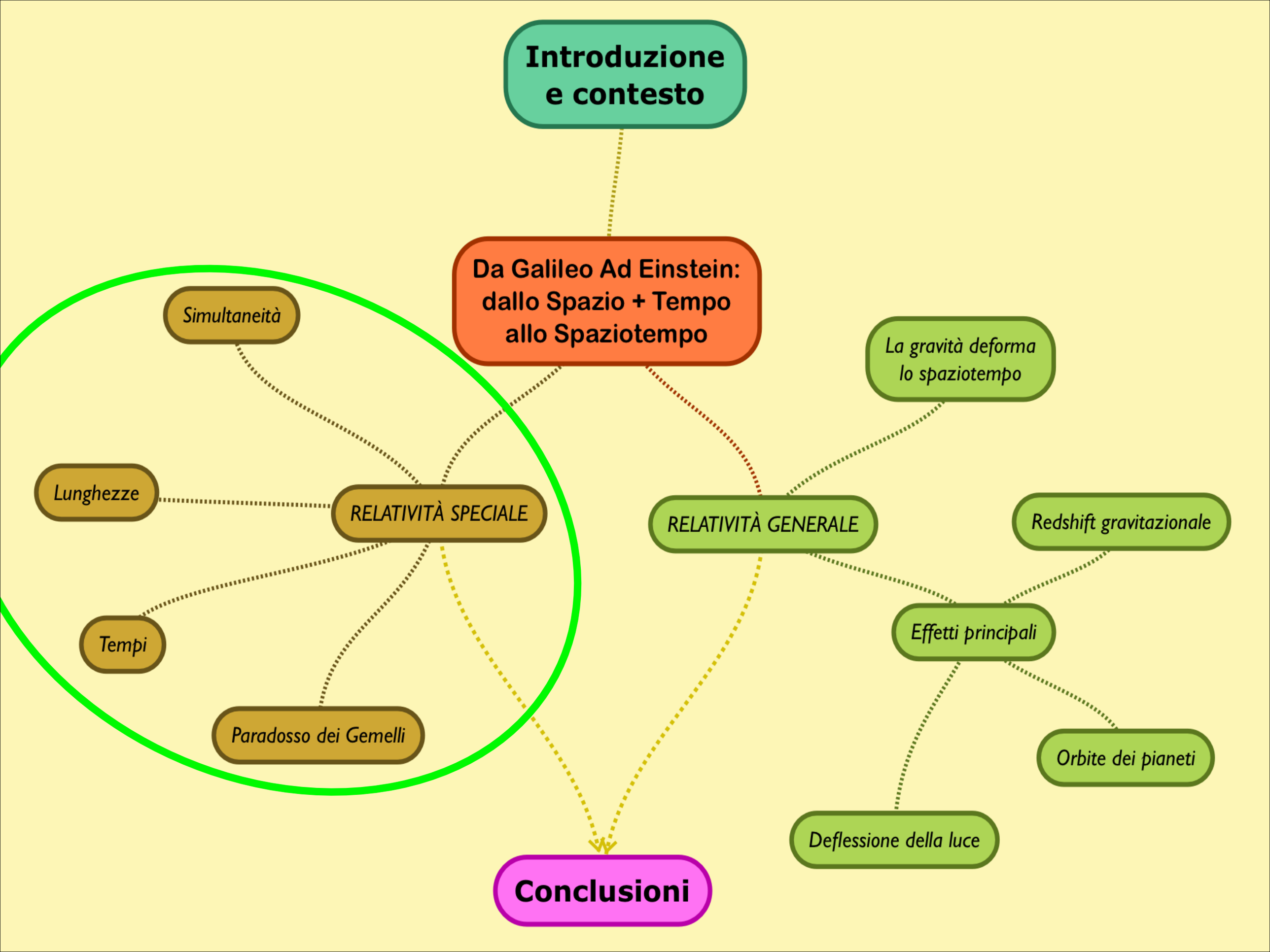
Giuseppe Tormen
Dip. di Fisica e Astronomia
"G.Galilei"
Università di Padova





Lewis Carroll Epstein


Introduzione e contesto
Da Galileo Ad Einstein: dallo Spazio + Tempo allo Spaziotempo
Simultaneità
Lunghezze
RELATIVITÀ SPECIALE
Tempi
Paradosso dei Gemelli
La gravità deforma lo spaziotempo
RELATIVITÀ GENERALE
Redshift gravitazionale
Effetti principali
Orbite dei pianeti
Deflessione della luce
Conclusioni


Introduzione e contesto
Da Galileo Ad Einstein: dallo Spazio + Tempo allo Spaziotempo
Simultaneità
Lunghezze
RELATIVITÀ SPECIALE
Tempi
Paradosso dei Gemelli
La gravità deforma lo spaziotempo
RELATIVITÀ GENERALE
Redshift gravitazionale
Effetti principali
Orbite dei pianeti
Deflessione della luce
Conclusioni

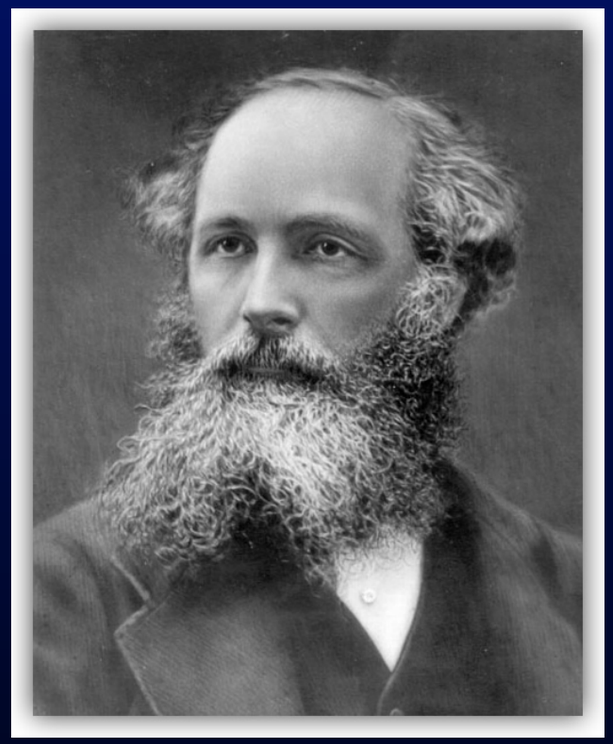
UN PO' DI STORIA...

Galileo

~1600

Newton

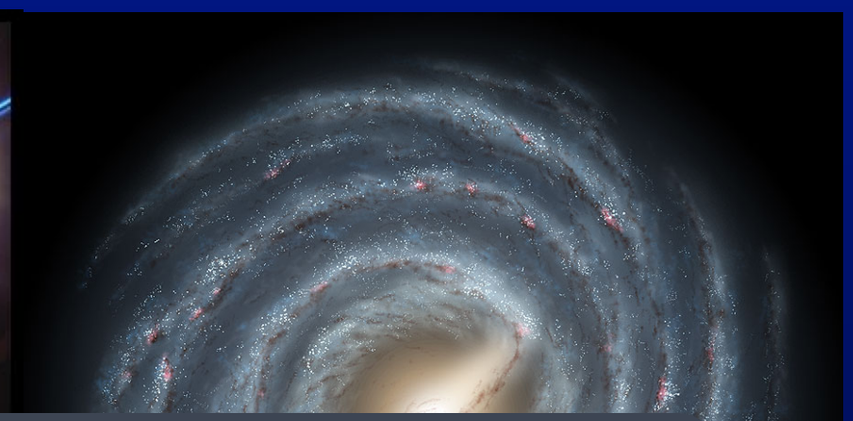
~1700



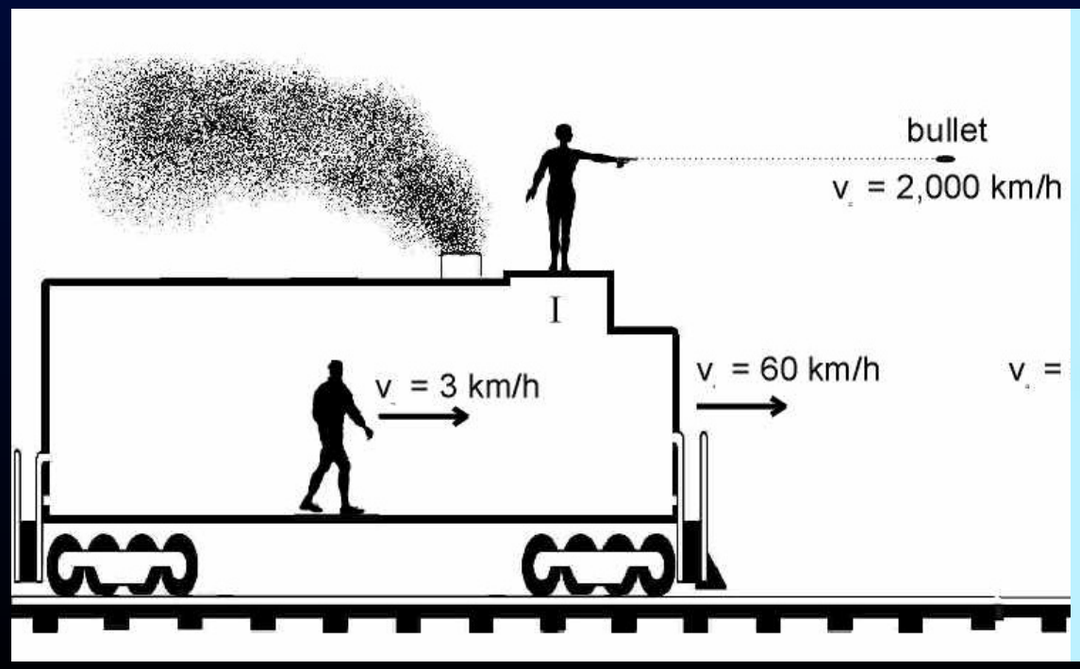
Maxwell

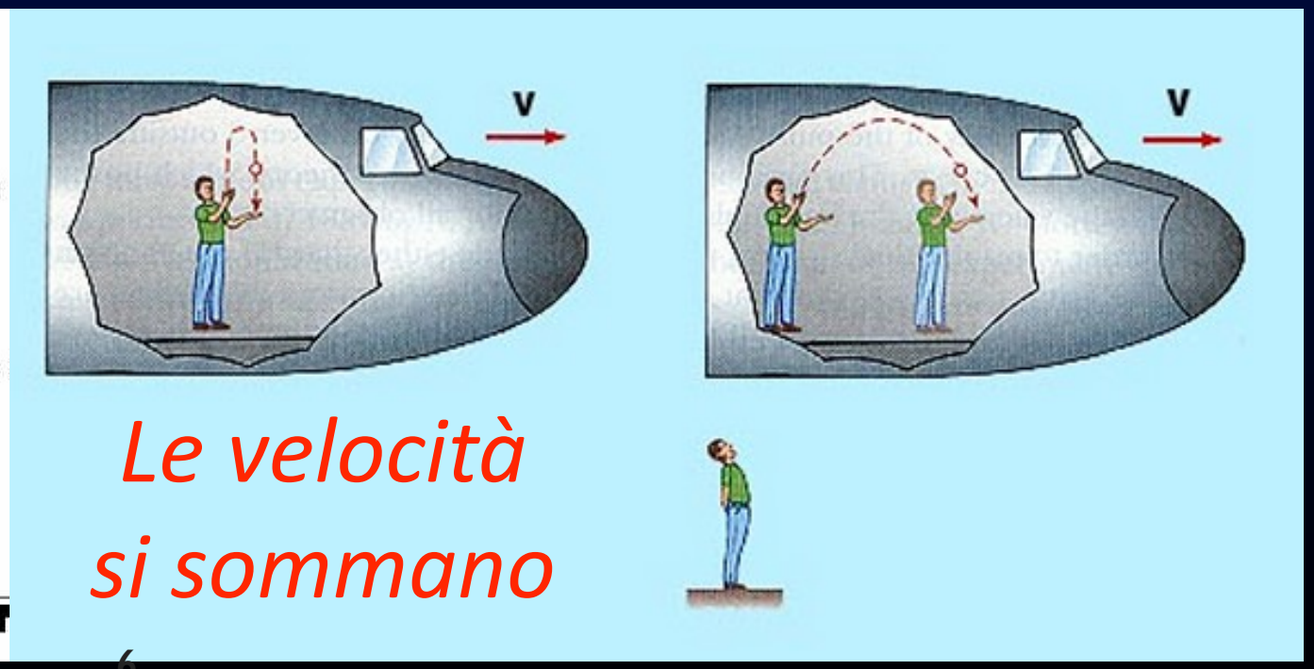
~1860

GALILEO

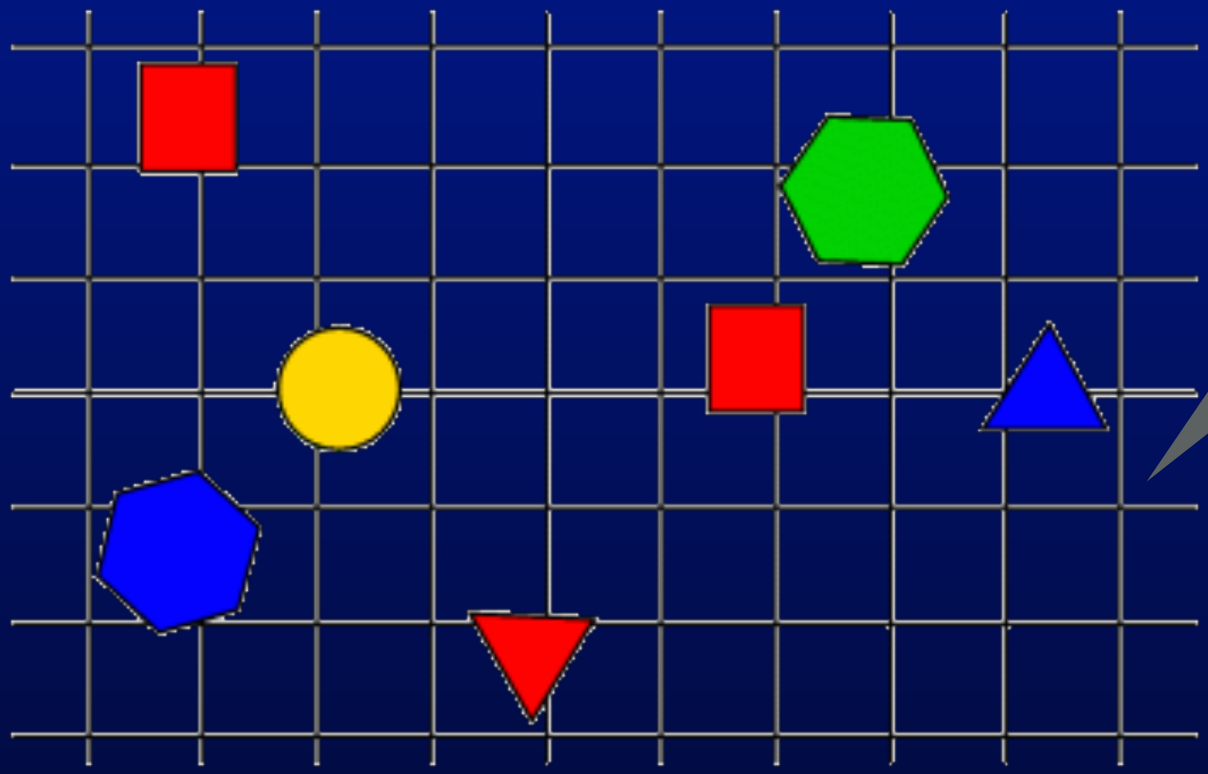


- ***Principio di Relatività:***
- *Il moto è sempre relativo ad un Sistema di Riferimento;*
- *tutti i SdR (inerziali) sono equivalenti;*
- *non esiste un SdR "assoluto" migliore degli altri*





NEWTON

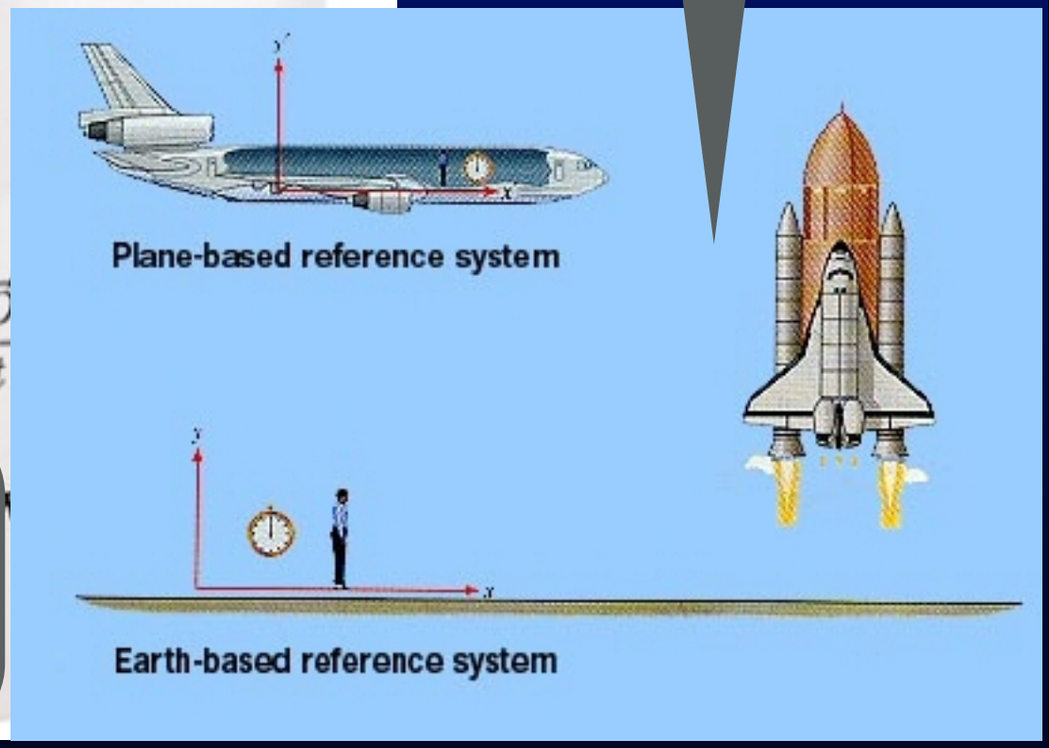


Spazio e tempo sono ASSOLUTI

- La lunghezza di un oggetto è universale
- La durata di un evento è universale

MAXWELL

Se le velocità si sommano, esiste un solo SdR dove la luce ha questa velocità

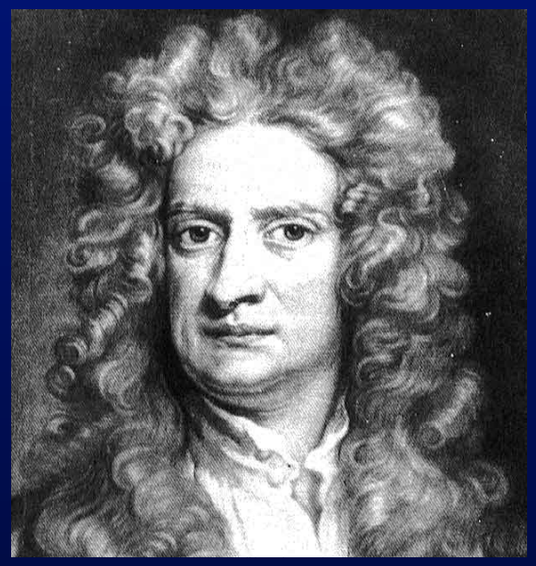


La velocità della luce è una costante della natura: c ≃ 300 mila km/sec

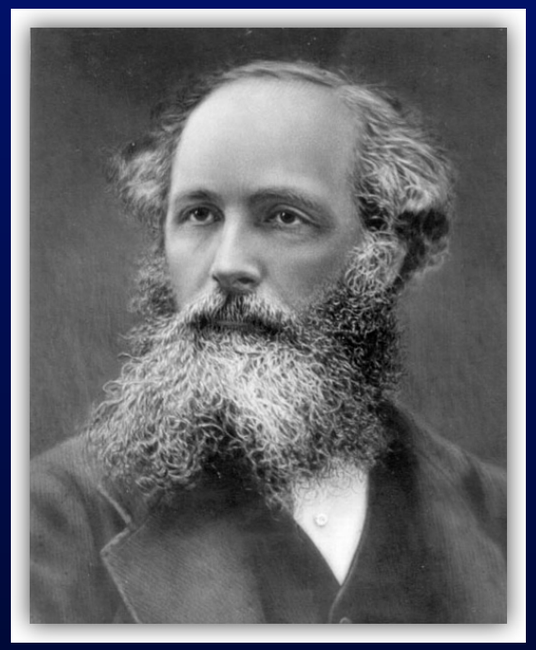
PROBLEMA:
Maxwell e Galileo sono in contrasto!

POI… LA SOLUZIONE!

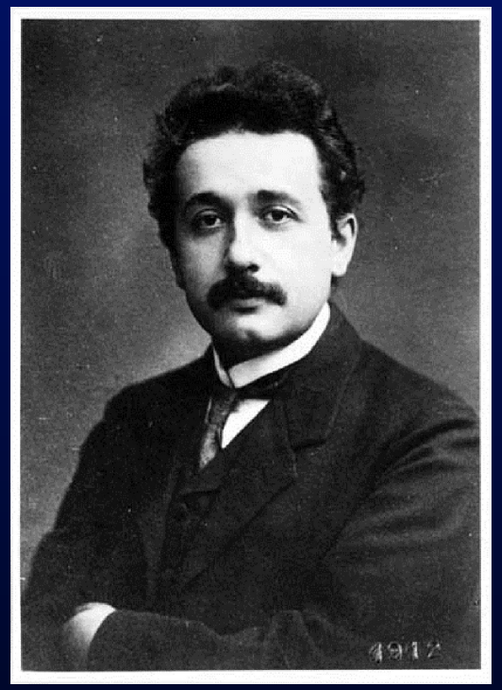
Galileo



Newton



Maxwell



Einstein

~1600 ~1700 ~1860 ~1910

Se il moto è relativo, e tutti i SdR sono equivalenti,

allora la velocità della luce dev'essere la stessa in ogni SdR.

CONSEGUENZE:

Le misure di tempi e lunghezze devono dipendere dal Sistema di Riferimento!

Spazio e Tempo non sono più assoluti e separati! Sono equivalenti e relativi: SPAZIOTEMPO

RELATIVITA'

Speciale (1905)

Descrive sistemi in moto a velocità prossima o uguale a quella della luce, in assenza di gravità

Generale (1916)

Generalizza la precedente a campi gravitazionali

RELATIVITA' SPECIALE

IPOTESI

- Principio di Relatività:
la fisica è la stessa in ogni Sistema di Riferimento Inerziale

- La velocità della luce è la stessa in ogni SdR

- Il tempo è una dimensione come lo spazio: spaziotempo

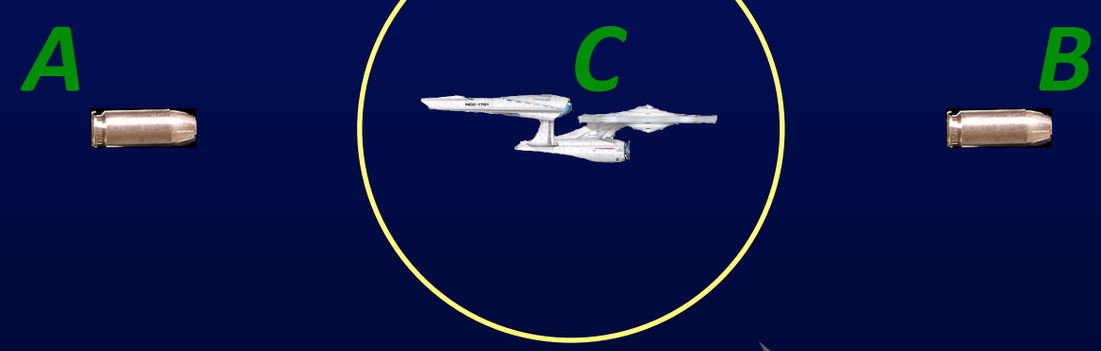
CONSEGUENZE

- Desincronizzazione di orologi in SdR diversi

- Tempi e lunghezze dipendono dal moto relativo

RELATIVITA' DELLA SIMULTANEITA'

fascio di protoni o di luce



Arrivo simultaneo in A e B per materia e luce

Tre astronavi: C, A, B, ferme rispetto a un osservatore O

RELATIVITA' DELLA SIMULTANEITA' - 2

*La velocità del segnale **si somma** a quella delle astronavi*

*fascio di **protoni***

A

B

Astronavi in moto rispetto all'osservatore O

O

Arrivo simultaneo in A e B

RELATIVITA' DELLA SIMULTANEITA' - 3

*fascio di **luce***

*La velocità del segnale **NON si somma** a quella delle astronavi*

A

B

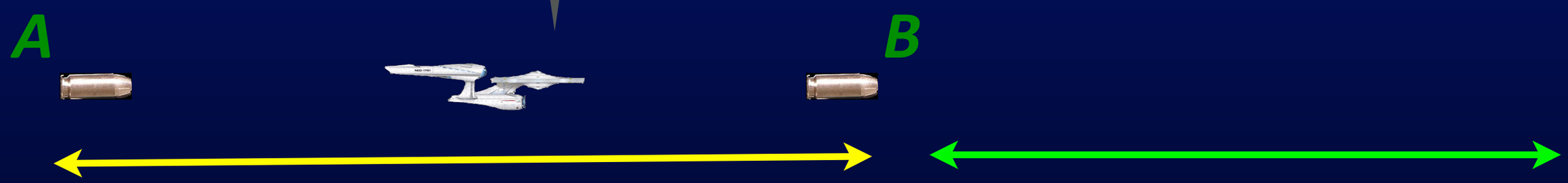
Astronavi in moto rispetto all'osservatore O

O

Arrivo a tempi diversi in A e B

EFFETTO SULLE LUNGHEZZE

La nave al centro comanda di accelerare: l'istruzione arriva prima in A, che accelera per prima:

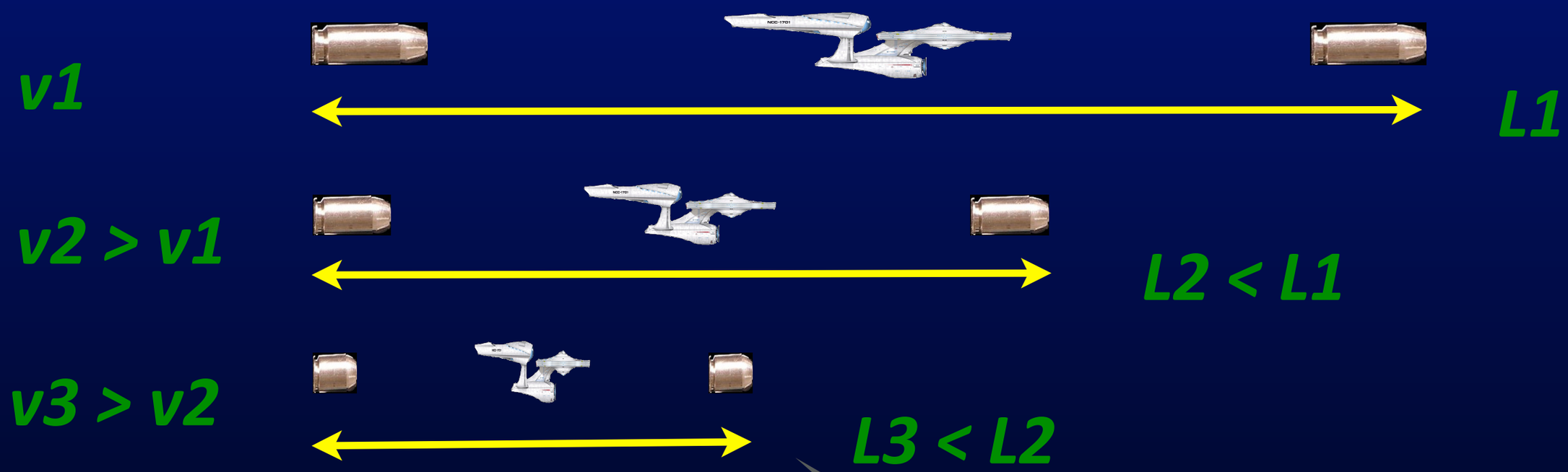


Astronavi in moto rispetto all'osservatore O

O

Le DISTANZE si ACCORCIANO viste da un osservatore in moto

EFFETTO SULLE LUNGHEZZE - 2



Per non far scontrare le astronavi...

Anch'esse devono contrarsi! Lo SPAZIO si contrae.

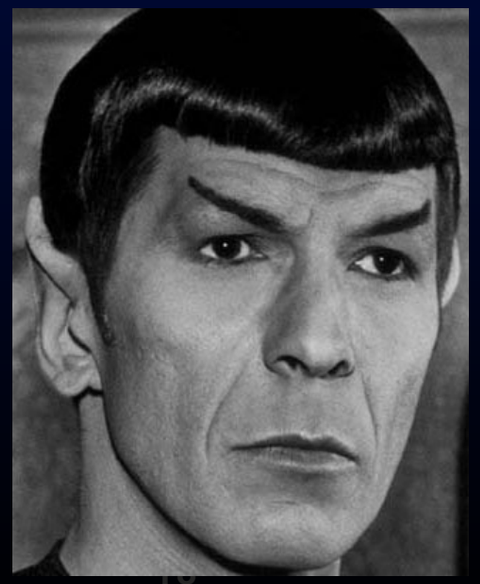
EFFETTO SUI TEMPI

Cilindro trasparente con due specchi

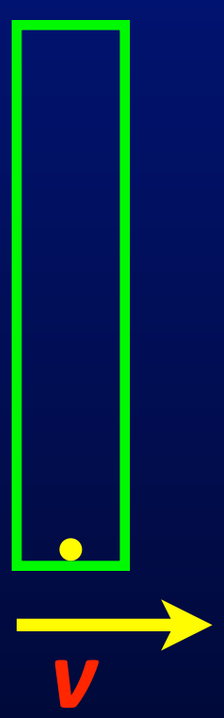
Un fotone

Un secondo corrisponde al tragitto del fotone tra i due specchi

Orologio fermo rispetto a un osservatore O

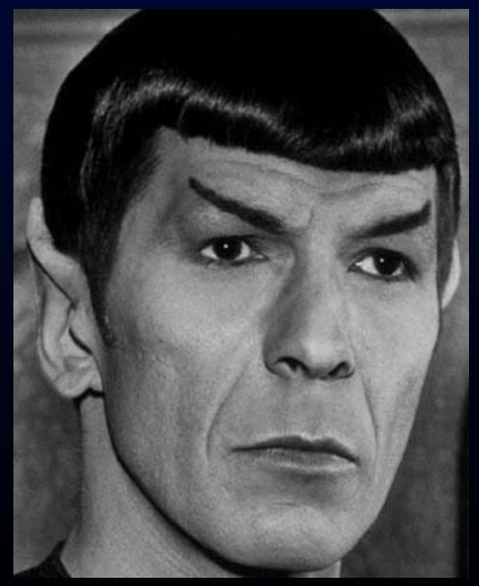


EFFETTO SUI TEMPI - 2



Il tempo rallenta o accelera ?

Orologio in moto rispetto a un osservatore O



Il percorso di ciascun secondo è più lungo:
IL TEMPO RALLENTA!

EFFETTI RELATIVISTICI DEL MOTO

Contrazione delle lunghezze

Un oggetto in moto appare più corto, nella direzione del moto, rispetto ad un oggetto identico e fermo.

Dilatazione dei tempi

Un orologio in moto appare scorrere più lentamente di quanto scorra il mio orologio.

L'effetto è SIMMETRICO

Alice e Marco in moto relativo misurano ciascuno che l'orologio dell'altro va più lento e che il righello dell'altro è più corto.

INTERPRETAZIONE

Nello spazio-tempo ci muoviamo sempre alla velocità della luce!

1 secondo

=

1 secondo-luce

=

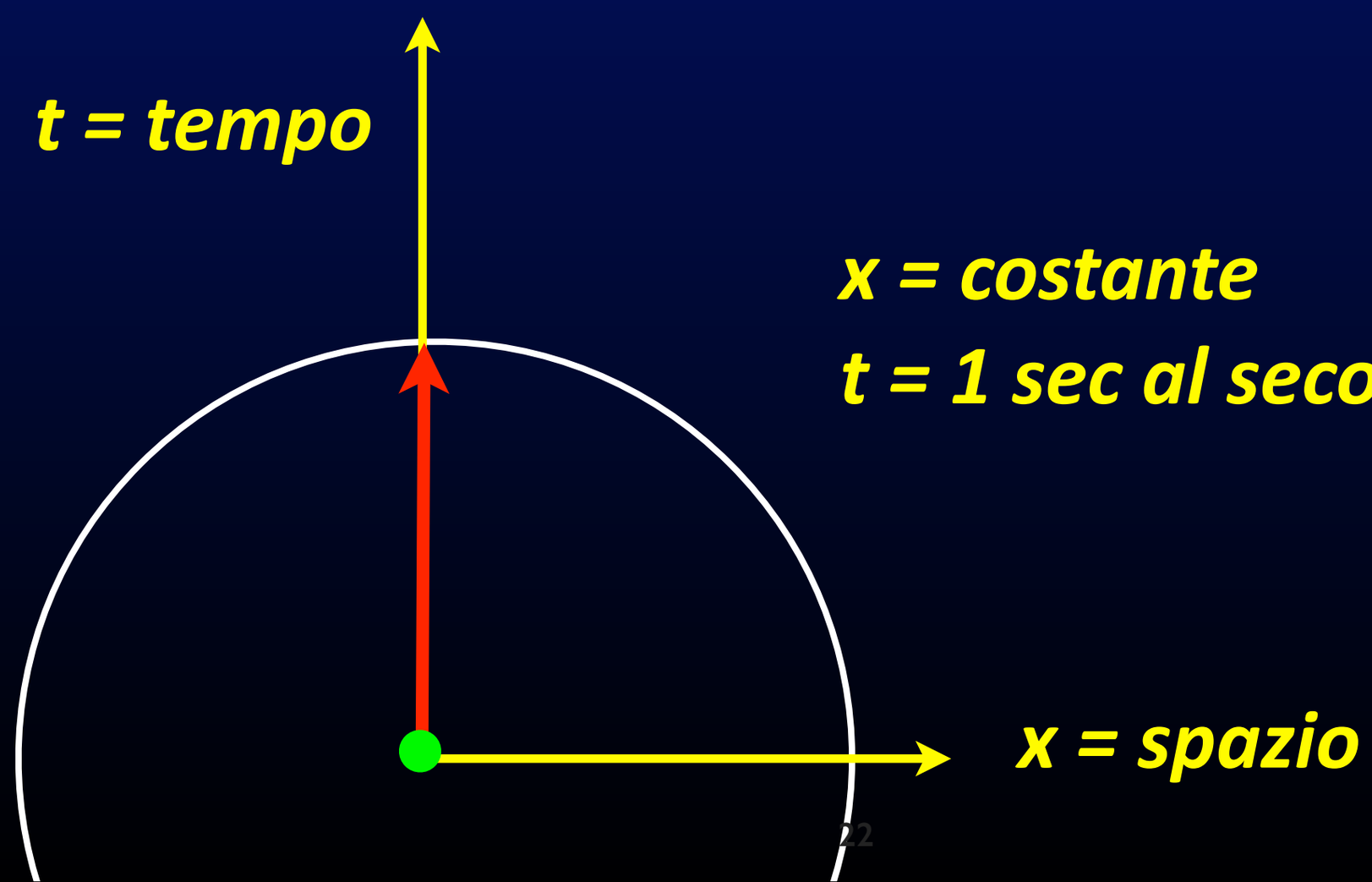
300.000 km

INTERPRETAZIONE - 2

Se siamo fermi nello spazio, ci muoviamo solo nel tempo, in direzione verticale, alla velocità di:

1 secondo al secondo = 300.000 km/s = c

cioè alla velocità della luce *c*.



x = costante : $V_x = 0$

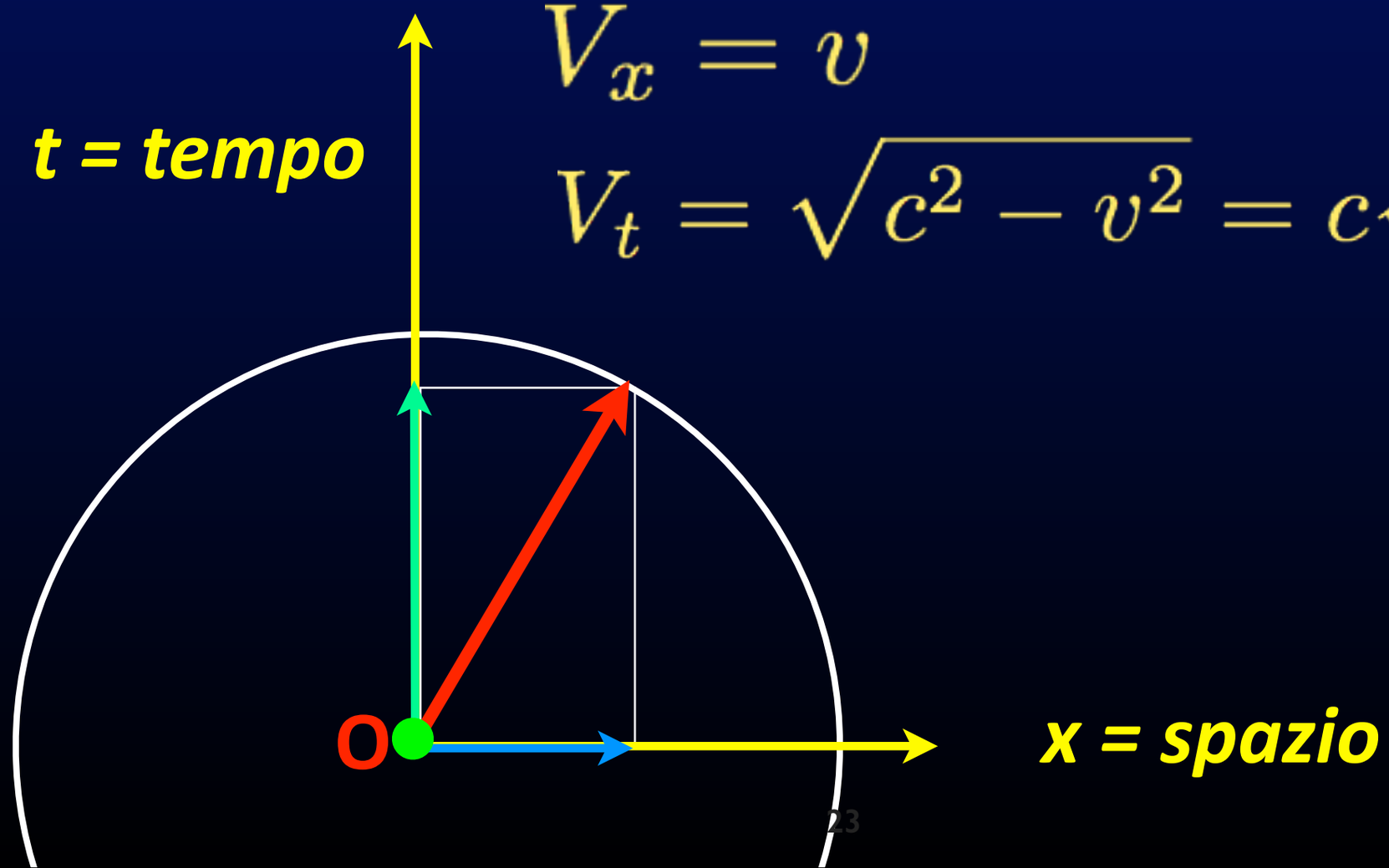
t = 1 sec al secondo: $V_t = c$

INTERPRETAZIONE - 3

Se ci muoviamo rispetto ad un osservatore **O**, parte della nostra velocità "temporale" viene convertita in velocità "spaziale". Nel SdR di O il nostro orologio rallenta.

$$V_x = v$$

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



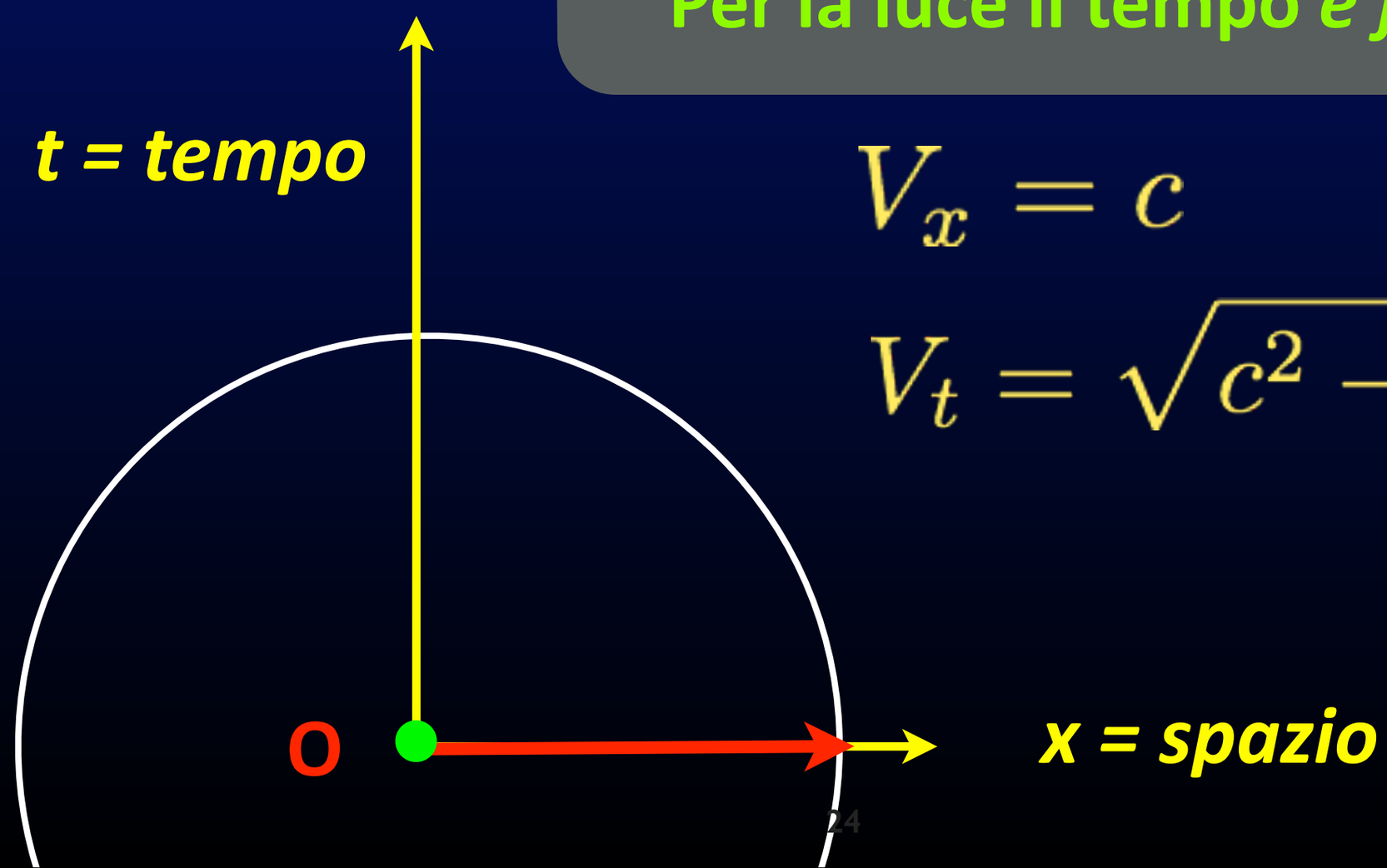
INTERPRETAZIONE - 4

Nel caso limite della velocità della luce, tutta la velocità "temporale" è convertita in velocità "spaziale". Nel SdR di **O** l'orologio è fermo.

Per la luce il tempo *è fermo!*

$$V_x = c$$

$$V_t = \sqrt{c^2 - c^2} = 0$$



PARADOSSO DEI GEMELLI

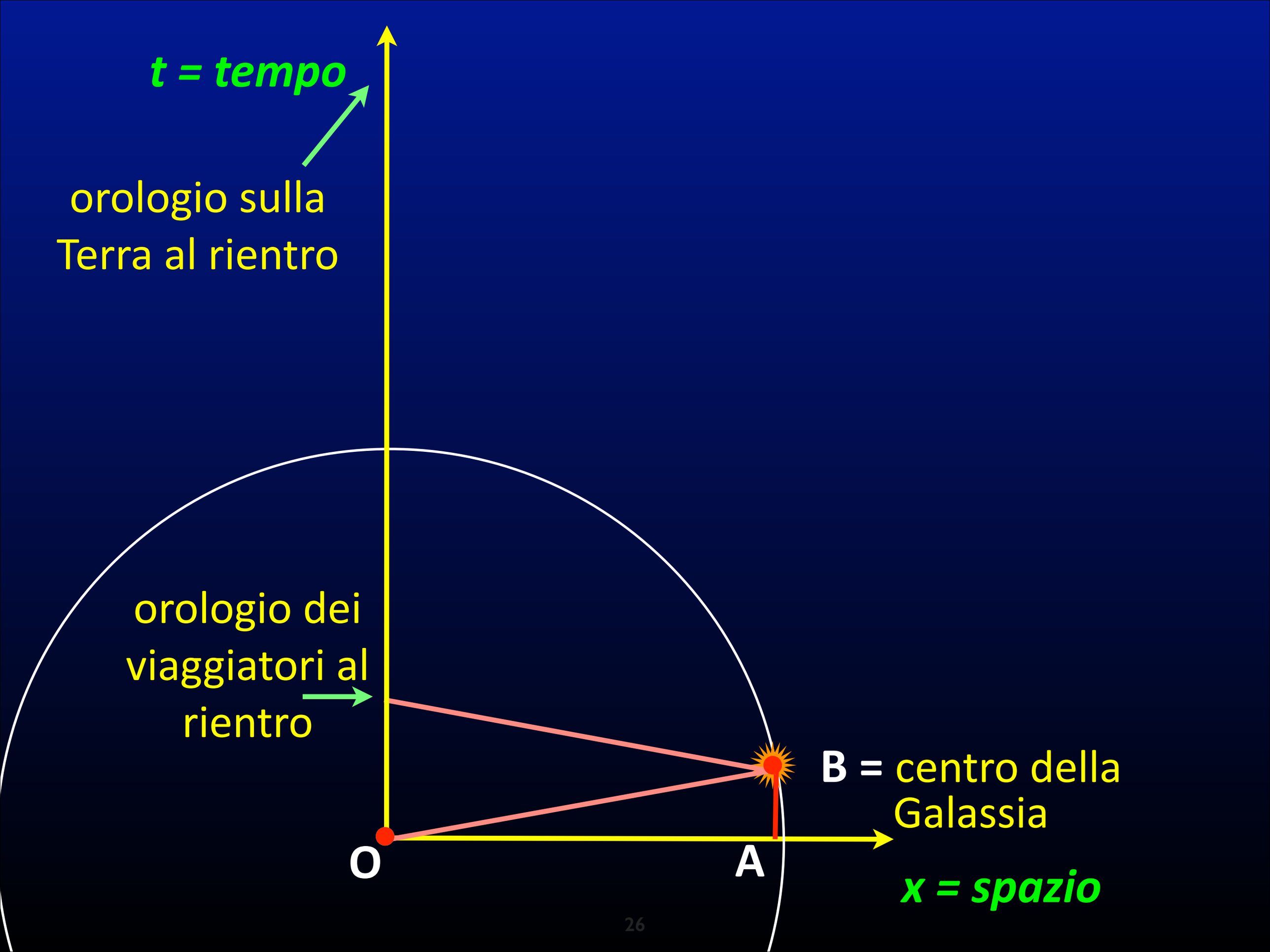
Alice e Marco sono due amici appassionati di astrofisica. Rubano un'astronave per fare una passeggiata fino al centro della Galassia, a 26 mila anni luce di distanza.

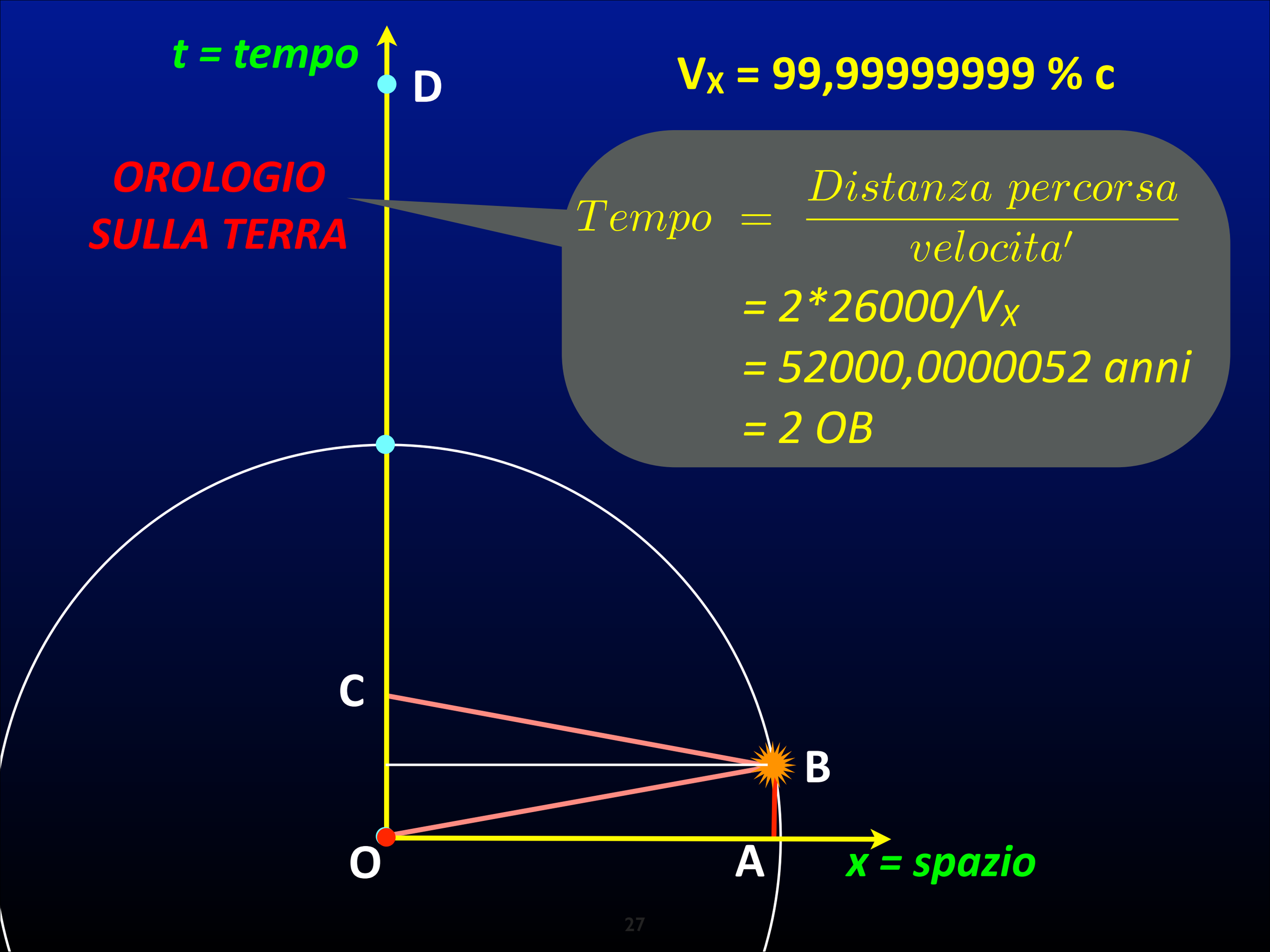
L'astronave viaggia ad una velocità prossima a quella della luce: v = 0,9999999999 c.

I due bevono un caffè Vulcaniano e tornano indietro.

Quanto tempo è passato sulla Terra al loro ritorno?

E quanto tempo è passato per loro?


t = tempo
orologio sulla Terra al rientro
orologio dei viaggiatori al rientro
B = centro della Galassia
O
A
x = spazio



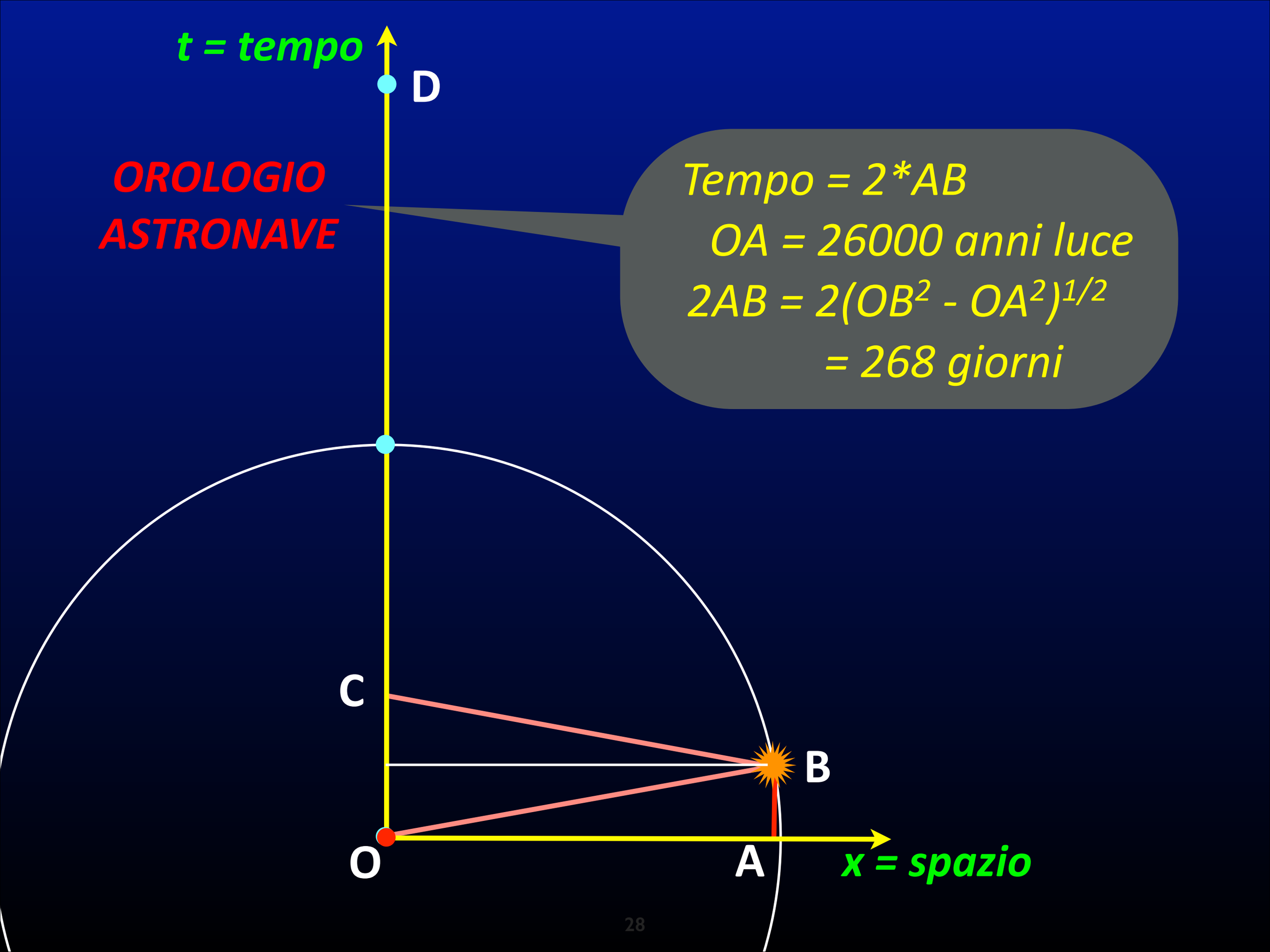
V_X = 99,99999999 % c

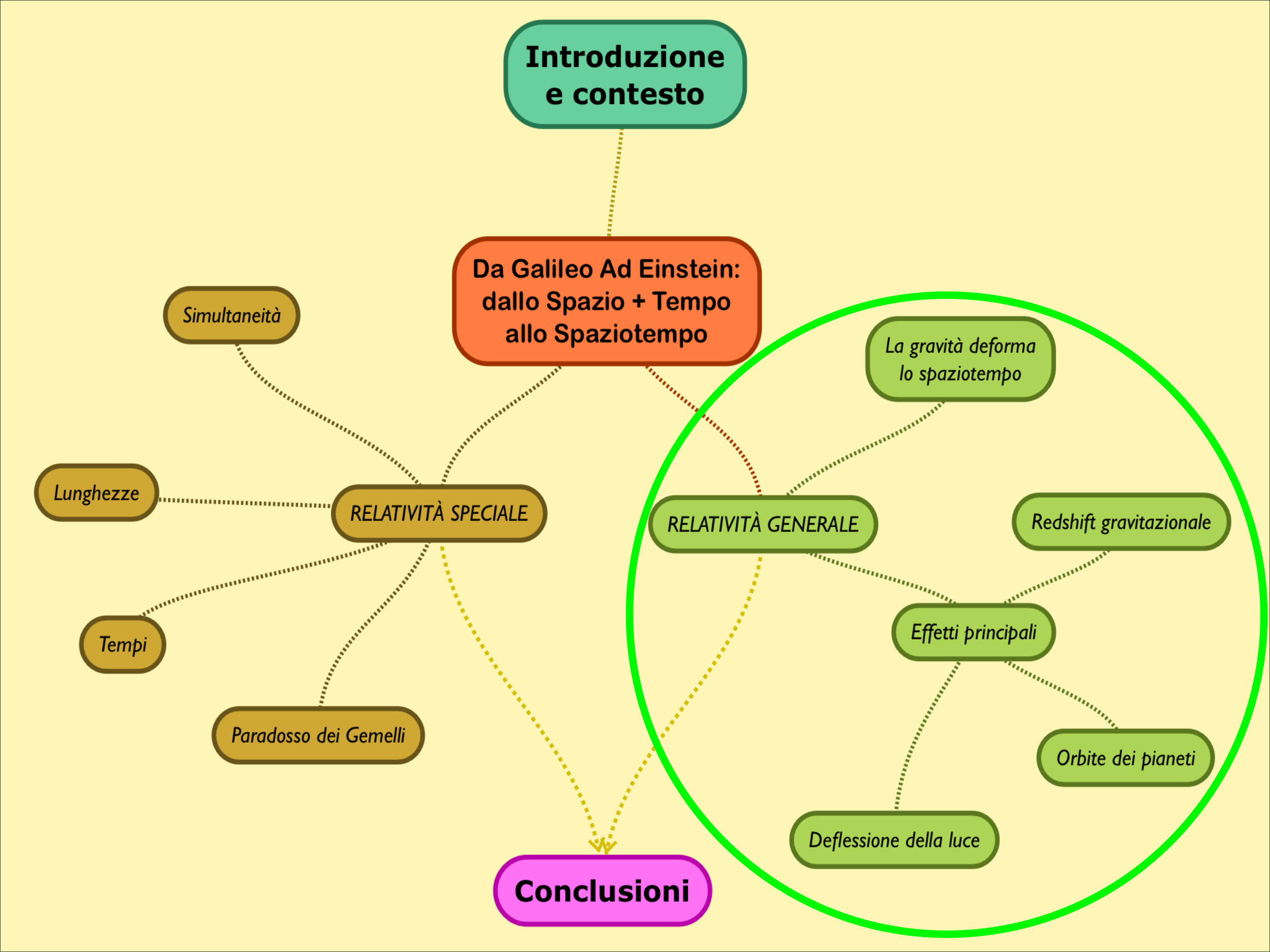
$$Tempo = \frac{Distanza\ percorsa}{velocita'}$$

= 2*26000/V_X

= 52000,0000052 anni

= 2 OB


t = tempo
D
OROLOGIO
ASTRONAVE
Tempo = 2*AB
OA = 26000 anni luce
2AB = 2(OB² - OA²)^1/2
= 268 giorni
C
B
O
A
x = spazio


Introduzione e contesto
Da Galileo Ad Einstein: dallo Spazio + Tempo allo Spaziotempo
Simultaneità
Lunghezze
RELATIVITÀ SPECIALE
Tempi
Paradosso dei Gemelli
La gravità deforma lo spaziotempo
RELATIVITÀ GENERALE
Redshift gravitazionale
Effetti principali
Orbite dei pianeti
Deflessione della luce
Conclusioni

PRINCIPI DELLA RELATIVITA' GENERALE

$$E = mc^2$$

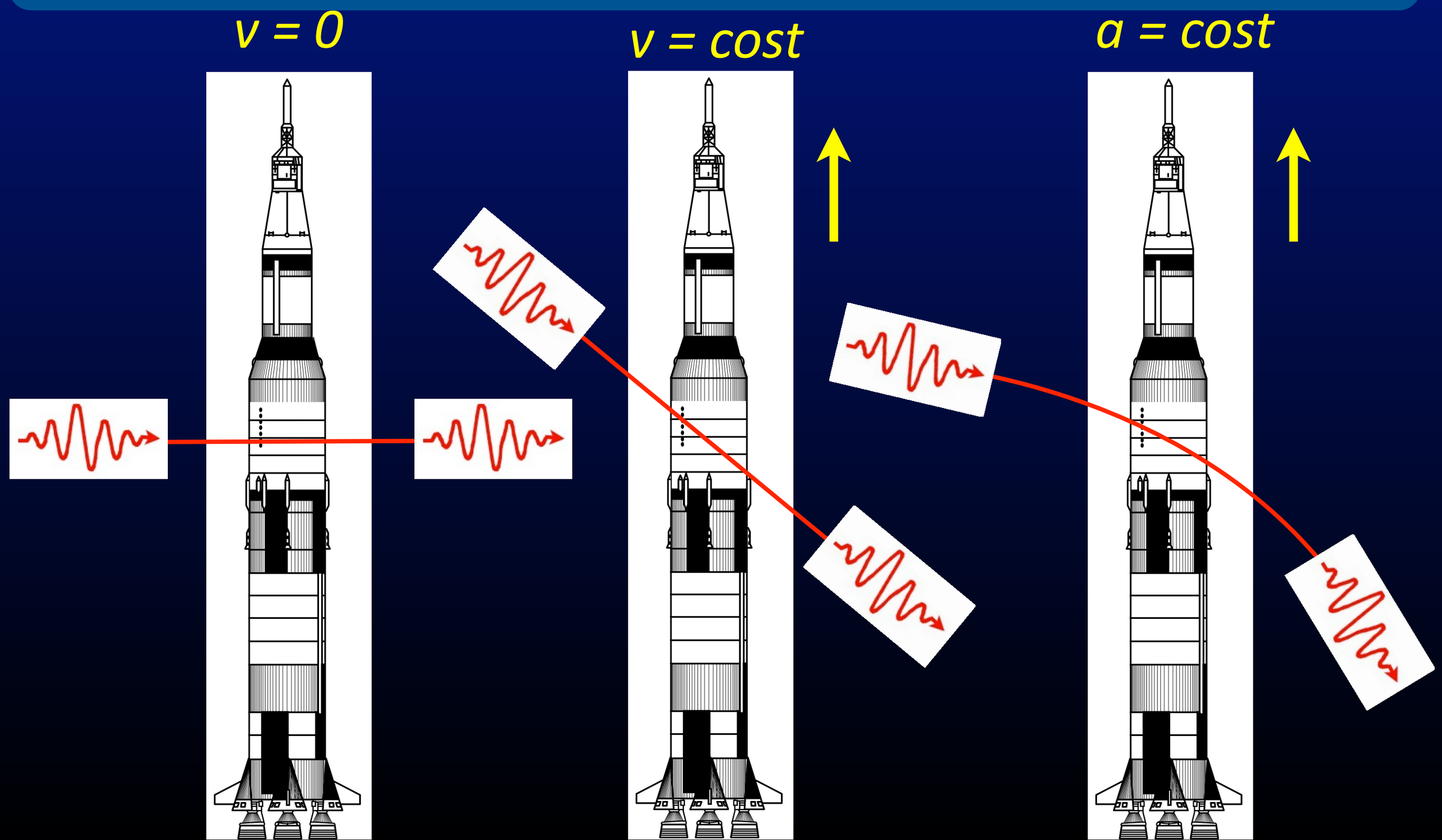
EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

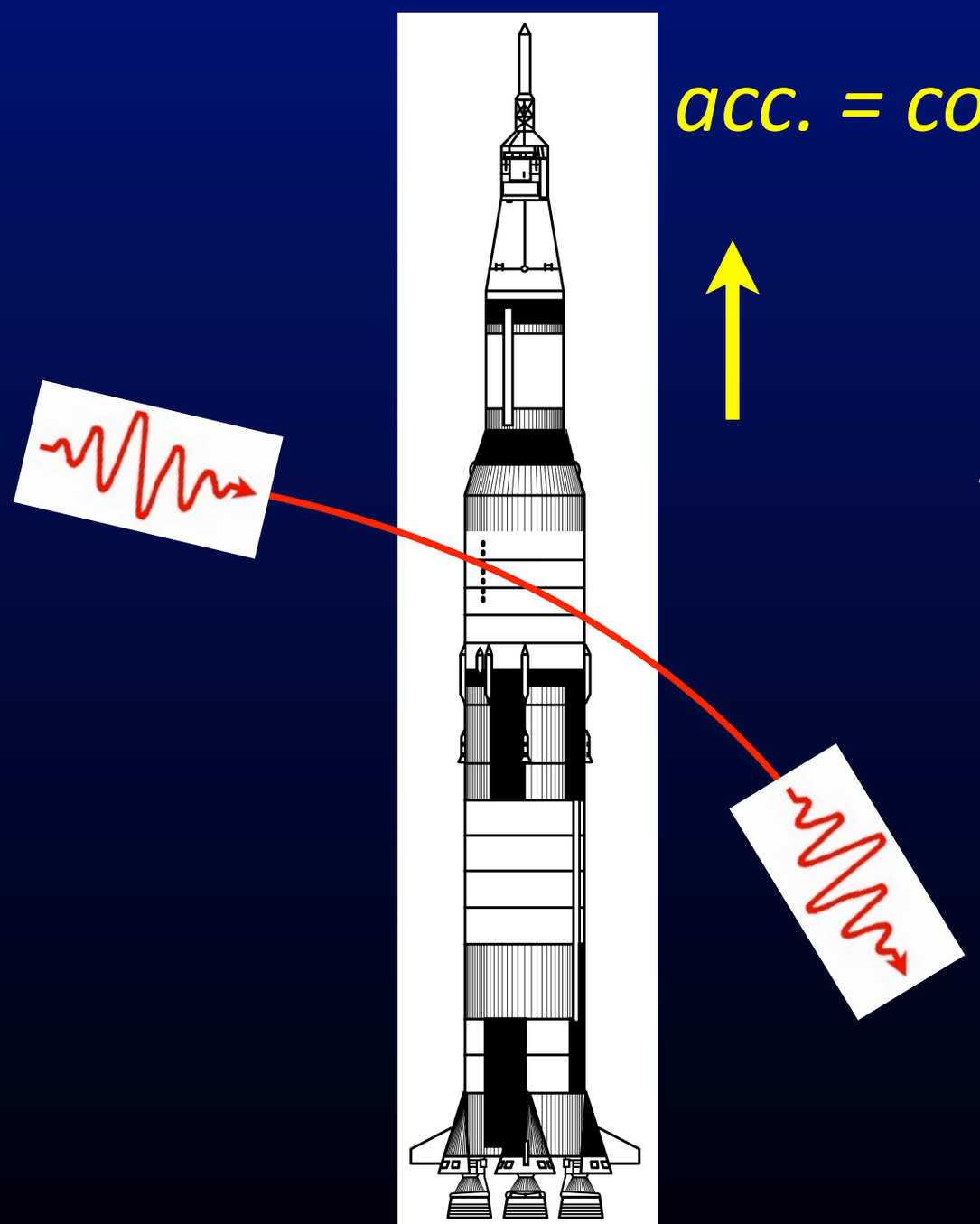
Ogni accelerazione è localmente (qui ed ora) indistinguibile da un campo gravitazionale

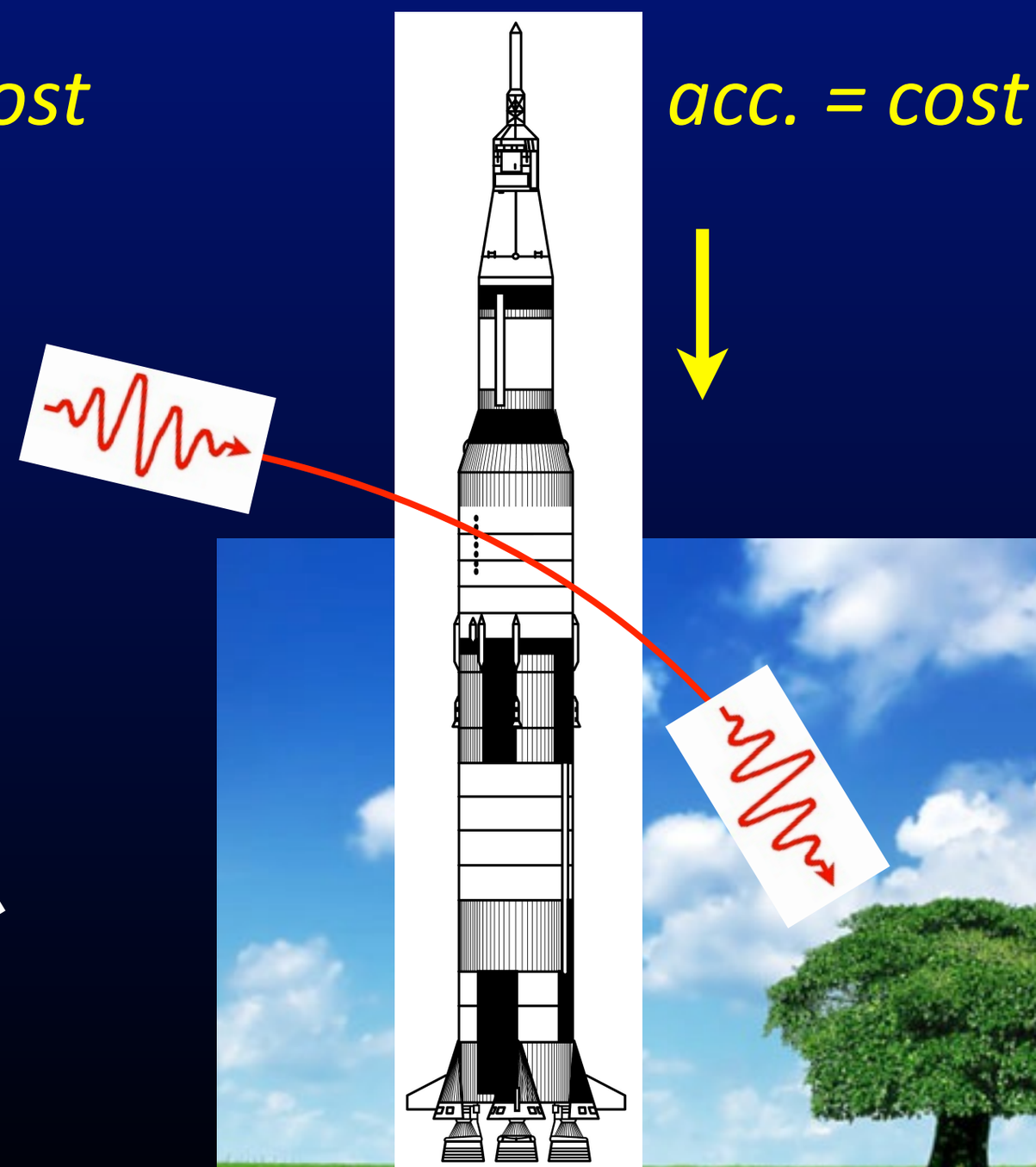
PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

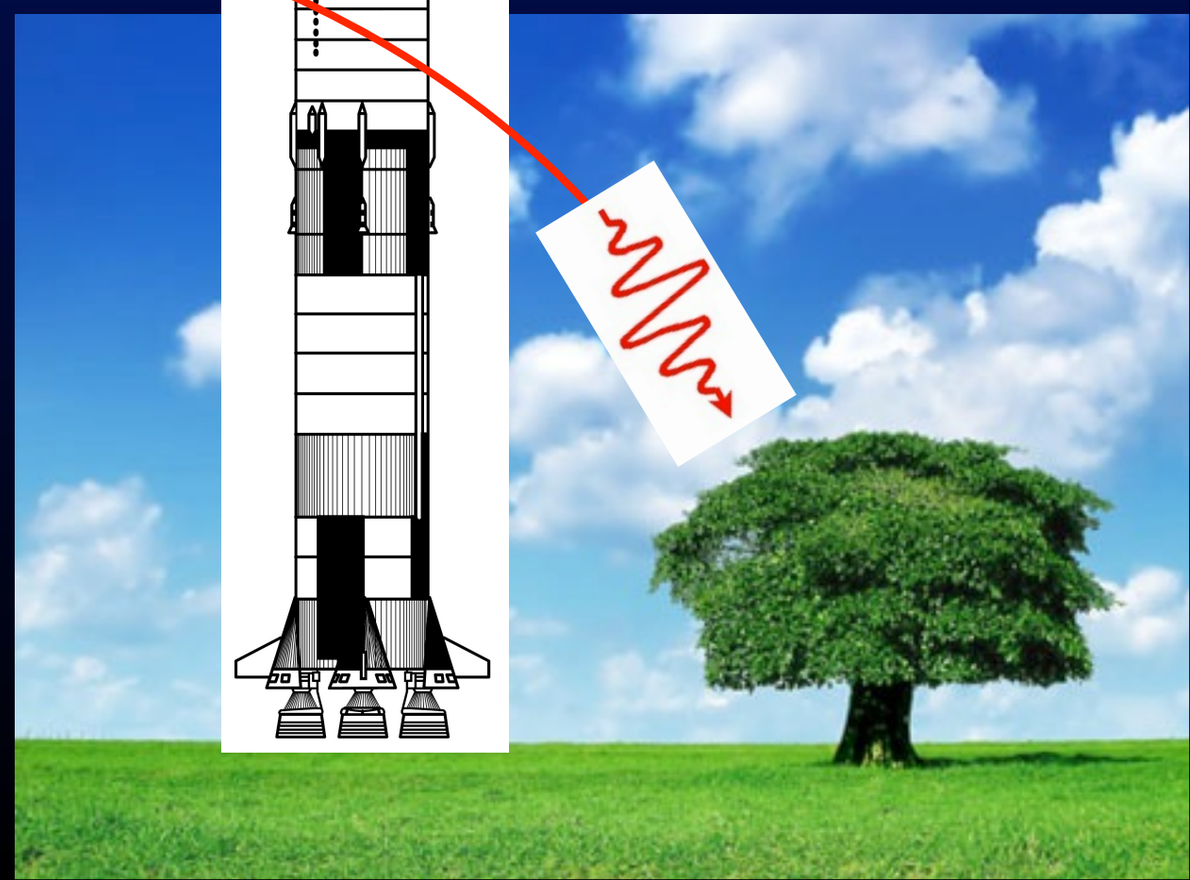
Visto dal razzo, che traiettoria compie un fotone orizzontale ?



PRINCIPIO DI EQUIVALENZA - 2

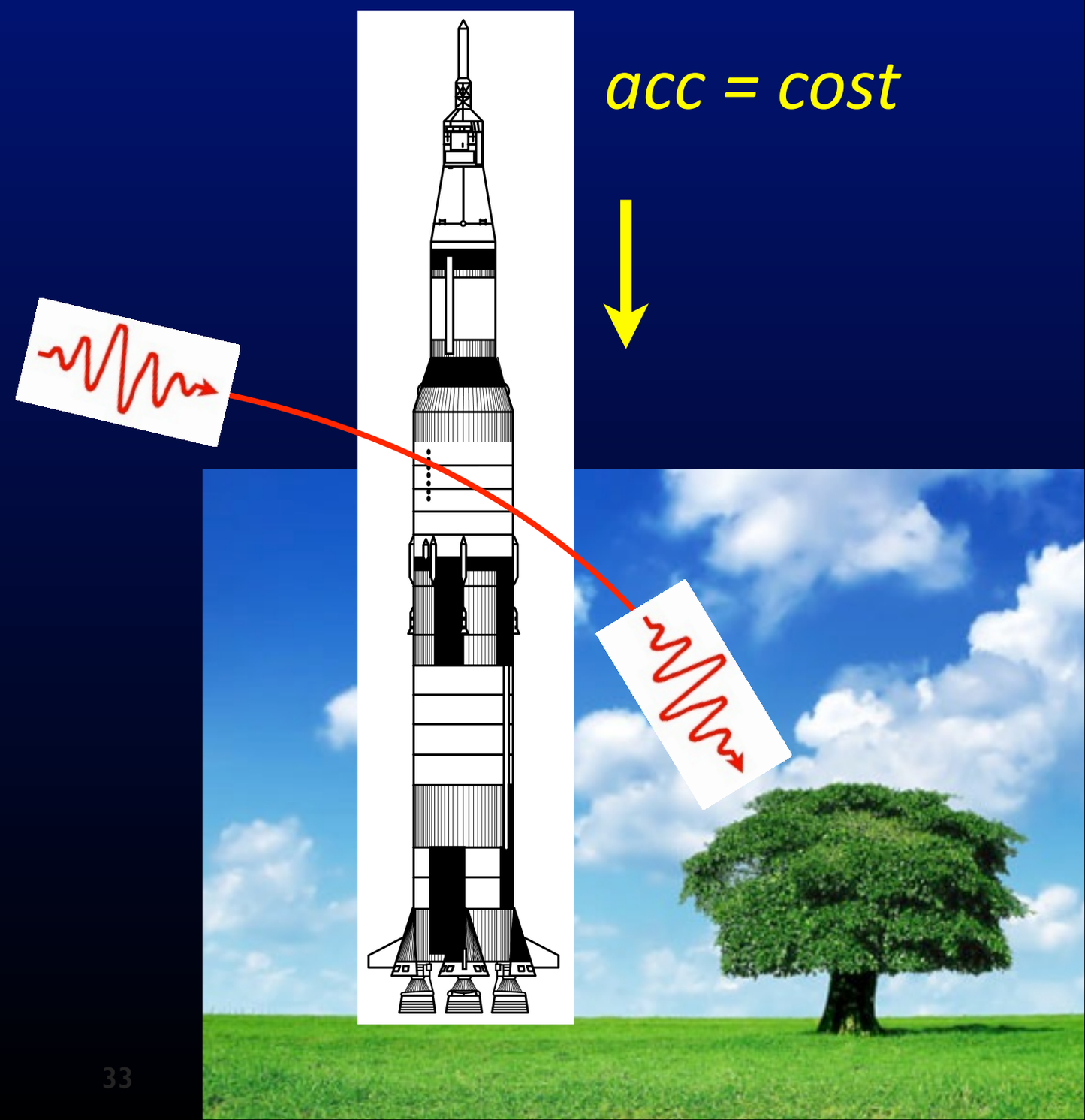






PRINCIPIO DI EQUIVALENZA - 3

Anche la luce sente la gravità!



INTERPRETAZIONE

Materia ed energia

creano gravità

deformando

lo spaziotempo

la gravità

DILATA

il tempo

PIU' IMPORTANTE

la gravità

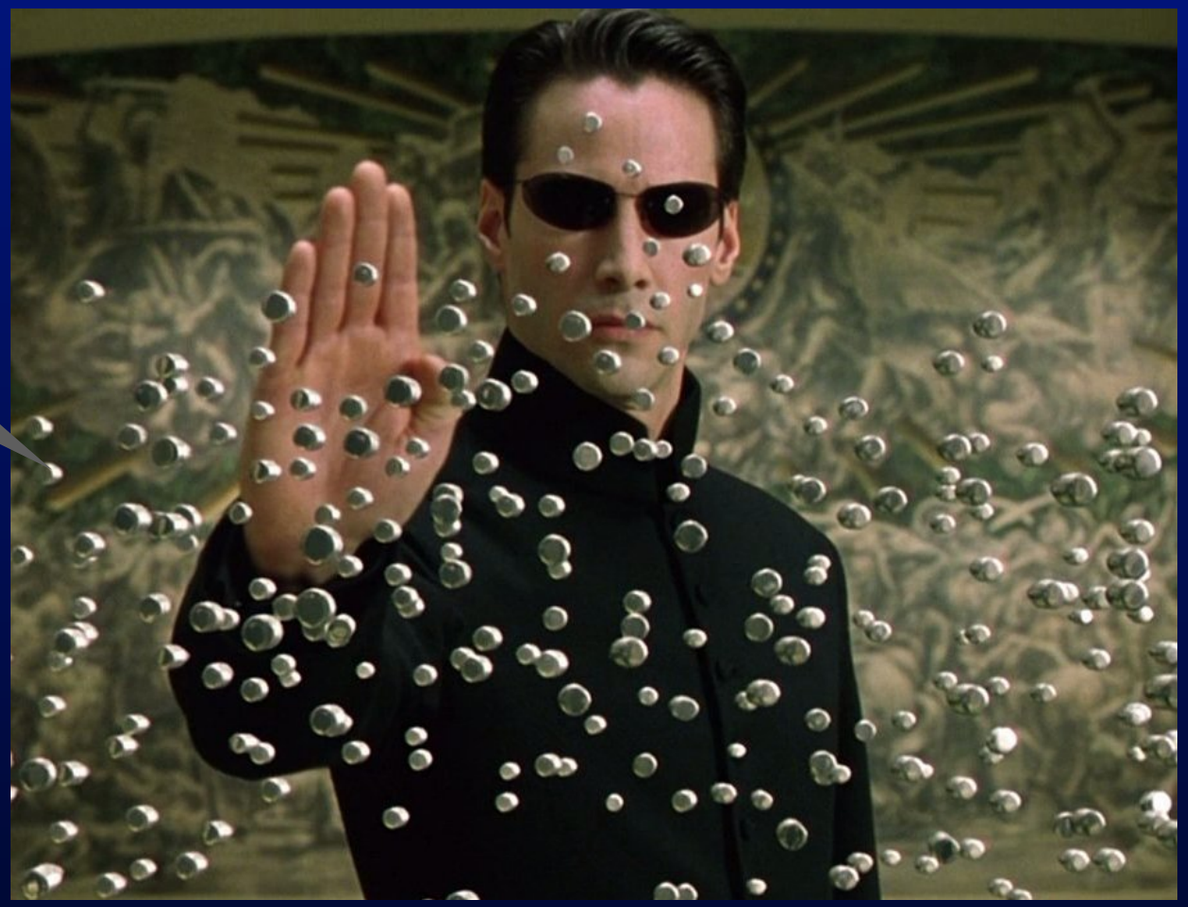
CONTRAE

lo spazio

MENO IMPORTANTE

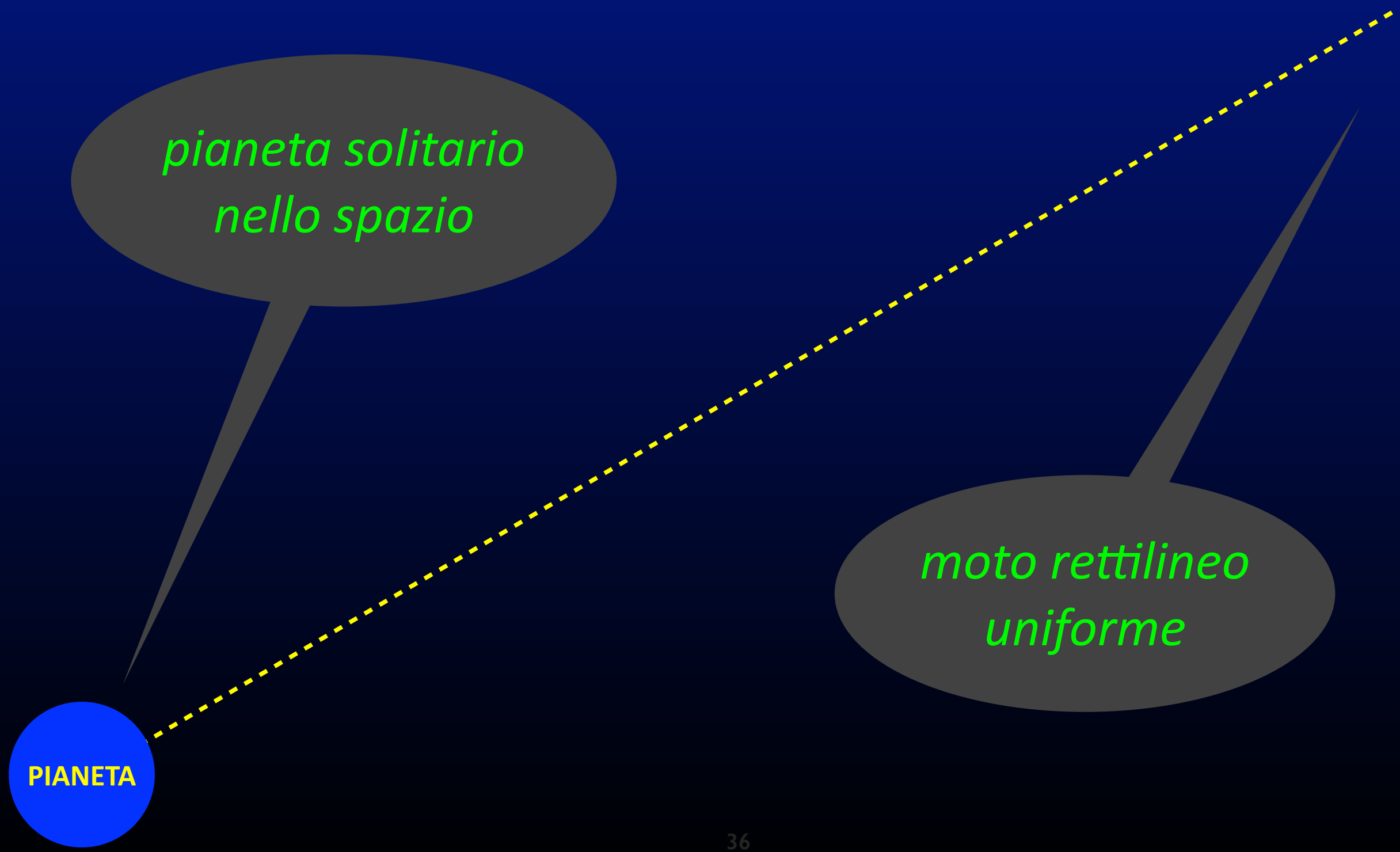
GRAVITA' = DILATAZIONE DEL TEMPO

Vicino
alla materia il tempo
RALLENTA



Normalmente la differenza è piccola: ***pochi milionesimi di sec*** *su 100 anni*

GRAVITA' = DILATAZIONE DEL TEMPO - 2



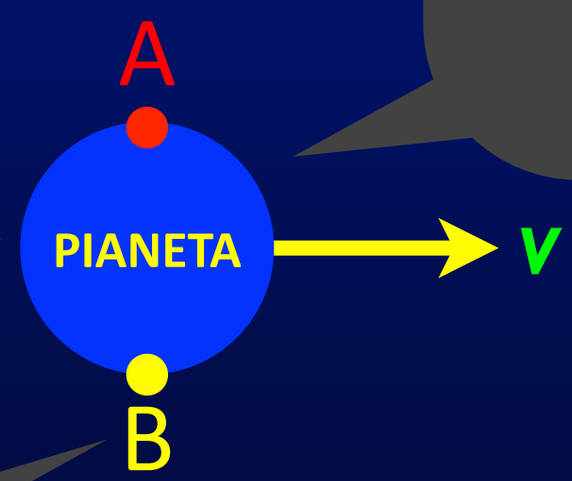
GRAVITA' = DILATAZIONE DEL TEMPO - 3

Pianeta in moto con velocità v

***A** avanza per 1 sec*

***B** avanza per 0.5 sec*

***B** rimane indietro*

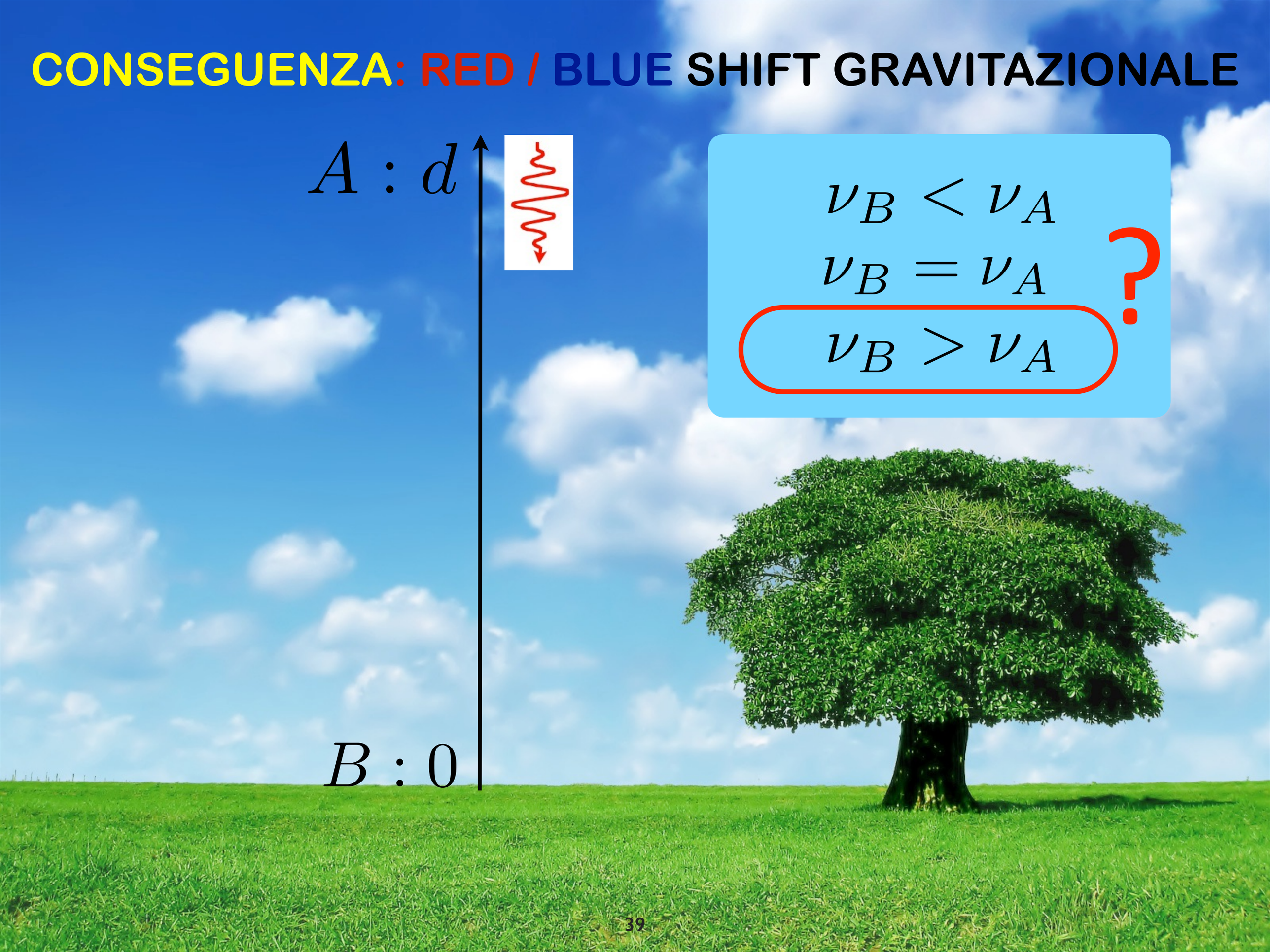


Il tempo in B scorre più lentamente che in A

Che traiettoria ?

GRAVITA' = DILATAZIONE DEL TEMPO - 4

CONSEGUENZA: RED / BLUE SHIFT GRAVITAZIONALE



$$\nu_B < \nu_A$$

$$\nu_B = \nu_A$$

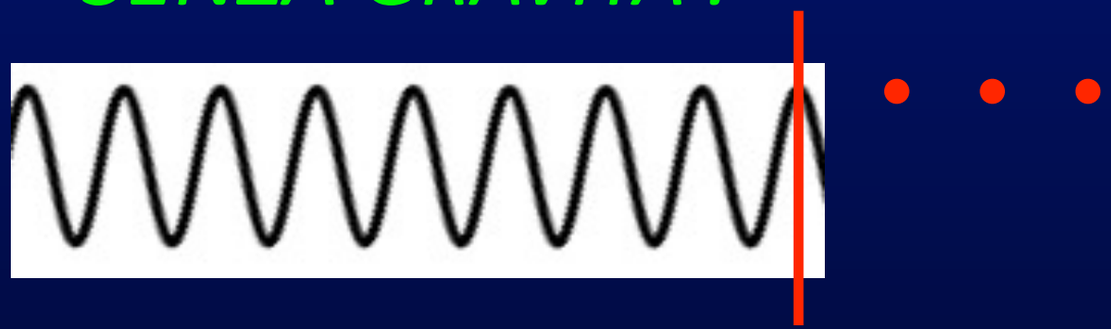
$$\nu_B > \nu_A$$

?

RED / BLUE SHIFT GRAVITAZIONALE - 2

Frequenza ν =numero di picchi dell'onda che in un secondo passano per una posizione fissata:

SENZA GRAVITA':



$$\nu = 3$$

CON GRAVITA':

$$\nu = 6$$

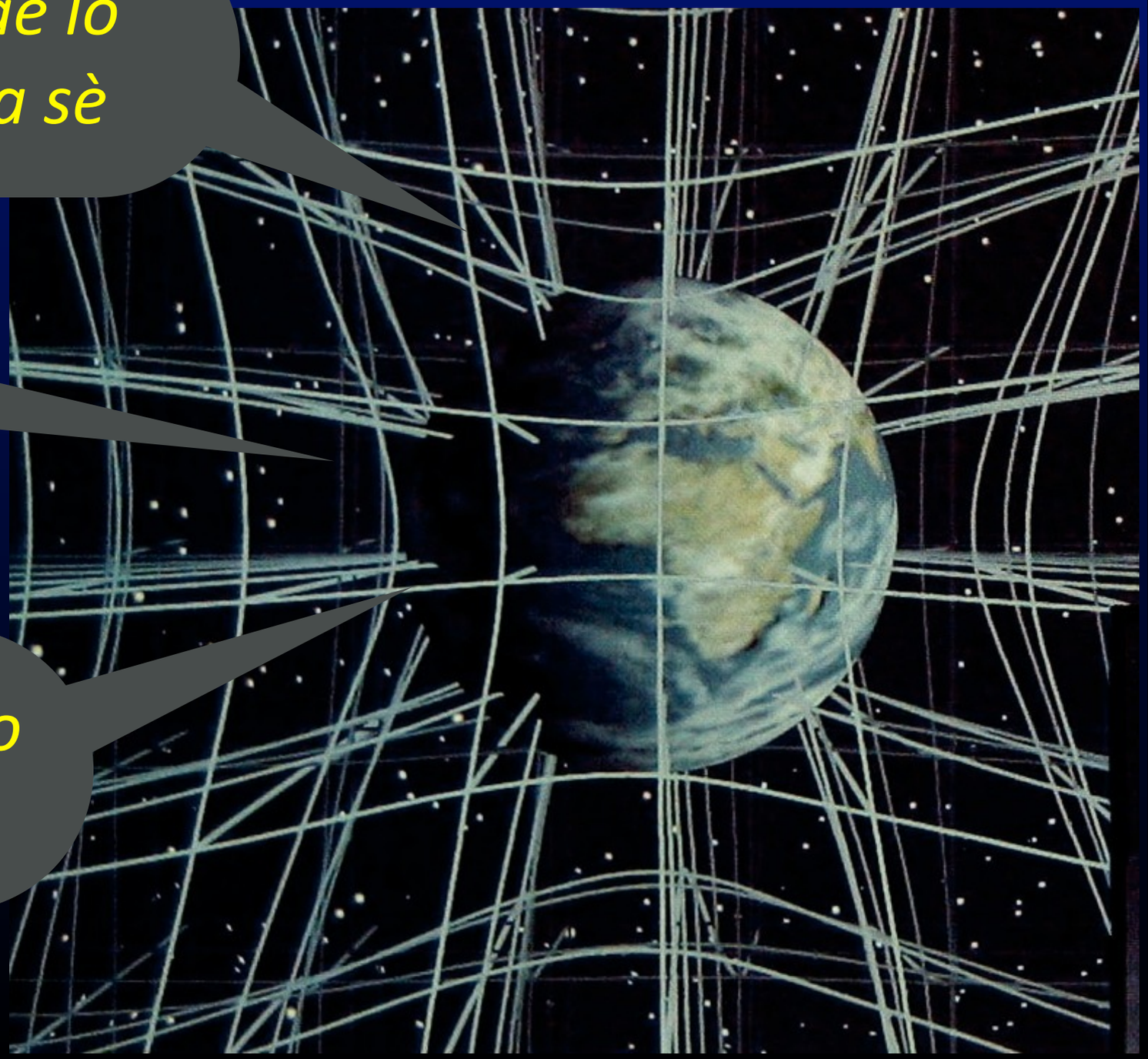
*La gravità **rallenta** il tempo e questo rende la luce più blu!*

GRAVITA' = CONTRAZIONE DELLO SPAZIO

La materia contrae lo spazio attorno a sè

il metro si accorcia

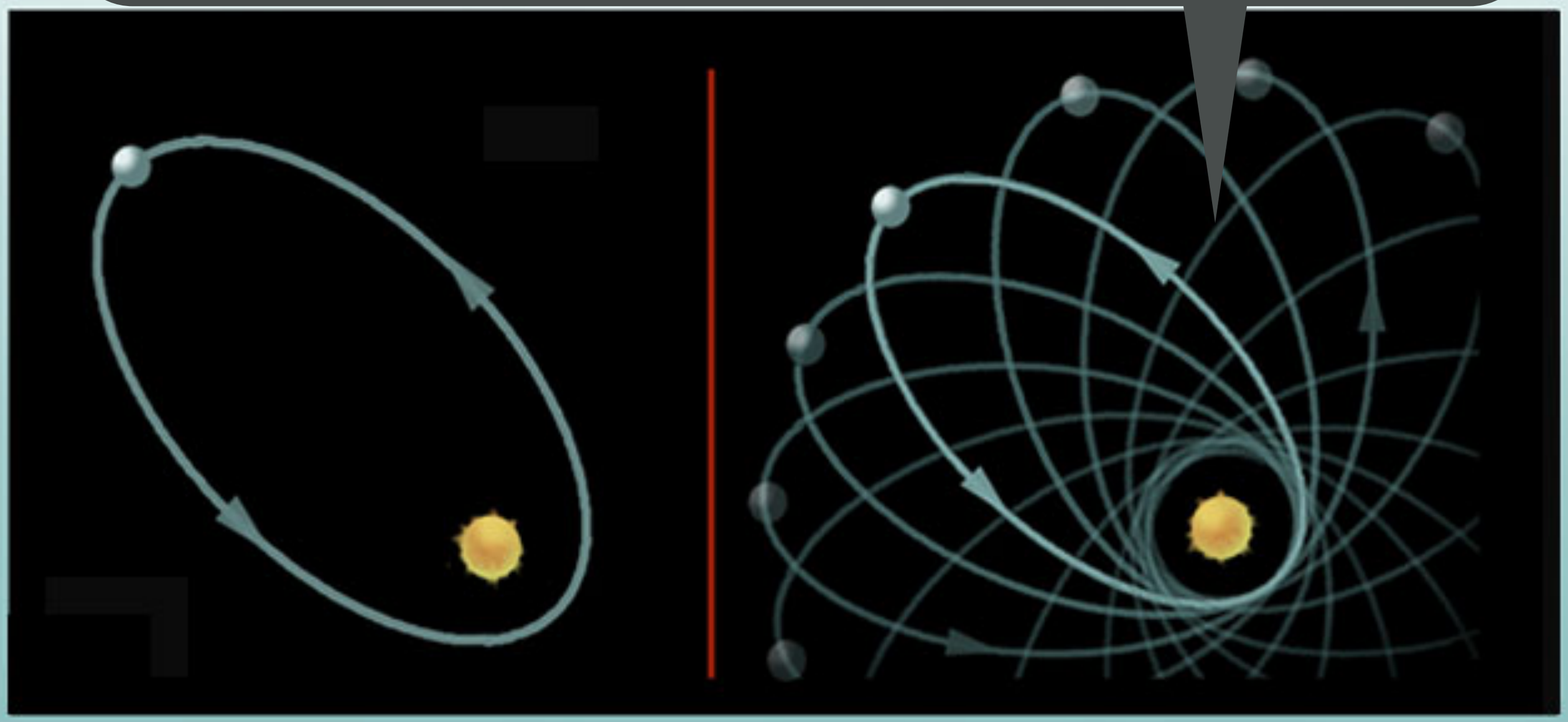
Lo spazio dentro un dato bordo aumenta



GRAVITA' = CONTRAZIONE DELLO SPAZIO

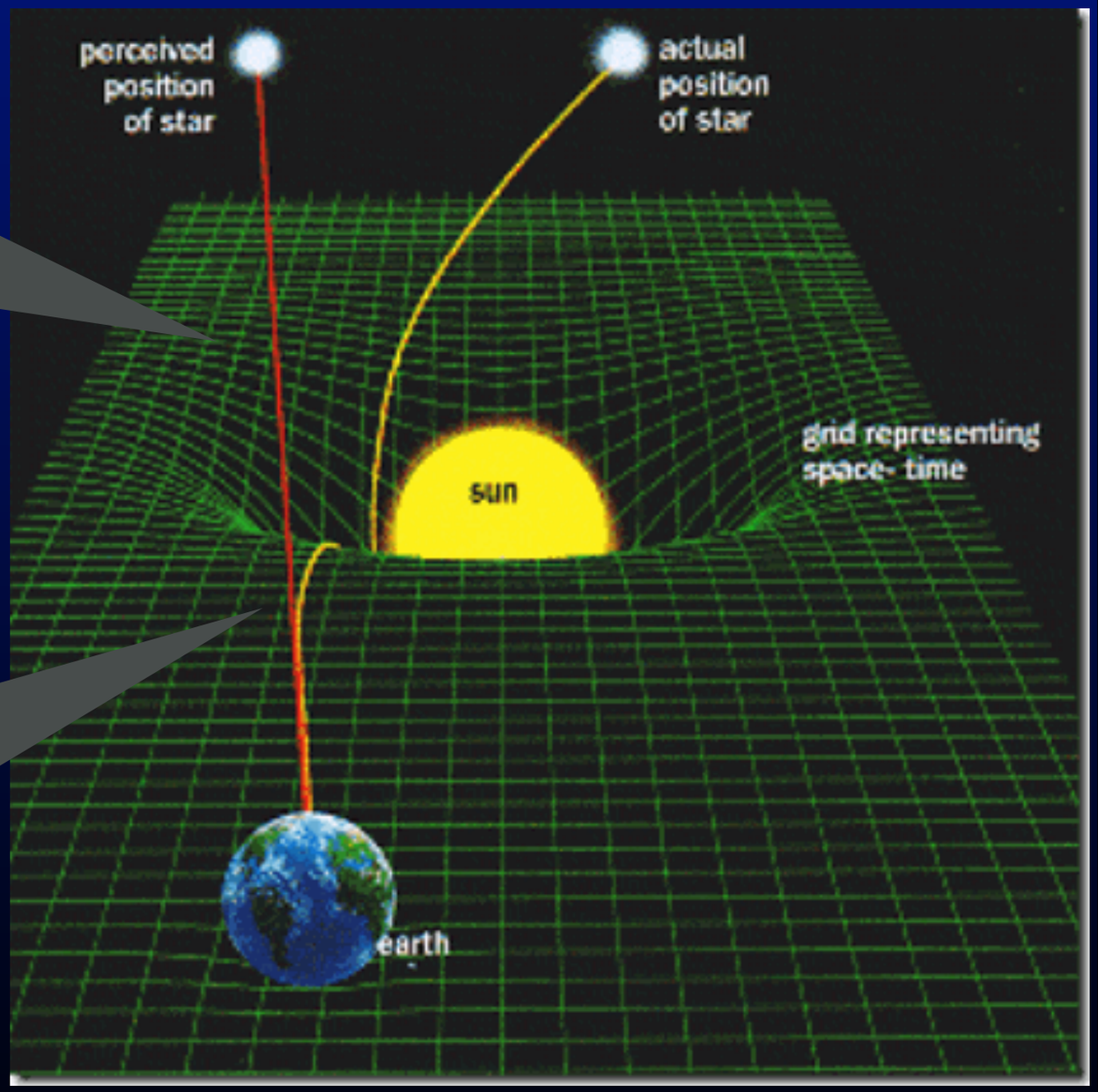
CONSEGUENZA: PRECESSIONE DELLE ORBITE

Le orbite dei pianeti intorno al Sole sono aperte



DEFLESSIONE DELLA LUCE

La luce viene deviata per entrambi gli effetti di contrazione spaziale e dilatazione temporale



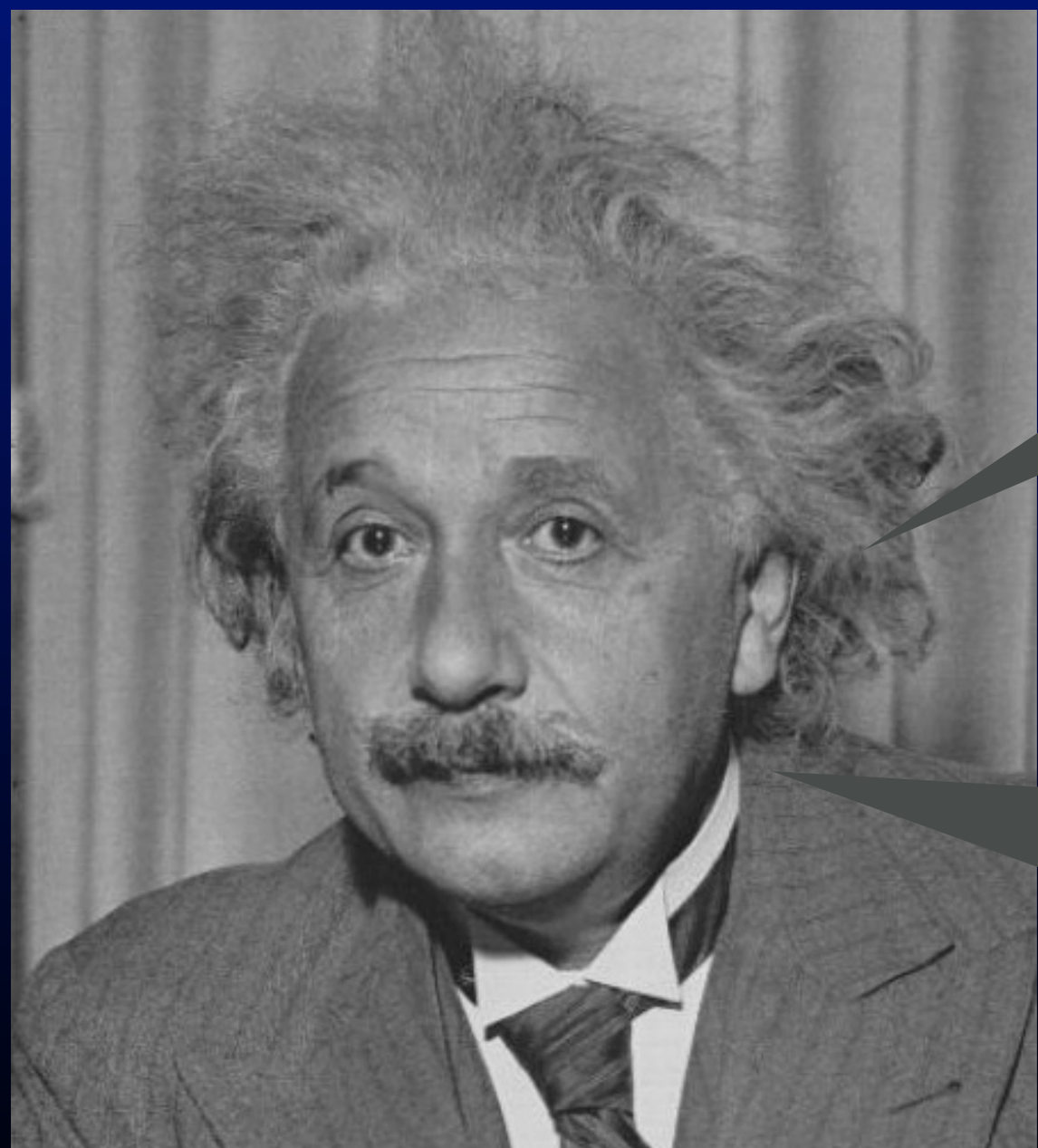
Vicino al Sole la deviazione è circa 1/1000 il suo diametro angolare.

LENSING GRAVITAZIONALE

Distorsione delle immagini di sorgenti estese: effetto di ***lente gravitazionale***

Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

PER CONCLUDERE...



La velocità della luce è la stessa in ogni Sistema di Riferimento.

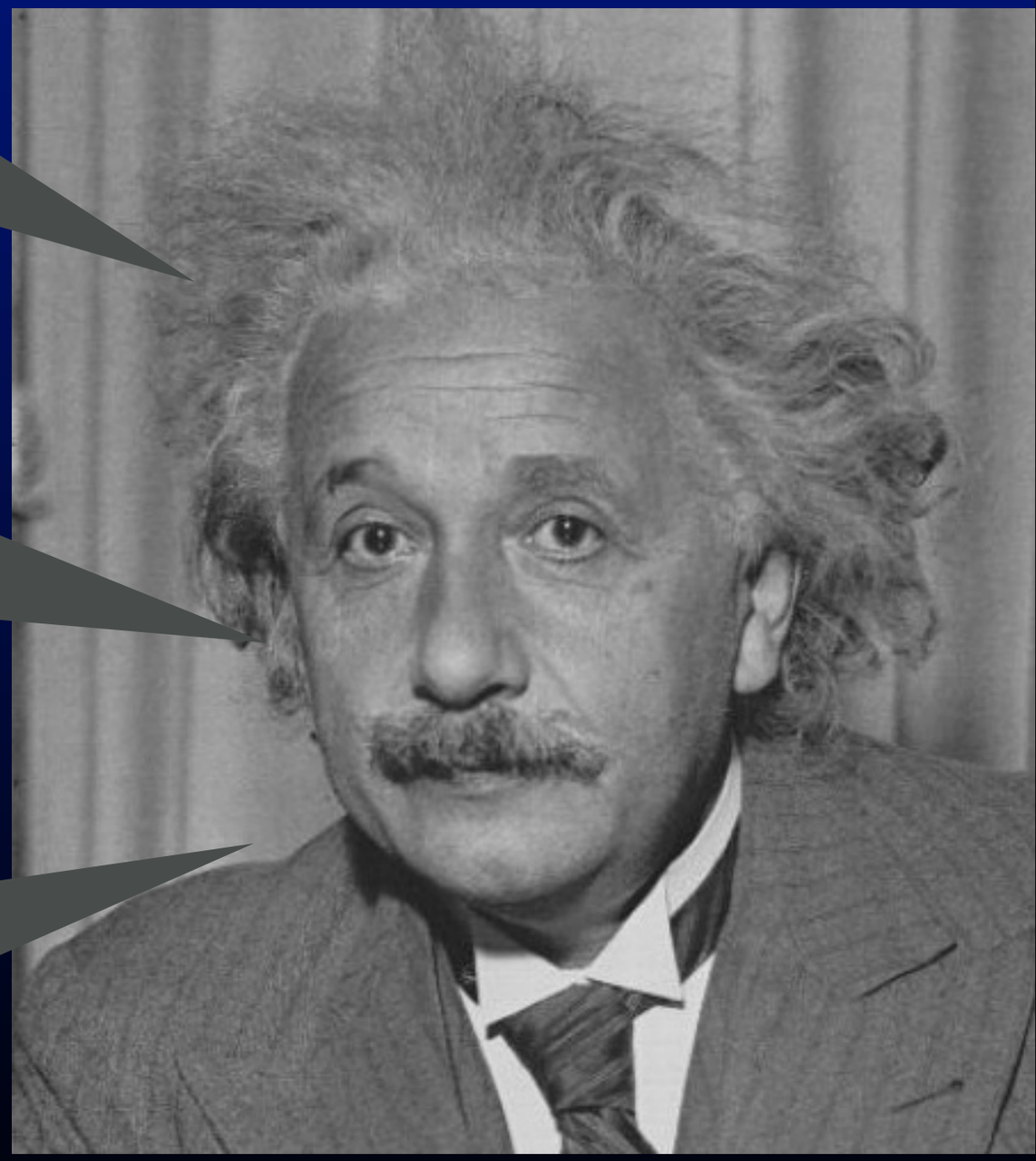
Il moto relativo cambia la simultaneità degli eventi e misure di tempo e di spazio.

PER CONCLUDERE...

La gravità NON è una forza, ma una distorsione dello SPAZIOTEMPO

La presenza di materia rallenta gli orologi e accorcia i metri

La luce cambia colore e direzione, le orbite dei pianeti si avvolgono su se stesse



MA RICORDIAMO…

La scienza costruisce un modello della natura

Il modello rappresenta la realtà fisica (= come se), ma non è la realtà fisica

Il modello usato per descrivere lo spazio e il tempo è cambiato nei secoli: dai Greci, a Copernico, a Newton, ad Einstein

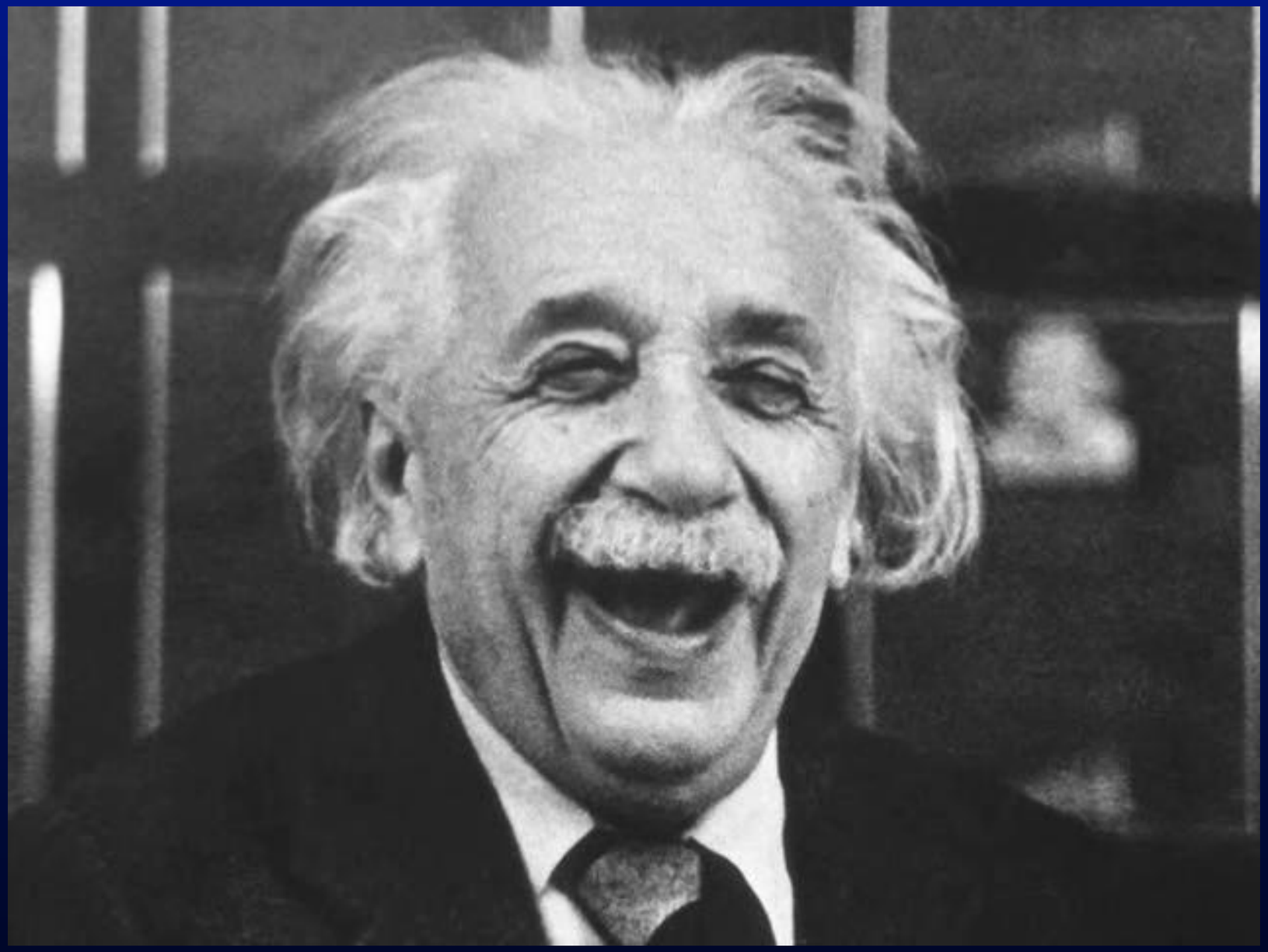
MA RICORDIAMO…

*I modelli sono **relativi!***

presi come assoluti portano a paradossi, equivoci, domande senza risposta scientifica

creano sterili contrasti di pensiero (filosofico, teologico…)

Non confondere il dito con la luna!



“Imparare è un’esperienza.
Tutto il resto è solo informazione”
(A.Einstein)