



Università della Terza Età "Cardinale Giovanni Colombo" – Milano

A.A. 2023 - 2024

Corso di Astrofisica

Docente : **Adriano Gaspani**

Lezione 25

**I viaggi interstellari sono  
possibili?**

Da ricordare, sempre:

**Ciò che non va contro  
le leggi della Fisica è  
realizzabile**



**prima o poi...**

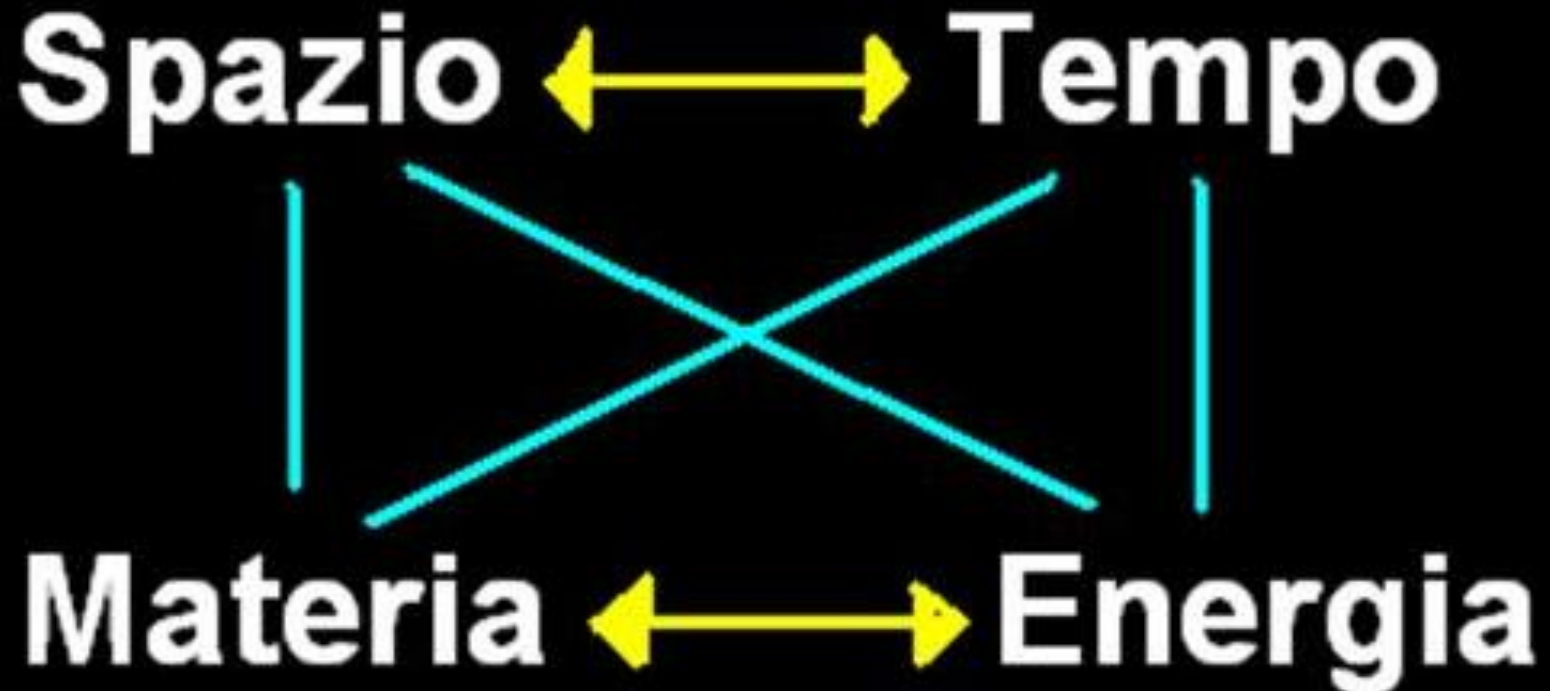
A close-up, slightly low-angle shot of Yoda's face. He has a wrinkled, green complexion and is looking upwards and to the right with a thoughtful expression. The background is dark and out of focus.

**Spazio  
Tempo  
Materia  
Energia**

**4 diversi aspetti della stessa cosa...**



Esiste quindi una corrispondenza  
incrociata tra tutti...



sono legati indissolubilmente...



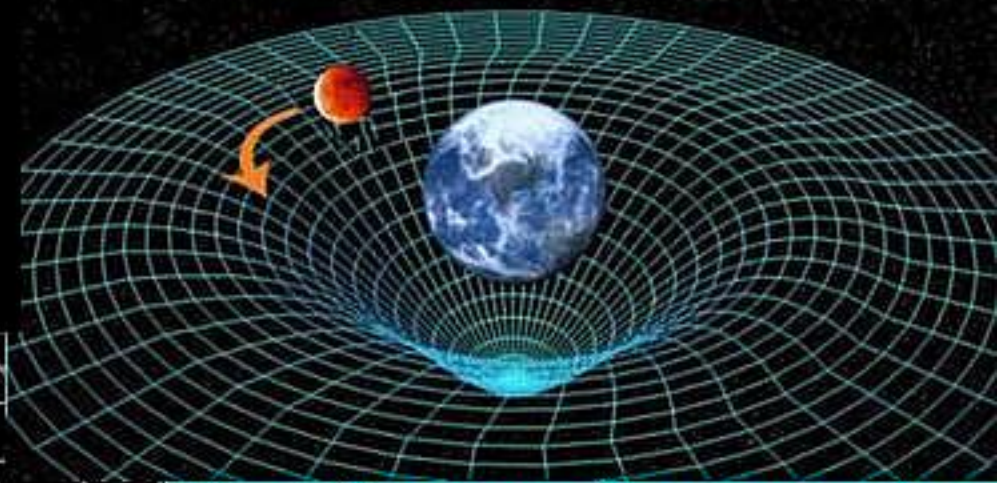
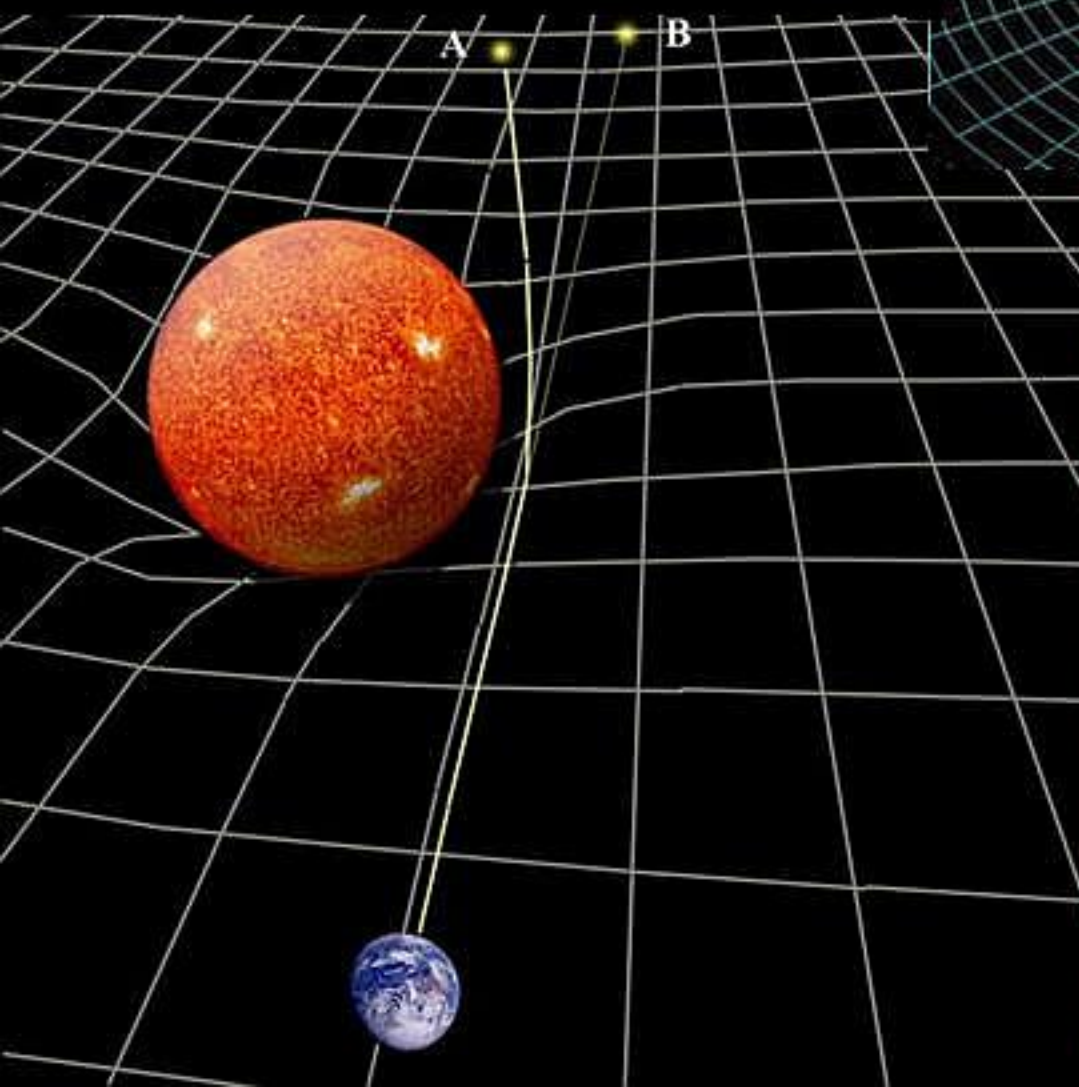
# Massima velocità raggiungibile: la velocità della luce

$$c = 300.000 \text{ Km/sec}$$

tempo di viaggio:

$$T(\text{anni}) = \text{distanza (AL)} / c$$

**Questo tessuto ha la particolarità di deformarsi in presenza di una massa o di un campo gravitazionale.**



**Essendo un continuum spazio-temporale, la sua deformazione, oltre ad essere spaziale, risulta di fatto anche temporale. Più precisamente il tempo risulta scorrere più lento più la deformazione è accentuata: vivere a pianterreno, piuttosto che sulla cima di un grattacielo ci allunga la vita, seppure di qualche microsecondo.**



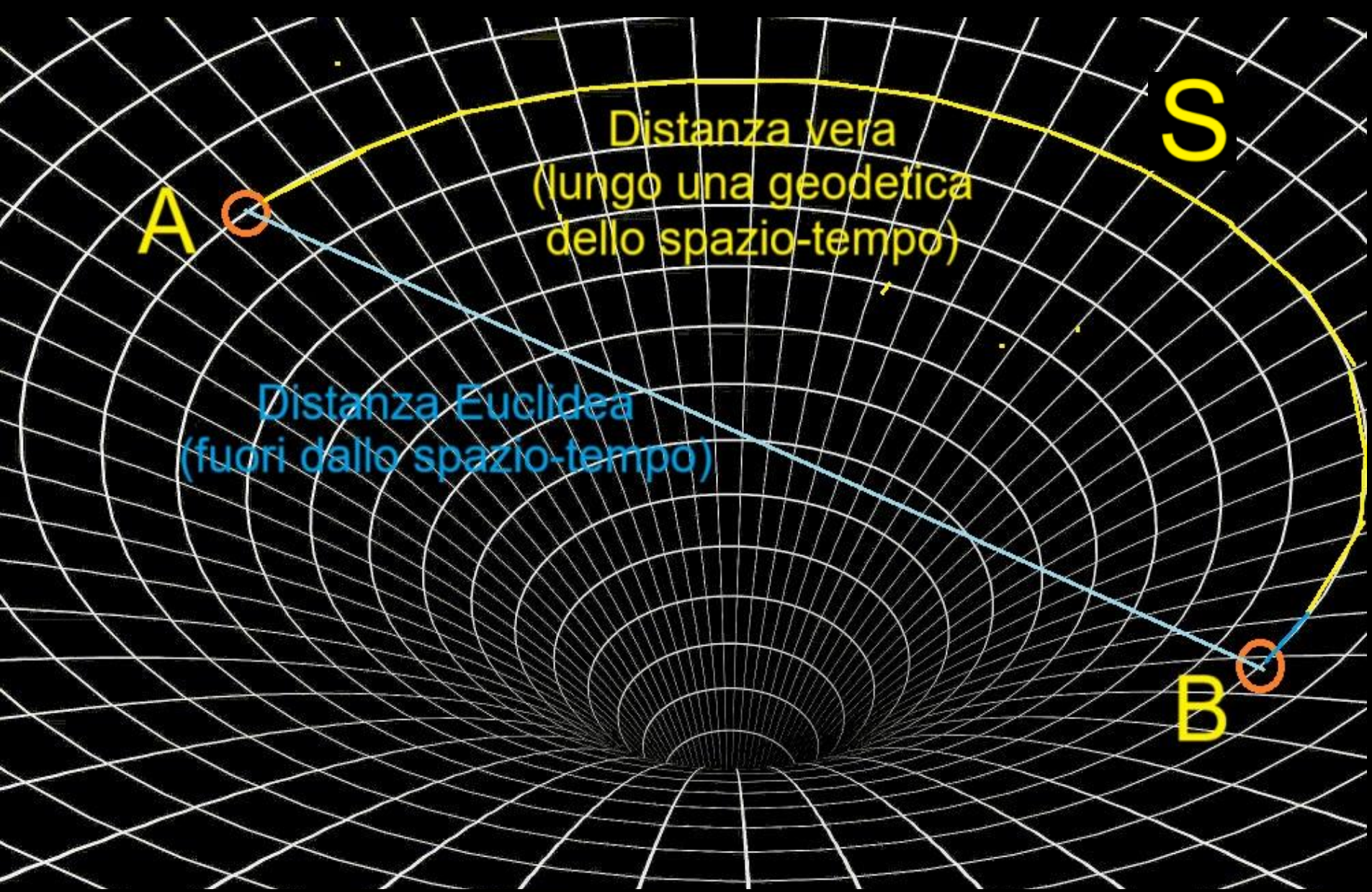
# MOTI NELLO SPAZIO-TEMPO

Lo spazio-tempo della relatività generale ha una geometria non euclidea .

Una massa non soggetta a forze che si trova nello spazio-tempo per il 1° principio della dinamica si muove di moto rettilineo uniforme, ma le “rette” che percorre sono le geodetiche!

**Che possono essere curve...**





Lo spazio-tempo non è euclideo

# Tempo di viaggio:

$$t = S/c$$

S = lunghezza della geodetica da A a B

c = velocità della luce (300000 Km/sec)

...così non si va molto lontano...

# Allora:

...se non si può aumentare la velocità, bisogna accorciare la strada da percorrere...

è possibile sfruttando la geometria dello spazio-tempo e la sua deformabilità



La Teoria della Relatività Generale ci dice che:

- 1) Il campo gravitazionale diminuisce allontanandosi dalla concentrazione di massa.
- 2) La curvatura dello spazio tempo aumenta avvicinandosi alla concentrazione di massa.
- 3) lo scorrere del tempo rallenta avvicinandosi alla concentrazione di massa.

$$t(d) = t(d^{\circ}) \cdot \left( 1 + \frac{2g}{c^2} (d - d^{\circ}) \right)$$

$$\frac{2g}{c^2} = 2.18 \cdot 10^{-16} \text{ secondi/metro}$$

## L'Energia del Vuoto

La densità di energia  $p$  contenuta nello "spazio vuoto" dovuta alle fluttuazioni quantistiche è:

$$p = \frac{I_{\infty} \cdot \hbar \cdot c}{R^4} = 10^9 \text{ Joule/m}^3$$

$I_{\infty}$  = Quantità di informazione contenuta nell'Universo

$\hbar$  = Costante di Plank ridotta

$c$  = Velocità della Luce ( $c=300.000 \text{ Km/sec}$ )

$R$  = Raggio dell'Universo ( $R=13.7 \text{ miliardi di Anni Luce}$ )

**Densità dell'Energia Oscura**

# **Energia oscura** **(esotica, negativa, del vuoto, etc...)**

Nessuno sa cosa sia, ma esiste, e se vogliamo viaggiare nello spazio-tempo arrivando lontano, ci serve...

per ora non sappiamo produrla...

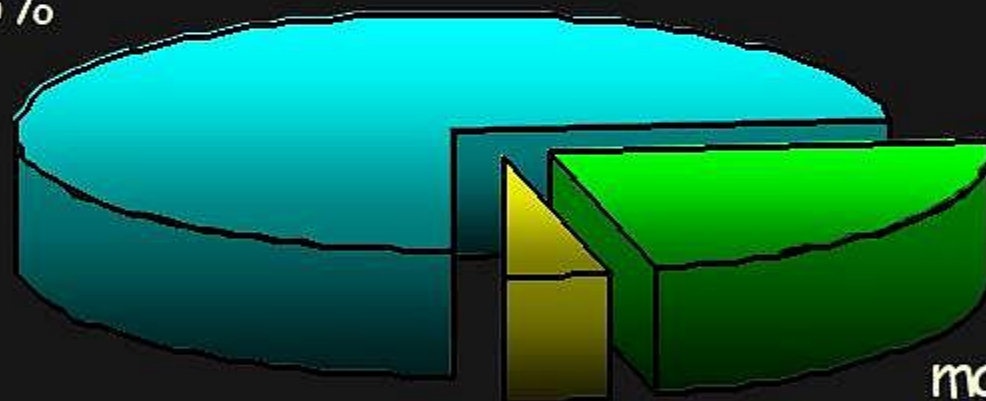
Le fluttuazioni quantistiche la producono...



# Di cosa è fatto l'UNIVERSO?

...per lo meno il nostro

energia  
oscura  
73%



materia  
ord.  
4%

materia  
oscura  
23%

L'espansione dell'Universo  
è dovuta all'Energia Oscura  
(negativa, antigravitazionale)  
che genera lo Spazio-Tempo  
ad una velocità molto superiore  
a quella della luce.

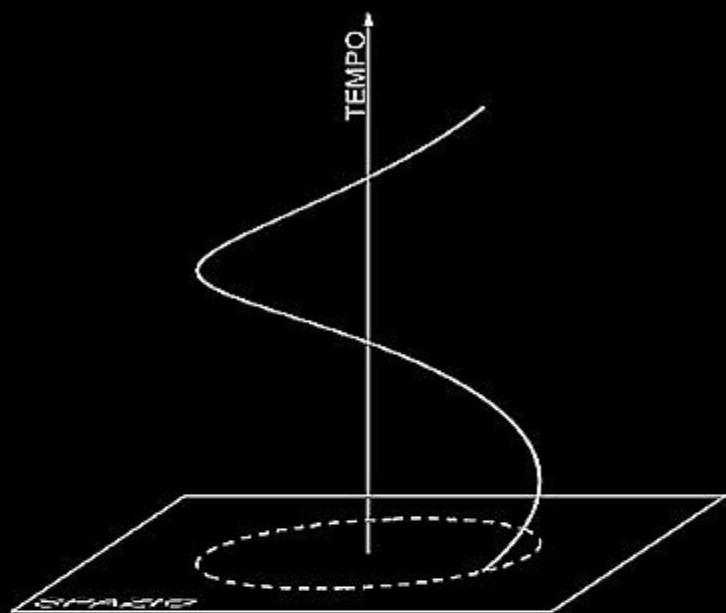
La velocità della luce è finita ed è la massima raggiungibile dalla materia e dall'energia

**Il fatto che la velocità della luce sia finita ( $c=300000$  km/sec) crea un orizzonte cosmologico al tempo  $t$  di età dell'Universo.**

**Il suo raggio è  $R = t$  anni luce**

**Si crea una superficie che racchiude un volume di spazio a cui abbiamo accesso in maniera causale.**



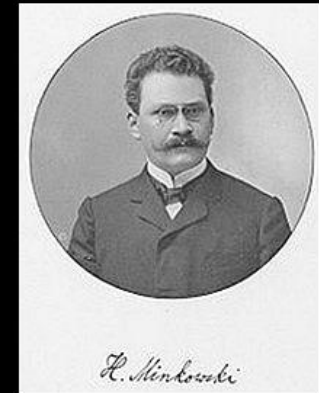


*lo spaziotempo  
di  
Minkowski*

Hermann Minkowski



# Hermann Minkowsky



**Hermann Minkowski** (Aleksotas, 22 giugno 1864 – Gottinga, 12 gennaio 1909) è stato un matematico lituano. Egli sviluppò la teoria geometrica dei numeri ed utilizzò metodi geometrici per risolvere impegnativi problemi della teoria dei numeri, della fisica matematica e della teoria della relatività.

Nel 1907 Minkowski giunse al convincimento che la teoria della relatività speciale (conosciuta anche come relatività ristretta), introdotta da Einstein nel 1905 e basata su precedenti lavori di Lorentz e di Poincaré, potesse essere meglio compresa nell'ambito di uno spazio non euclideo, da allora noto come spazio di Minkowski, in cui il tempo e lo spazio non sono entità separate ma connesse fra loro in uno spazio-tempo quadridimensionale, e nel quale la geometria di Lorentz della relatività ristretta può essere opportunamente rappresentata. Tale rappresentazione risultò utile e senz'altro aiutò le indagini di Einstein in merito alla relatività generale.

La parte iniziale del suo discorso pronunciato in occasione dell'ottantesima Assemblea degli Scienziati della Natura e dei Medici Tedeschi (21 settembre, 1908) è divenuta famosa:

*« I concetti di spazio e di tempo che desidero esporvi traggono origine dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò risiede la loro forza. Sono radicali. D'ora in avanti lo spazio singolarmente inteso, ed il tempo singolarmente inteso, sono destinati a svanire in nient'altro che ombre, e solo una connessione dei due potrà preservare una realtà indipendente. »*



## Spaziotempo di Minkowski

Minkowski, che era stato un insegnante di Einstein, si accorge che la Relatività dimostra che lo spazio ed il tempo sono uniti in uno *spaziotempo* quadridimensionale.

Un **evento** è qualunque cosa accada in un dato luogo e in un dato istante.

Possiamo caratterizzarlo con le tre coordinate spaziali che indicano *dove* ha avuto luogo, associate alla coordinata temporale che indica *quando* si è verificato.

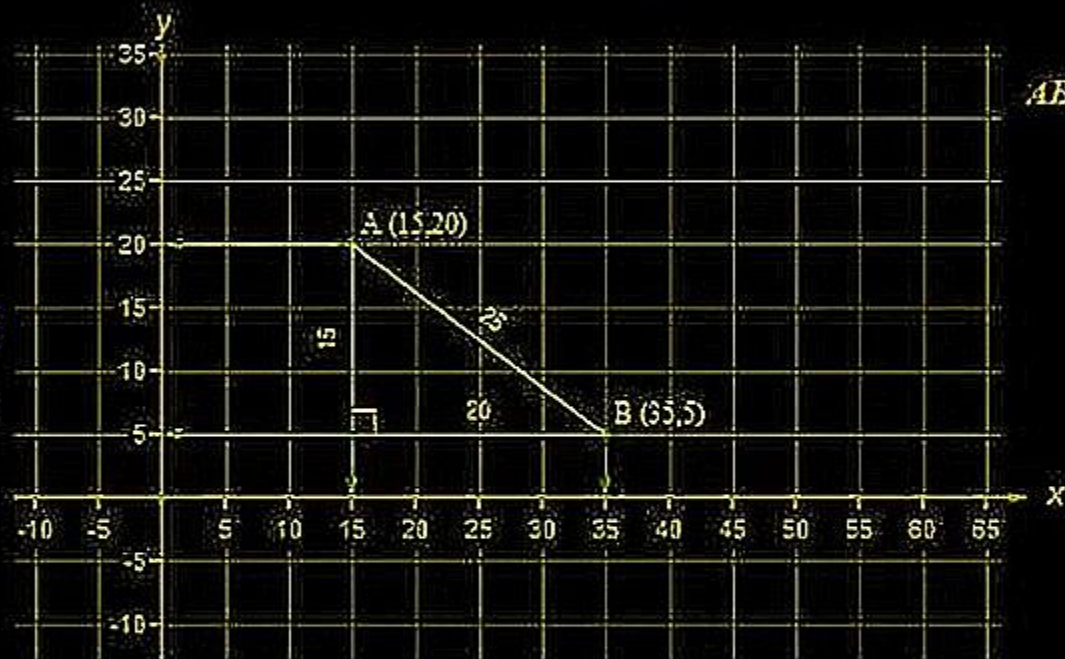
Usiamo i simboli  $x$ ,  $y$ ,  $z$  per indicare le tre coordinate spaziali e la variabile  $t$  per indicare quella temporale.

Un evento è univocamente determinato dalla quaterna  $(x, y, z, t)$ .



## Distanza tra due punti

La distanza tra i punti A e B è data dalla formula:



$$AB = \sqrt{20.0^2 + 15.0^2}$$
$$= 25.0$$

$$d = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (2 \text{ dimensioni})$$

$$d = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 + (t_B - t_A)^2} \quad (4 \text{ dimensioni})$$

## Spaziotempo di Minkowski – Intervallo

Sappiamo che i punti della geometria quadridimensionale di Minkowski si chiamano eventi. La distanza tra due eventi A e B si chiama **intervallo** e qui lo indichiamo con  $d$ :

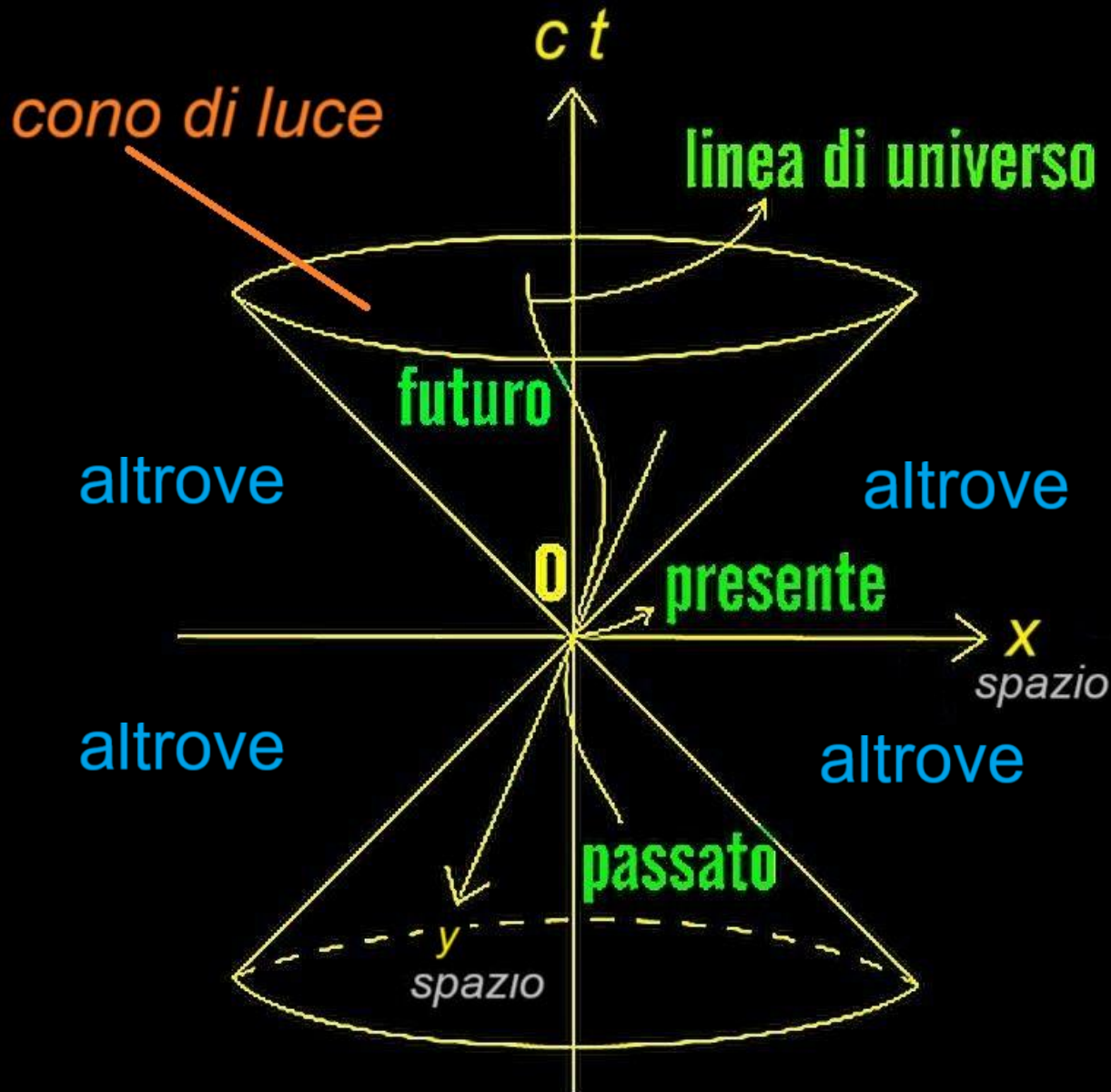
$$d^2 = c^2(t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 - (y_B - y_A)^2 - (z_B - z_A)^2$$

Questo valore è una **invariante** per qualsiasi osservatore inerziale. E' l'analogo della distanza euclidea, ma confrontandolo con la diapositiva precedente, si vede che è diverso, a causa della comparsa del segno "-".

La geometria di Minkowski è *pseudo-euclidea*.

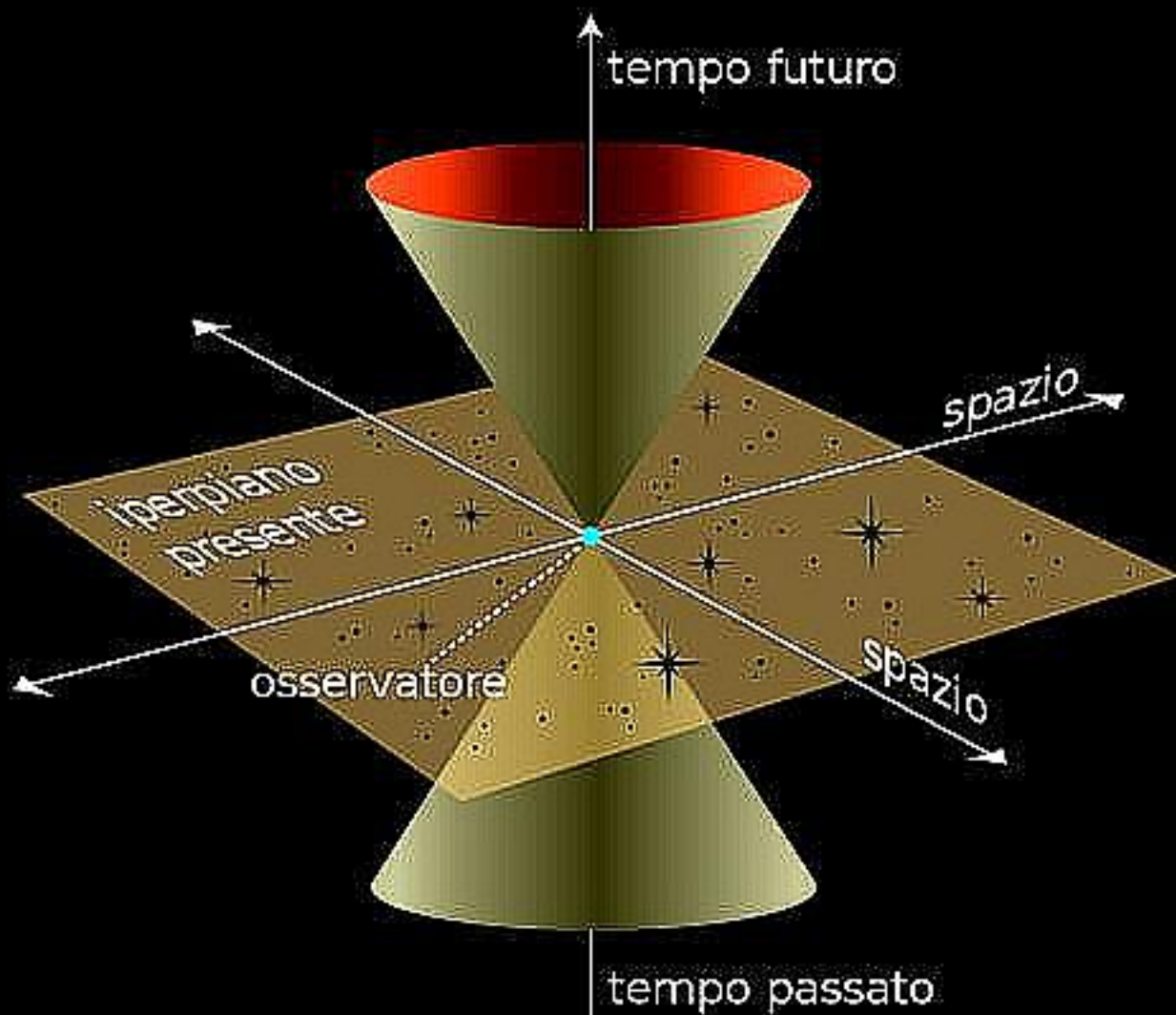
Non è uno spazio curvo

# lo spaziotempo di Minkowski



$c$  = velocità della luce  
 $t$  = tempo  
 $x$  = spazio  
 $y$  = spazio

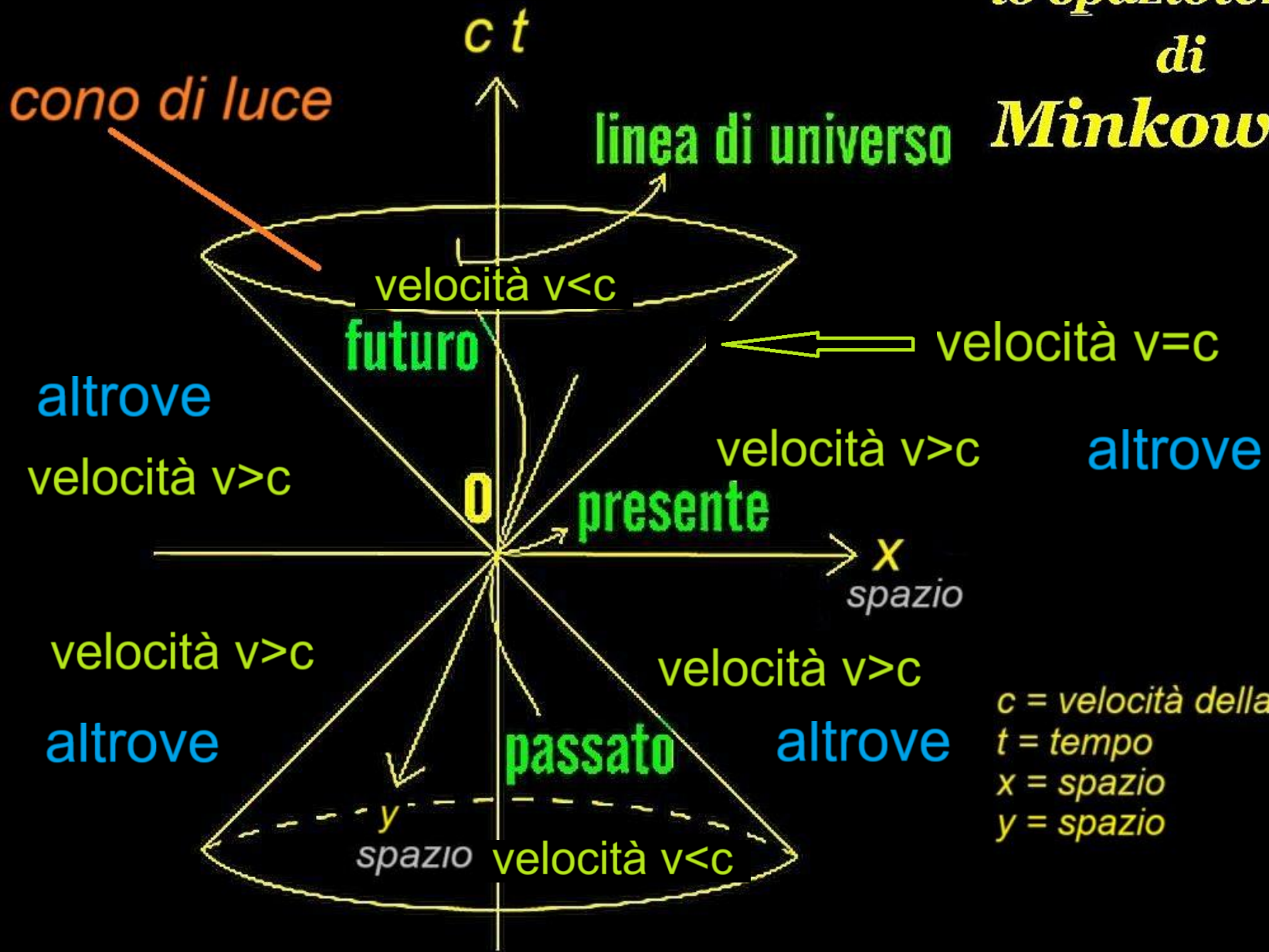




**Un cono di luce rappresenta la storia di un qualunque oggetto nel nostro universo: il punto di incontro dei due coni è la posizione spazio temporale dell'istante presente. Il cono superiore rappresenta la gamma di possibili storie che l'oggetto avrà. Il cono inferiore rappresenta la gamma delle storie che la particella ha avuto per giungere in tale istante a tale posizione.**

I coni hanno un'inclinazione di  $45^\circ$  in quanto i fotoni, le particelle più veloci che si conoscano rappresentano il limite massimo entro il quale tutte le particelle possono muoversi. Preso un comodo sistema di riferimenti il moto dei fotoni viene rappresentato come una retta a  $45^\circ$ , quindi la gamma massima di possibili spostamenti deve risultare inferiore a tale angolazione.

*lo spaziotempo  
di  
Minkowski*



$c$  = velocità della luce  
 $t$  = tempo  
 $x$  = spazio  
 $y$  = spazio



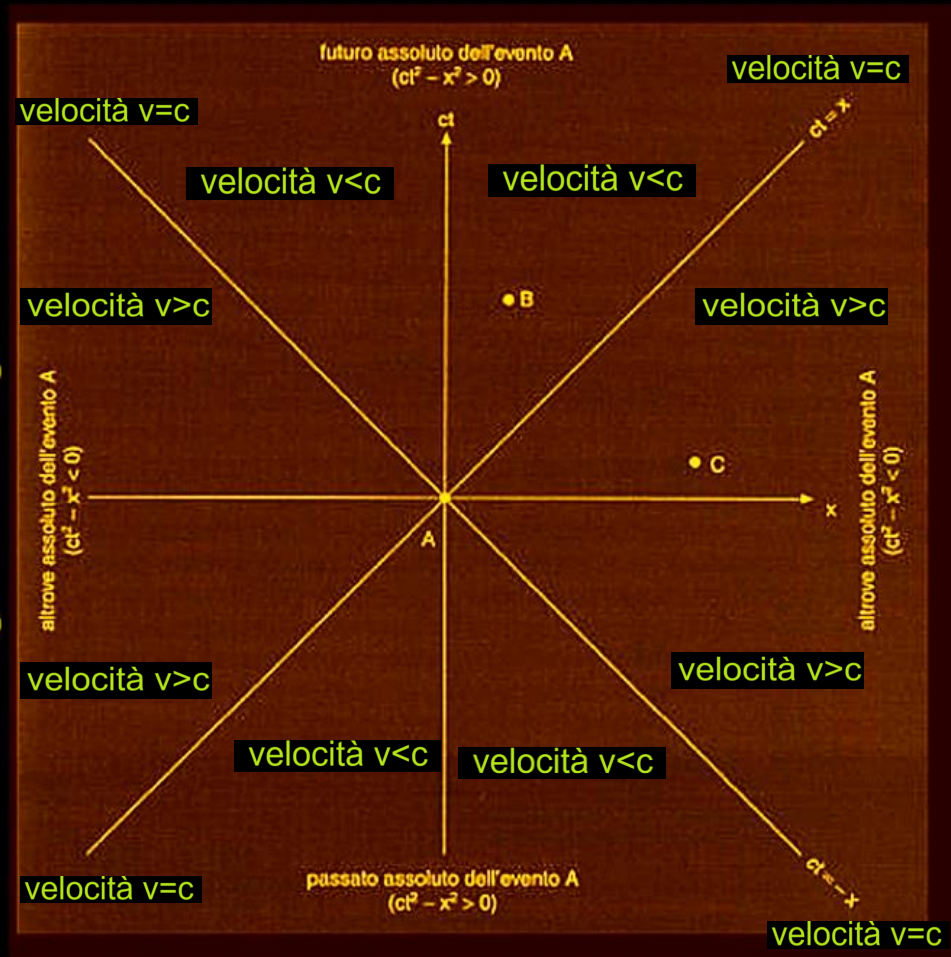
# Intervalli tra eventi

## Cono di Luce

Per comodità, è raffigurata una sola dimensione spaziale.

A e B sono eventi separati da un intervallo di genere tempo.

A e C sono eventi separati da un intervallo di genere spazio.





## Classificazione degli intervalli

Il quadrato dell'intervallo (che è indipendente dal sistema di riferimento) può essere:

- **Nulla:** l'intervallo è detto di **tipo luce**
- **Positivo:** l'intervallo è detto di **tipo tempo**.

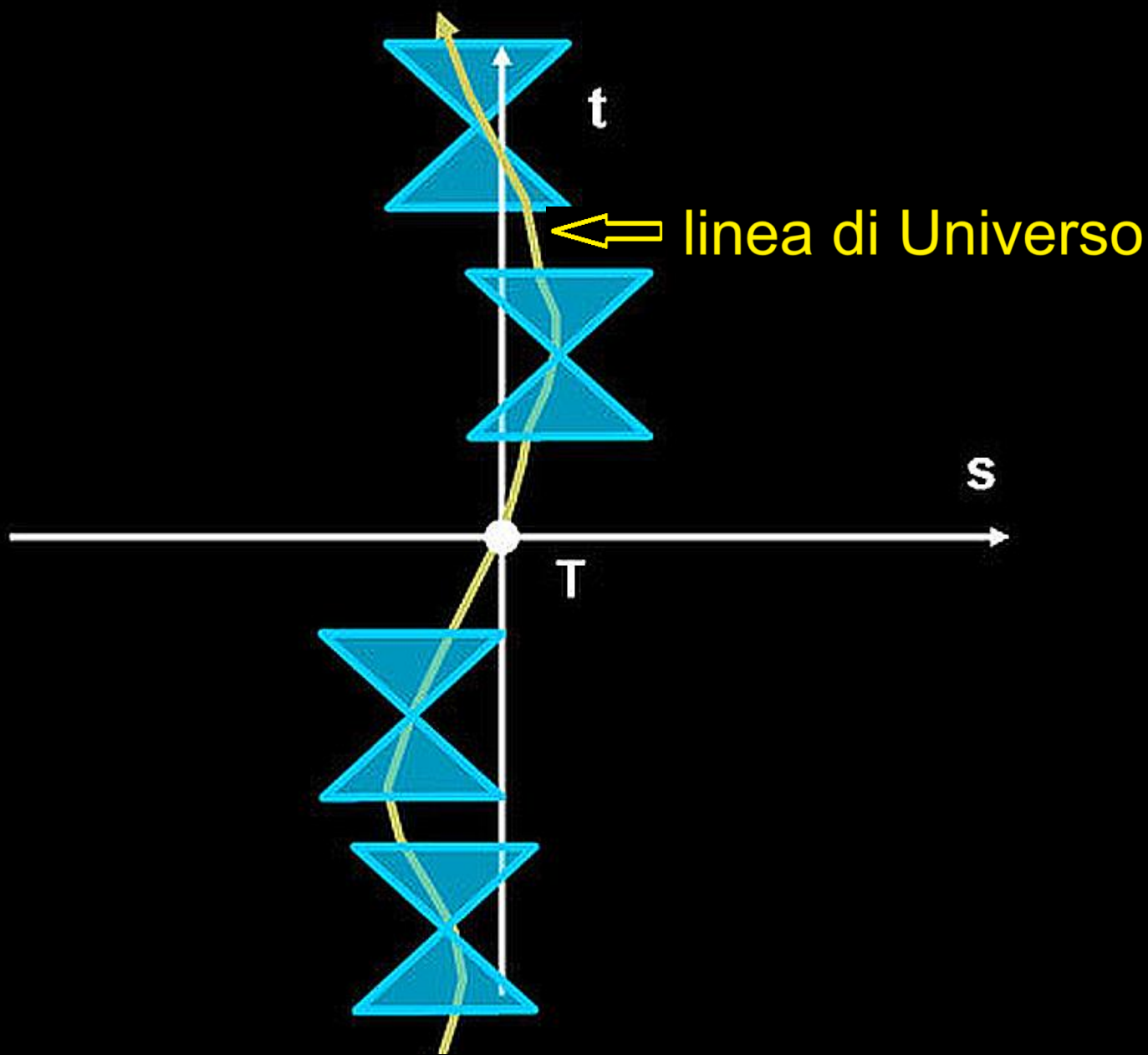
È il caso di due eventi separati spazialmente nel sistema  $S$ ; si trova che esiste un sistema  $S'$  in cui i due eventi occupano la stessa posizione nello spazio. Se i due eventi sono relativi alla stessa particella materiale, l'intervallo tra essi è sempre di tipo tempo.

- **Negativo:** l'intervallo è detto di **tipo spazio**.

È il caso di due eventi che avvengono in istanti differenti nel sistema  $S$ ; si trova che esiste un sistema  $S'$  in cui i due eventi avvengono simultaneamente.

## Cono di Luce: commenti

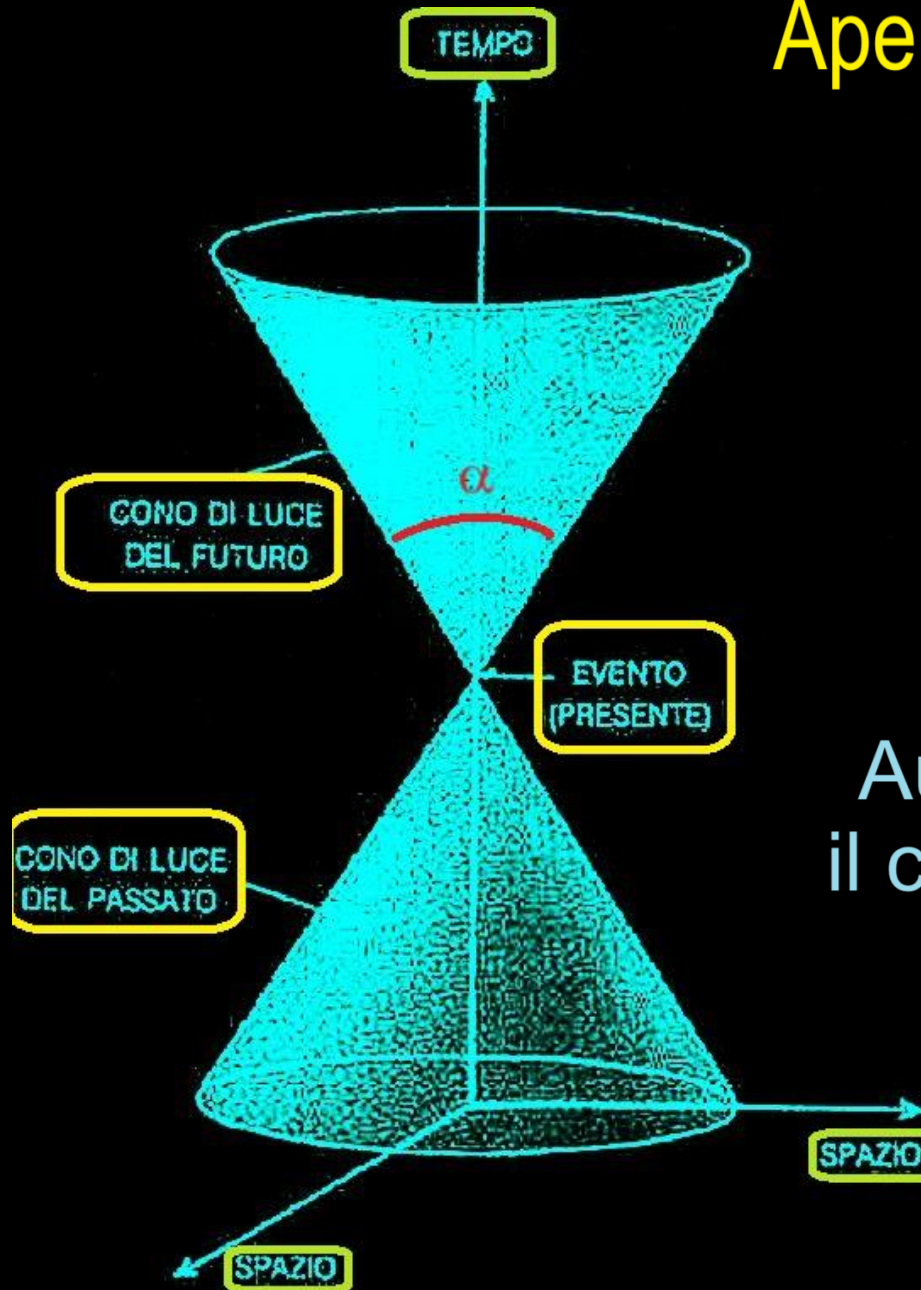
- Tutti gli eventi *interni* al cono luce e corrispondenti a istanti successivi a quello di A costituiscono il **futuro assoluto** di A, qualsiasi sia il sistema di riferimento inerziale. Esiste però un sistema di riferimento in cui i due eventi occupano lo stesso punto dello *spazio*.
- Tutti gli eventi *esterni* al cono luce costituiscono l'**altrove assoluto** di A. Questi eventi rimangono, in qualsiasi sistema di riferimento, in punti dello spazio diversi da A. Non esiste alcun sistema nel quale uno di tali eventi coincida spazialmente con l'evento A. Però esistono dei sistemi nei quali esso è successivo ad A, oppure esso precede A, oppure esso accade simultaneamente ad A.
- Il confine del cono è costituito dai raggi di luce che partono da A o arrivano in A.





# Apertura del Cono di Luce

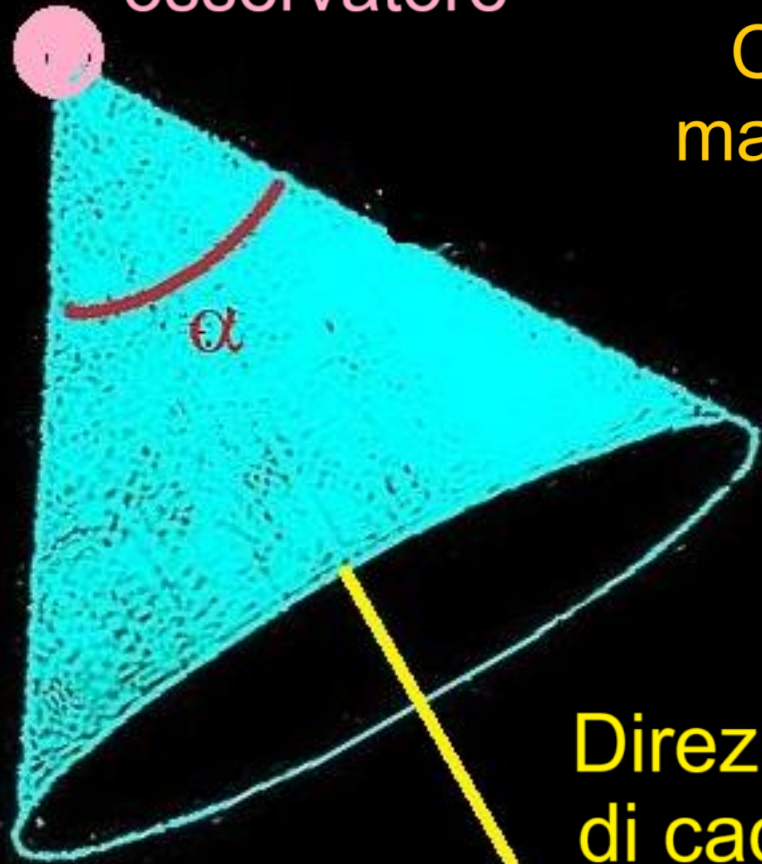
$$\alpha = \cos(v/c)$$



Aumentando la velocità  
il cono di luce si stringe...

osservatore

Caduta libera verso una  
massa  $M$  a causa della sua  
gravità



$$v = v_0 + gt$$

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

$$\alpha = \cos(v/c)$$

- Einstein sa che dalle equazioni di Maxwell si può ricavare la velocità della luce:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

e che tale valore è una *costante*;  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  sono delle costanti che descrivono le proprietà elettromagnetiche del vuoto.

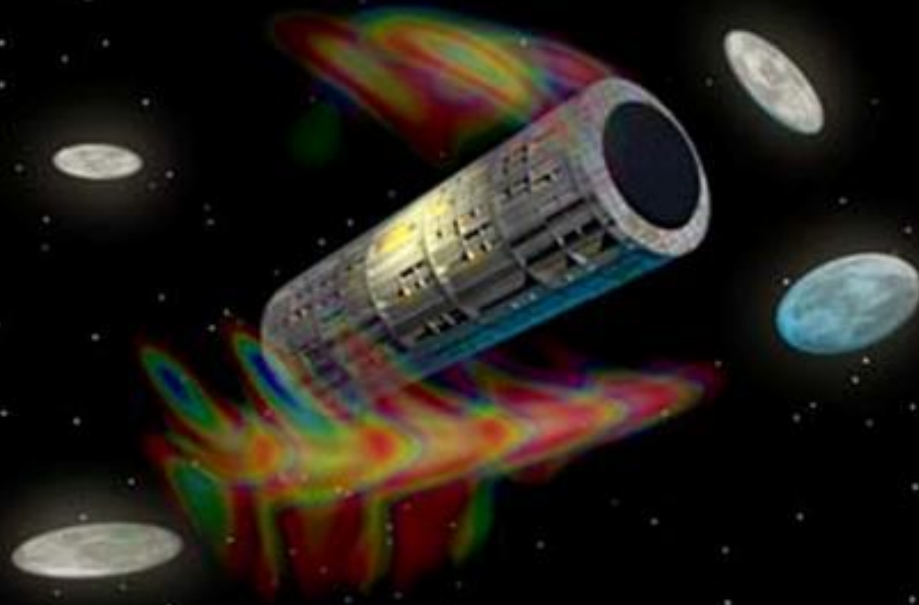
- Per il principio di relatività, tutti gli osservatori inerziali devono misurare questa stessa velocità per la luce, indipendentemente dalla loro velocità relativa.
- Pertanto le trasformazioni di Galileo, che consentono di sommare la velocità della luce a quella di un sistema di riferimento, sono *sbagliate*.



# Viaggiare avanti e indietro nel tempo

Introduciamo il concetto di cono di luce come premessa ad un'ultima teoria che renderebbe possibile il viaggio nel tempo. Tale teoria risulta la più realisticamente effettuabile e non presenta i problemi di velocità luminale o di attraversamento di buchi neri.

Tale teoria si conforma perfettamente alla relatività generale ed è rappresentata dal **cilindro di Tipler**. Un cilindro molto denso e di lunghezza infinita permetterebbe la formazione di cappi temporali in modo da poter collegare due eventi qualsiasi dello spazio tempo, a patto che la superficie del cilindro ruotasse a una velocità pari almeno a metà di quella della luce in modo che la velocità di rotazione fosse tale che le forze centrifughe bilanciassero l'attrazione gravitazionale.



E' possibile andare nel futuro?

Si !!

basta andare veloci, molto veloci...



Il paradosso dei gemelli...



**(Teoria della Relatività Ristretta)**

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

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



Astronave a velocità  $v$   
vicina a quella della  
luce

Esempio:  $v = 0.8 c \rightarrow 1/\gamma = 0.6$



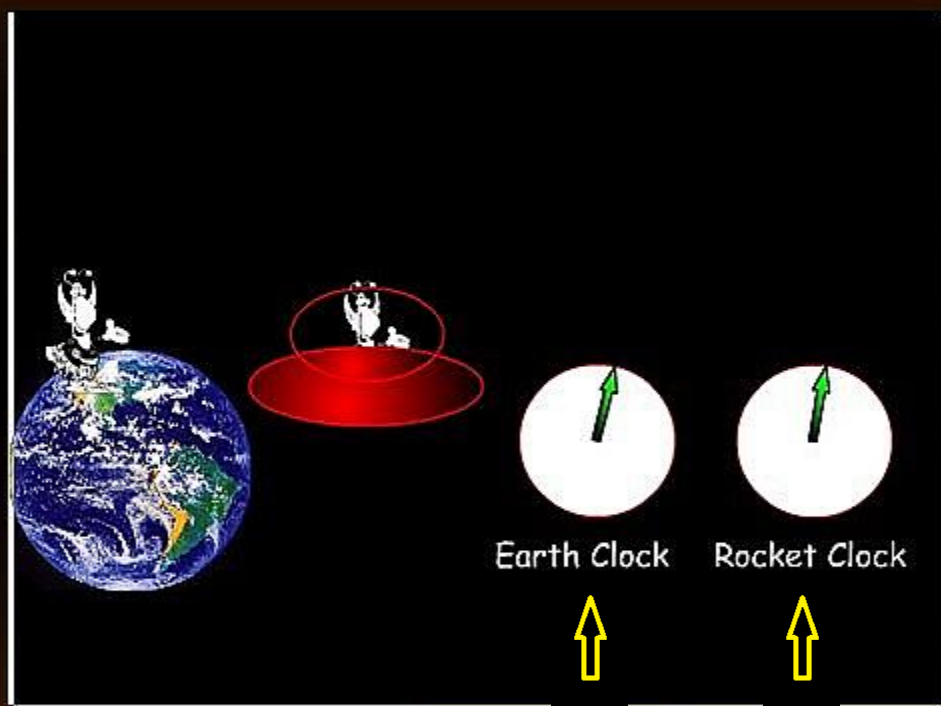
Sul sistema in movimento il tempo scorre al  
60% del tempo nel sistema in quiete



# DILATAZIONE DEL TEMPO

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

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



Orologio dell'osservatore a terra ( $t$ )

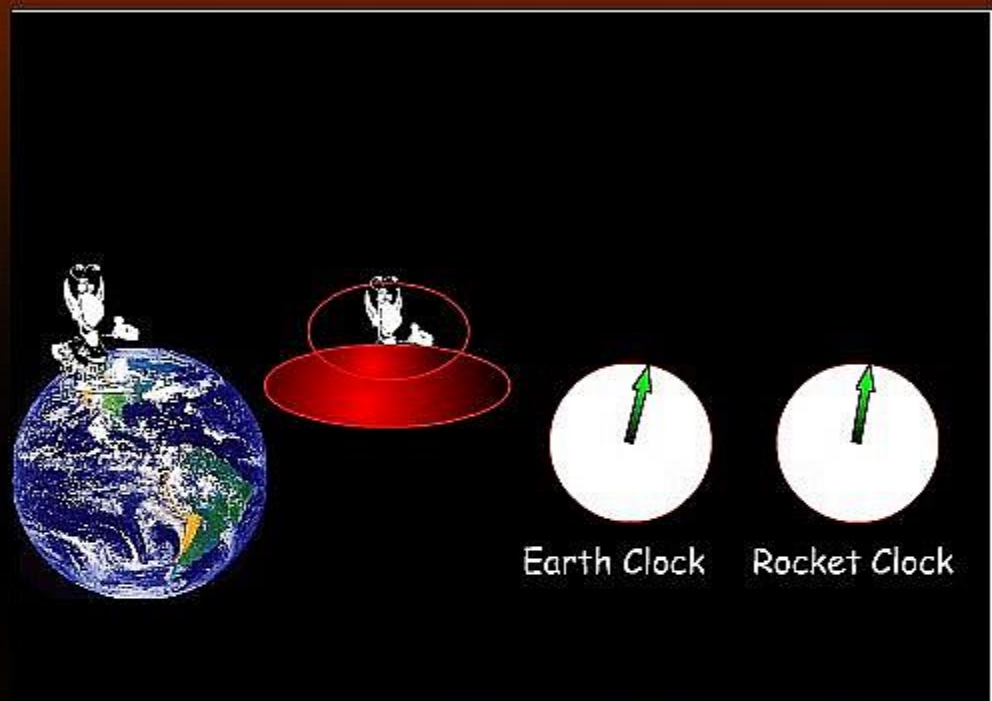
Orologio dell'osservatore sull'astronave ( $t'$ )

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

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



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. ( $v/c = 2,566 E-5$ )

Con  $v/c=0,991$  avremmo avuto:

- Orologio a terra = 365 di (1di = 1 giorno)
- Orologio nella MIR = 48 di (ritardo= 317 di)

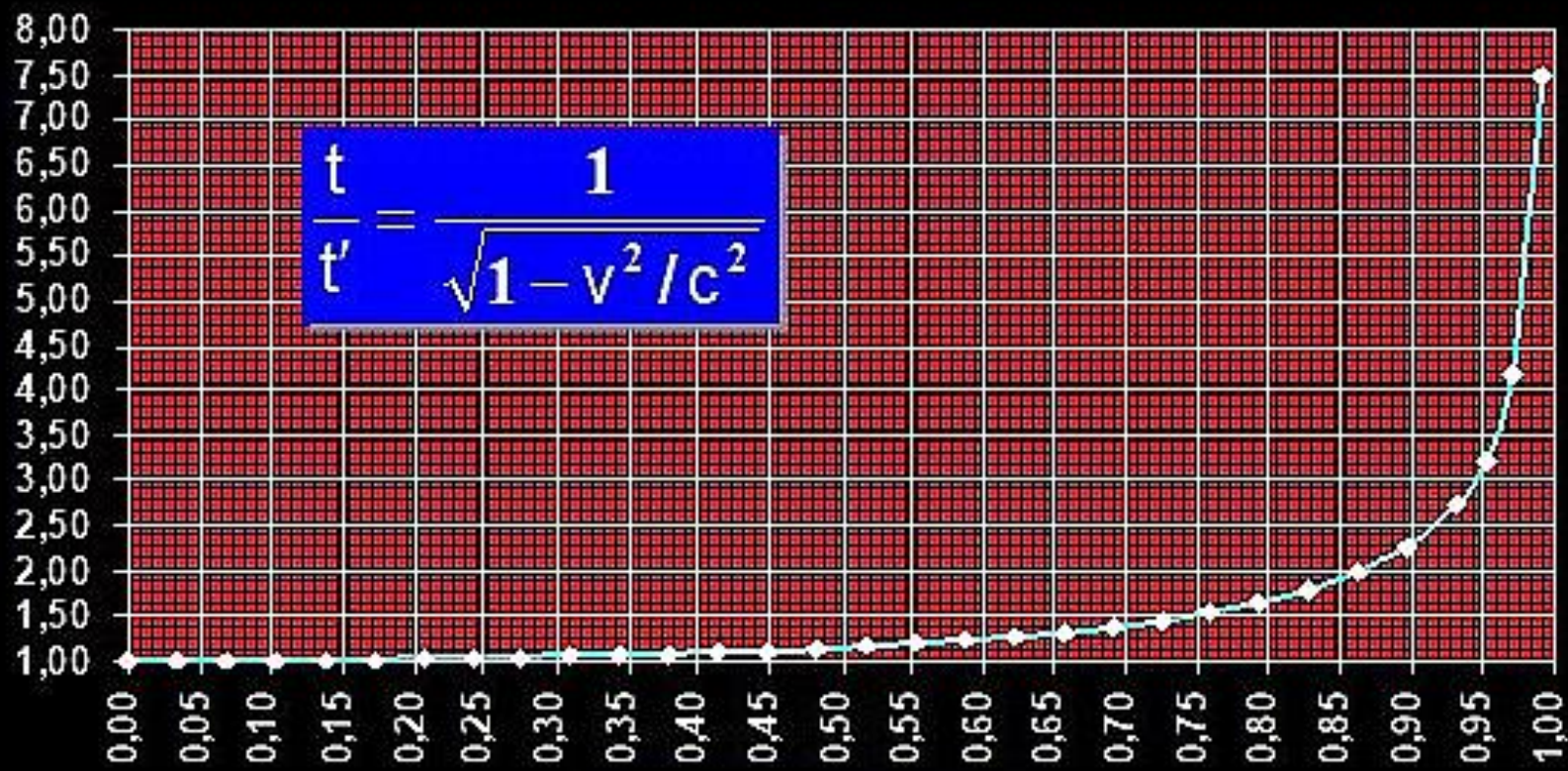
Rapporto $v/c$	Velocità in (Km/s)	Orologio a terra (di)	Orologio astronave (di)
0	-	365,0	365,0
2,56667E-05	7,7	365,0	365,0
0,068965517	20.690	365,0	364,1
0,103448276	31.034	365,0	363,0
0,137931034	41.379	365,0	361,5
0,172413793	51.724	365,0	359,5
0,206896552	62.069	365,0	357,1
0,24137931	72.414	365,0	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 $t/t'$ IN FUNZIONE DEL RAPPORTO $V/c$

Dilatazione del tempo =  $t/t'$

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

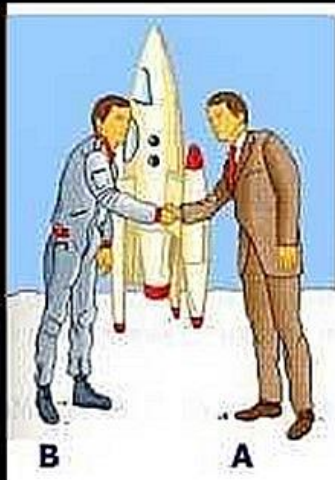


Rapporto velocità  $V/c$





# Il paradosso dei gemelli...



- ❖ Supponiamo che vi siano due gemelli, che chiameremo A e B, di cui uno, mettiamo B, un giorno, parte per un viaggio spaziale alla velocità  $V=9/10 \cdot C$ ;
- ❖ B, che viaggia a una velocità prossima a quella della luce, secondo i suoi orologi sull'astronave misura un tempo proprio, supponiamo, di **10 anni**.
- ❖ Per il fratello A, che è rimasto a terra, i suoi orologi misurano un tempo dilatato pari a  $DT' = DT / \sqrt{1-v^2/C^2}$ . A conti fatti gli orologi di A misurano un tempo pari a **23 anni**;

Tutto questo farebbe presagire che in un eventuale ritorno del fratello astronauta (B), troverebbe il fratello gemello (A) più vecchio di 13 anni.



*B ha viaggiato nel futuro, tornando a casa e trovandosi 13 anni più avanti...*

# 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.

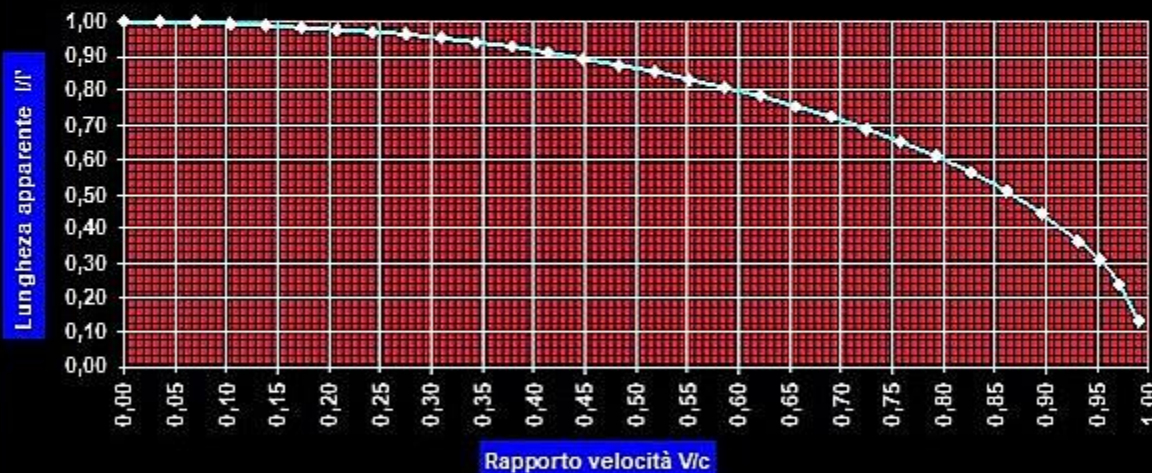


# CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

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



LUNGEZZA RELATIVISTICA IN FUNZIONE  
DEL RAPPORTO v/c



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.



# 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.

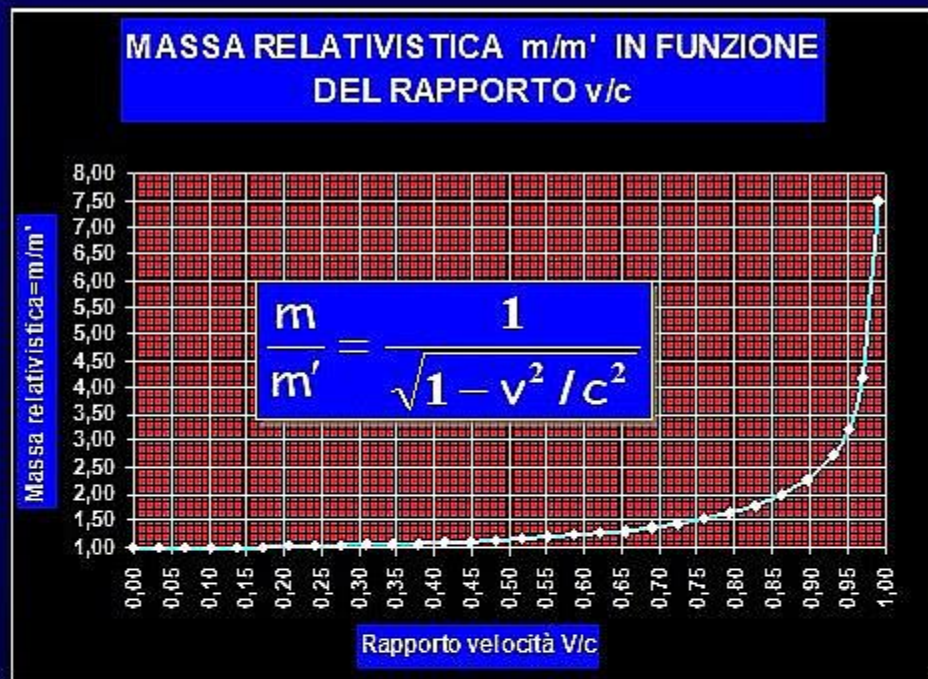
E per questo motivo **che non possiamo viaggiare alla velocità della luce e tanto meno oltre!!**



# 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:

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

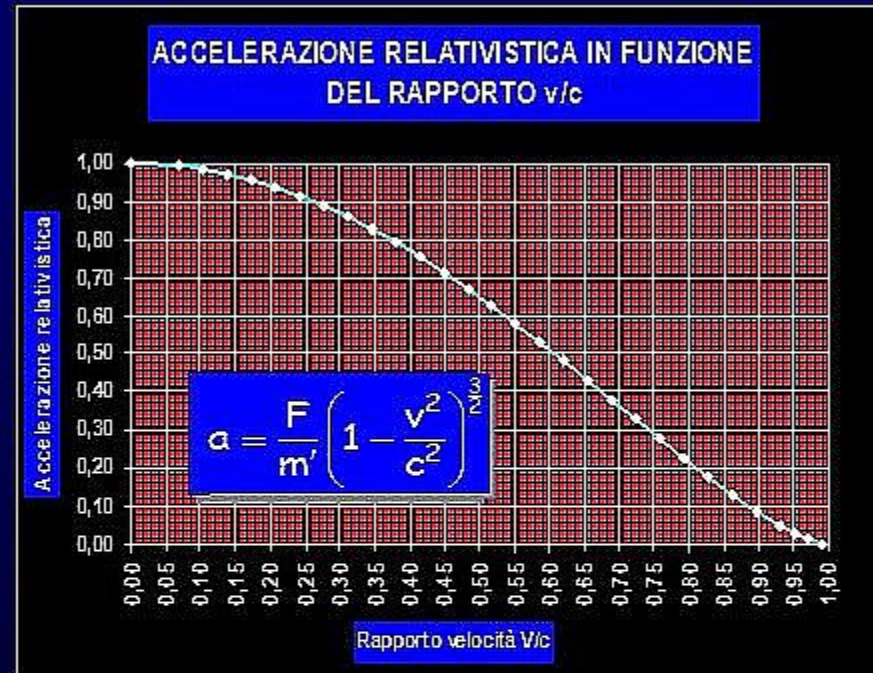
**Einstein**, calcola **a** con la seguente relazione:

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

# 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 illustrates the relativistic energy equation:  $E_k = \frac{m'c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m'c^2$ . The terms are labeled as follows:

- $E_k$ : Energia cinetica relativistica
- $\frac{m'c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ : Energia totale relativistica
- $m'c^2$ : 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

$$F = m a$$

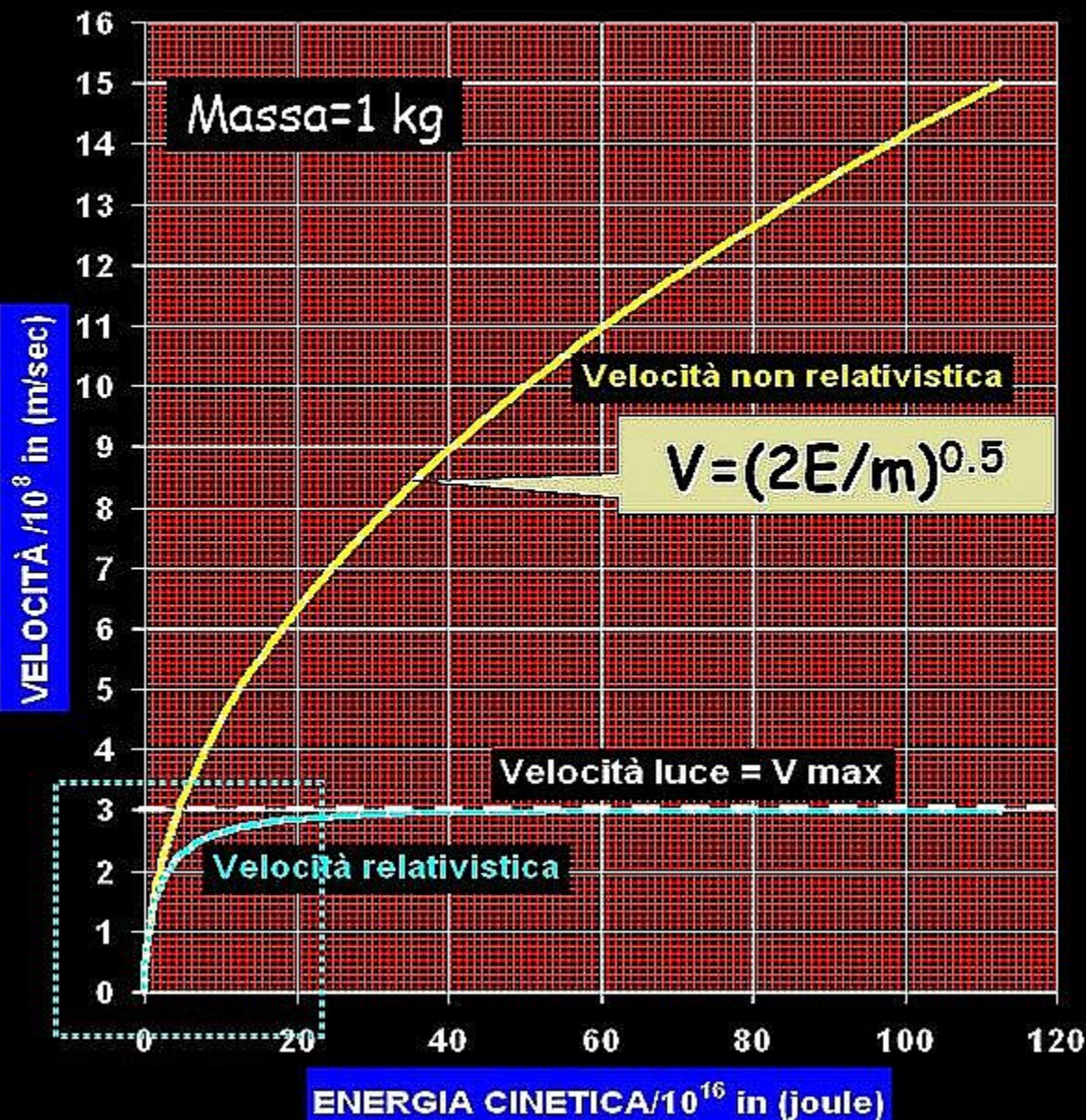
Equazione  
del moto

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

ovvero

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

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

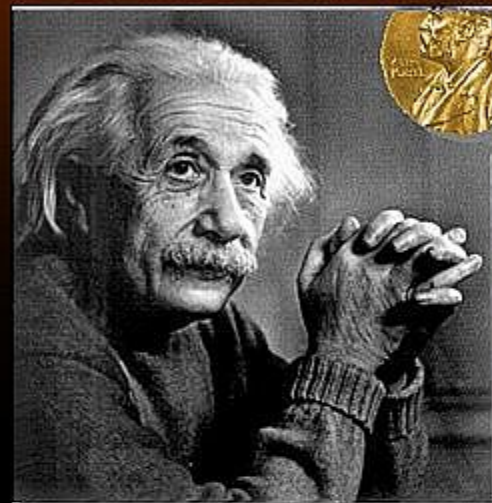
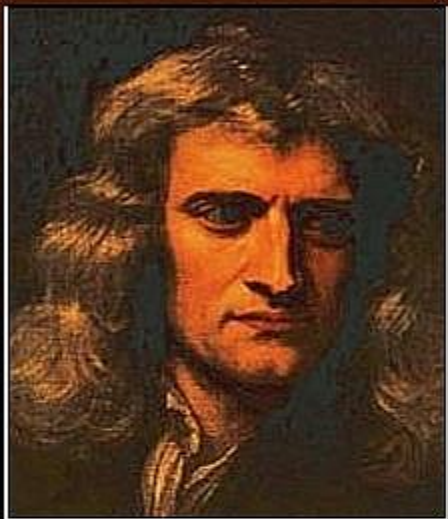




# FISICA CLASSICA

# 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.

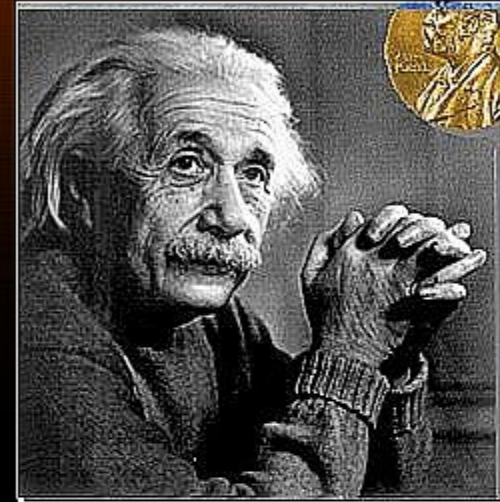
# Questa è la Teoria della relatività!



**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.

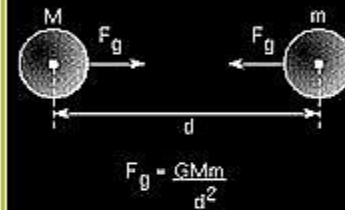


# Newton e Einstein

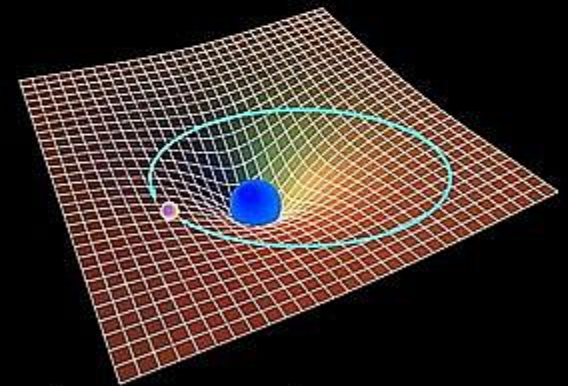
**Newton: gravità è una forza**

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

## GRAVITAZIONE UNIVERSALE



**Einstein: gravità è curvatura**



**CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE  
+  
DILATAZIONE DEI TEMPI**

=

**SPAZIO-TEMPO  
SONO  
ELASTICI**

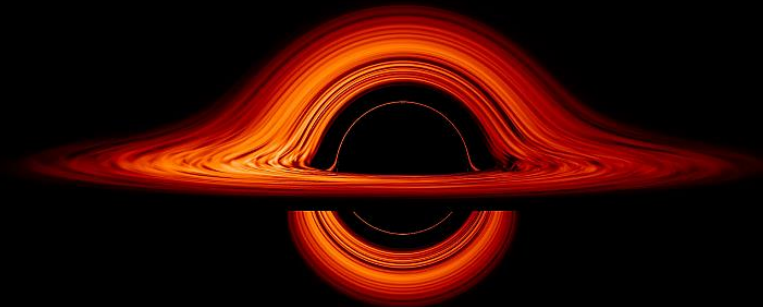
=

**TESSUTO  
IN  
GOMMA**

E' possibile andare nel futuro?

Si !!

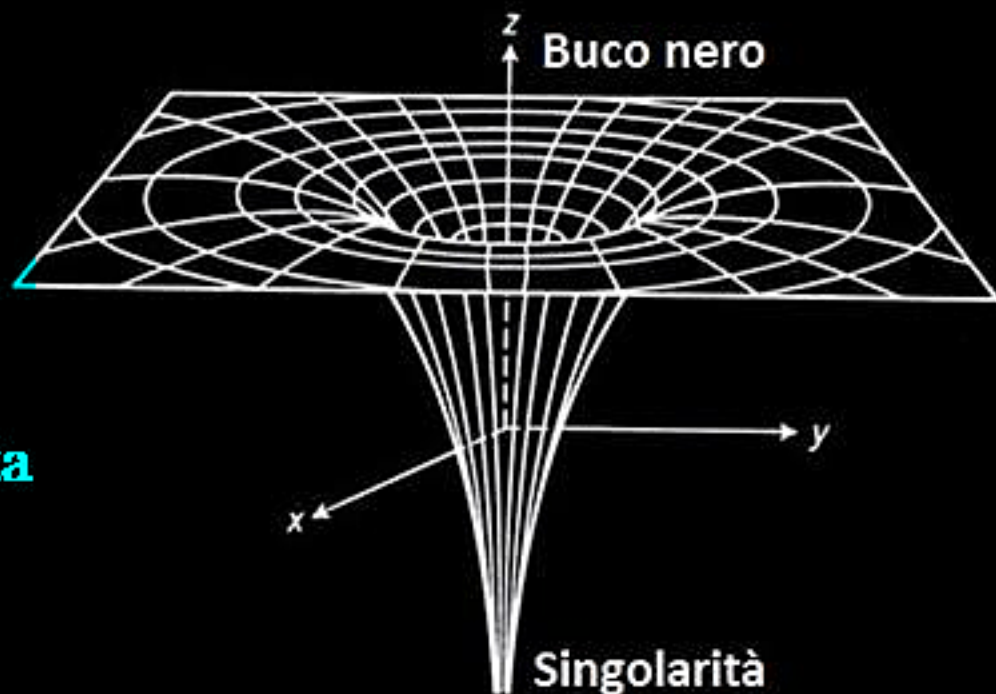
basta andare a visitare un buco nero...  
e poi tornare a casa...





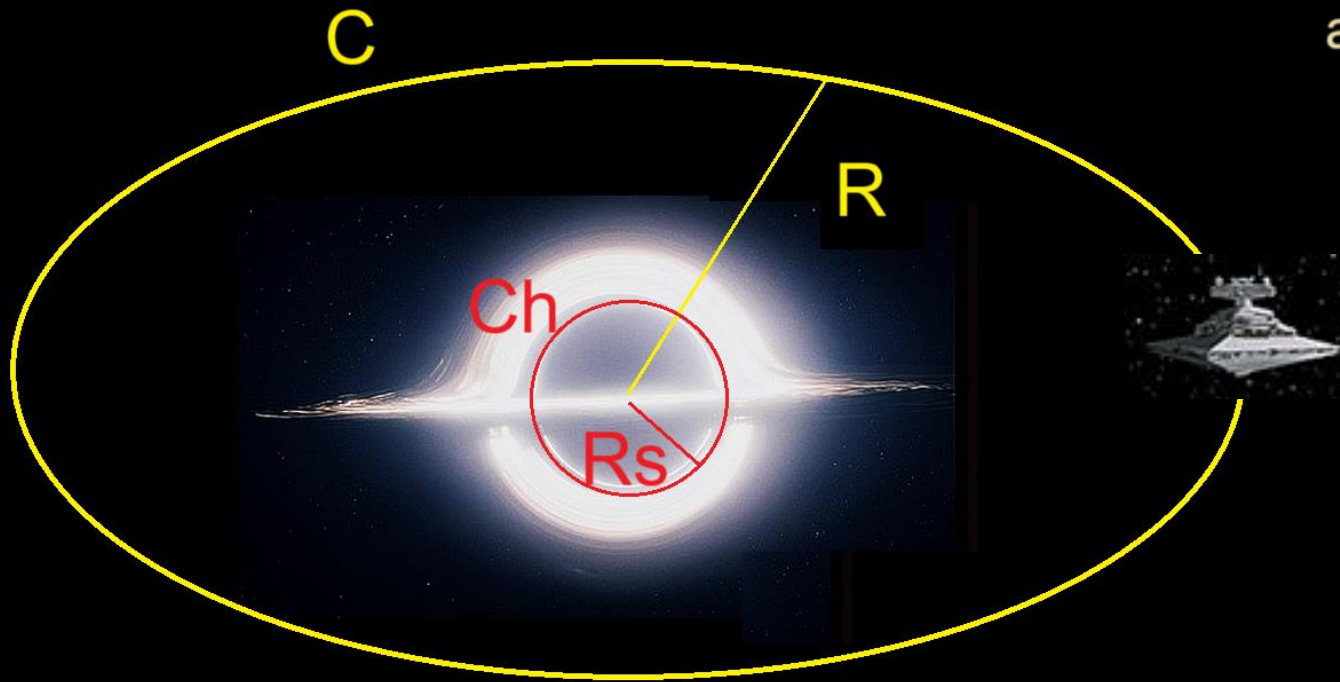
**Particolarmente interessanti in chiave viaggio temporale sono dei corpi celesti chiamati buchi neri. Tali corpi sorgono dalla morte delle stelle più grandi in seguito al collasso delle stesse quando non hanno più idrogeno o elio da fondere per bilanciare la loro stessa forza gravitazionale.**

**I buchi neri sono interessanti in quanto generano la deformazione del tessuto spazio-temporale più accentuata mai vista, infatti essi al loro centro hanno un punto di massa pressochè infinita chiamato singolarità. Tale singolarità esercita un'attrazione gravitazionale tale che neanche la luce riesce a fuggire, da ciò il loro nome.**





Viaggio intorno  
ad un Buco Nero



$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$C = 2\pi R$$

Lunghezza dell'orbita  
dell'astronave

$$R_s (km) \approx 3 \times \frac{M_{stella}}{M_{Sole}}$$

$$Ch = 2\pi R_s$$

Lunghezza dell'Orizzonte  
degli eventi del BH

$$T_o = \frac{2c}{g} \sinh \left[ \frac{g}{2c} T_a \right]$$

$T_o$  = Tempo trascorso sulla Terra

$T_a$  = Tempo trascorso sull'astronave

$c$  = velocità della luce

$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$  (accelerazione di gravità sull'astronave)

$\sinh(x)$  = funzione seno iperbolico di  $x$



**Dove Ch è la circonferenza dell'orizzonte degli eventi e C è l'orbita che stiamo percorrendo (leggermente più grande dell'orizzonte)**

C/Ch	T1 (giorni) vicino al buco nero	T2 (giorni) lontano dal buco nero
2	1	1,414214
1,5	1	1,732051
1,25	1	2,236068
1,125	1	3
1,0625	1	4,123106
1,03125	1	5,744563
1,015625	1	8,062258
1,007813	1	11,357456
1,003907	1	16,029687
1,001954	1	22,644441
1,000977	1	32,008459
1,000489	1	45,232618
1,000245	1	63,895482
1,000123	1	90,172509
1,000062	1	127,004064
1,000031	1	179,608086
1,000016	1	250,002
1,000008	1	353,554805
1,000004	1	500,001
1,000002	1	707,107488
1,000001	1	1000,0005

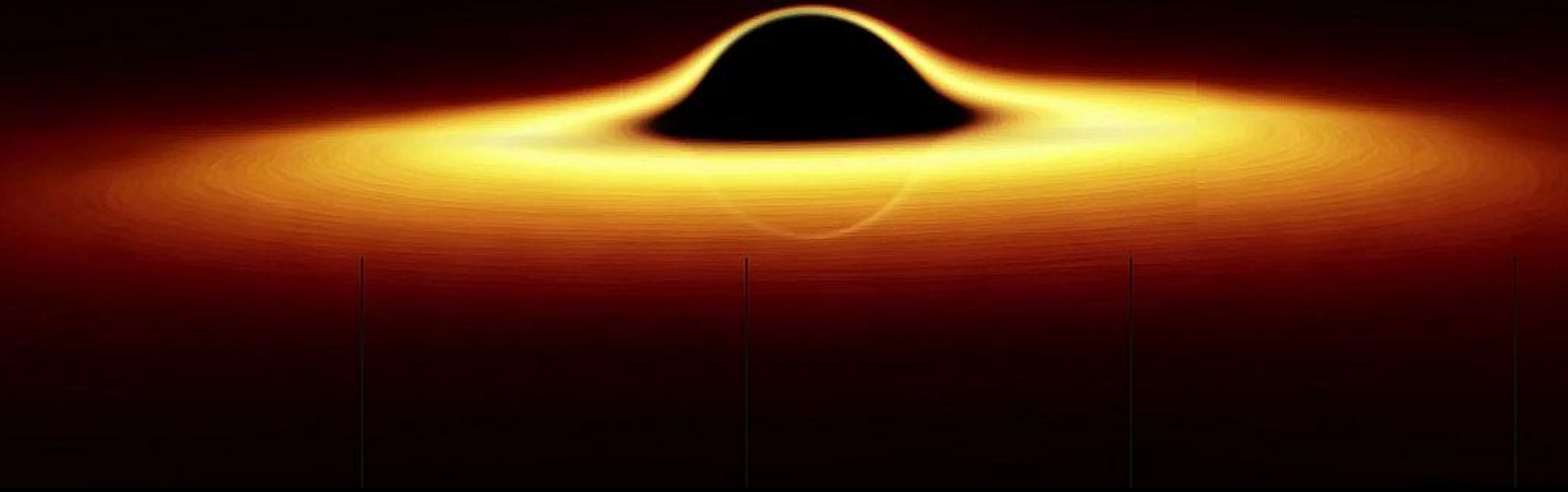
**Ta = 1 giorno**

**Grazie alla deformazione che i campi gravitazionali imprimono al continuum, il viaggio nel tempo risulta sempre più realistico e non necessiterebbe più di viaggi a velocità pressochè luminali; basterebbe viaggiare per un po' intorno a un buco nero per veder scorrere il tempo molto più lentamente che sulla Terra.**

**Cosa succederebbe se attraversassimo l'orizzonte degli eventi? Oltre tale orbita niente può più tornare indietro, ma è proprio tale estrema regione che potrebbe nascondere una nuova possibilità per il viaggio nel tempo. Infatti secondo alcune teorie sarebbe possibile evitare di cadere necessariamente sulla singolarità o di venire stirati dalla grande differenza di forze tra il capo e i piedi.**



Se decidete di cadere in un Buco Nero,  
sceglietelo mooolto grande.



Più il Buco Nero è grande e massivo  
e meno è pericoloso...

# Viaggiare nello Spazio

*come?*





# La Metrica dell'Universo



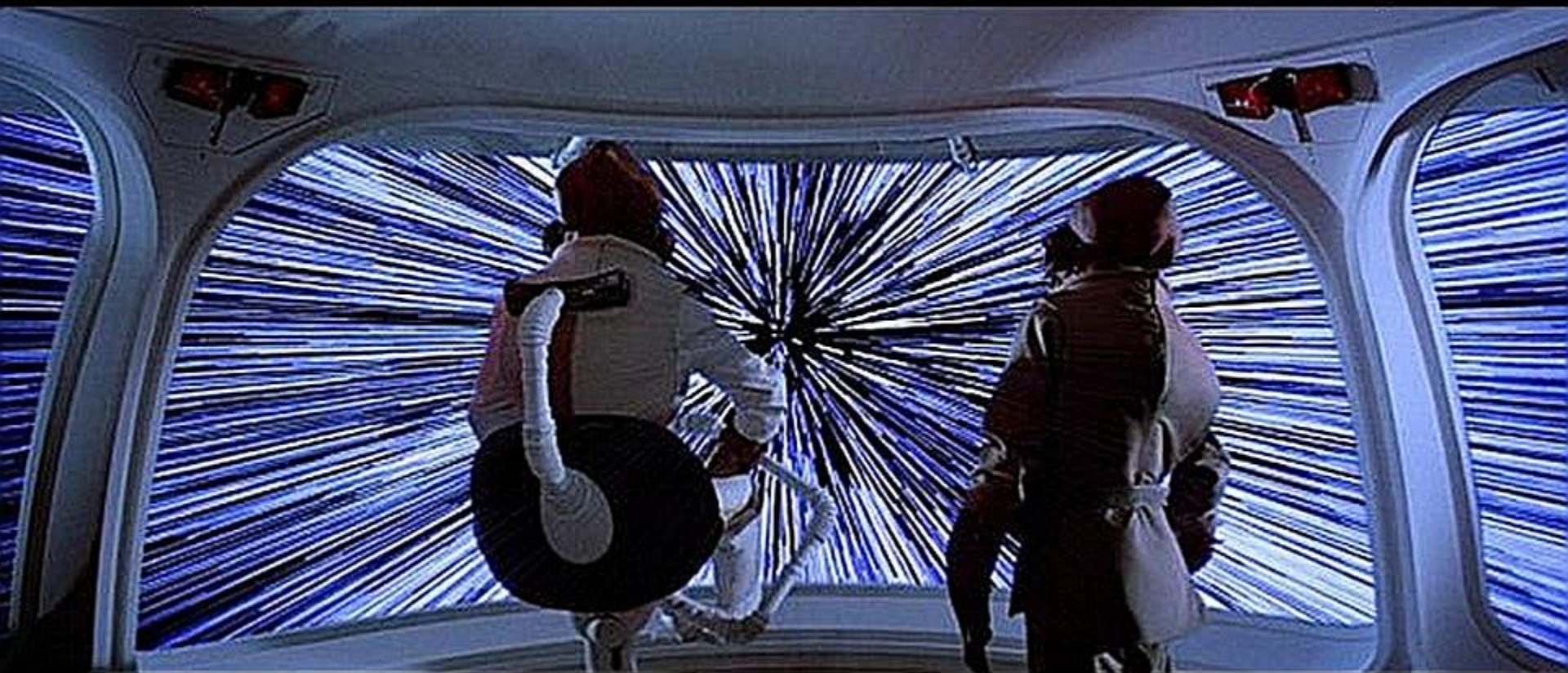
**Stabilire la Metrica dell'Universo equivale a formulare una regola per calcolare le distanze in quell'Universo**

**Distanza euclidea: fissata e costante per ogni coppia di punti nello spazio...**

**E' la distanza minima...**



# Viaggi superluminali



$$V > c$$

VIAGGI SUPERLUMINALI

INDIRETTAMENTE POSSIBILI

...SFRUTTARE LA  
GEOMETRIA DELLO  
SPAZIO-TEMPO...




# Possibili....

## Ecco il trucco....

# Equazione di Campo di Einstein

**Curvatura  
Spazio-Tempo**

**Massa**  
*densità di Energia,  
pressione, tensione*


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

Tensore di  
curvatura di Ricci

descrive la curvatura  
dello spazio-tempo

Tensore metrico

descrive la metrica  
dello spazio-tempo

Tensore  
stress-energia



# Tensore di Stress-Energia

simmetria sferica

$$T_{ik} = \begin{pmatrix} \rho c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix}$$

$\rho$  = densità di massa (massa/volume)

$\rho c^2$  = densità di energia (Energia/volume)

$\tau$  = tensione radiale

$p$  = pressione laterale

# Tensore Metrico

simmetria sferica

Maggiore è il campo gravitazionale  
e maggiore è la curvatura.

Si, ma c'è un limite...

$$g_{ik} = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

$$\text{Curvatura} = \frac{G \rho}{c^2}$$

$$\frac{G}{c^2} = 7.4 \times 10^{-30} \text{ m/Kg}$$

Raggio di  
Schwarzschild

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$r_s$  = raggio

$G$  = costante di gravitazione universale

$M$  = massa

$c$  = velocità della luce



# La soluzione di Schwarzschild

Nel 1916 l'astrofisico Karl Schwarzschild trova per primo una soluzione alle equazioni della relatività di Einstein per un oggetto sferico, statico e immerso in uno spazio vuoto. Se l'oggetto è concentrato entro un raggio critico, allora nulla, neanche la luce, può più uscirne.

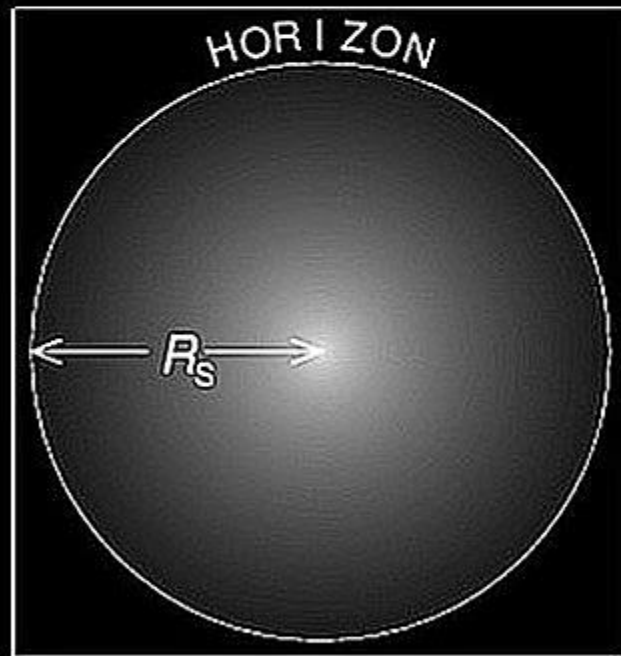


Karl Schwarzschild (1873-1916)

Raggio di Schwarzschild

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$R_s (km) \approx 3 \times \frac{M_{stella}}{M_{Sole}}$$



Nel 1967, Wheeler li battezza buchi neri

# Che succede a casa nostra? cioè vicino al Sole...

Prendiamo il primo termine del tensore  
metrico  $g_{00}$

$$g_{00} = 1 - \frac{2 G M}{r C^2}$$

$$\frac{2 G M_{\text{sole}}}{C^2 R_{\text{sole}}} \text{ è dell'ordine di } 10^{-6}$$

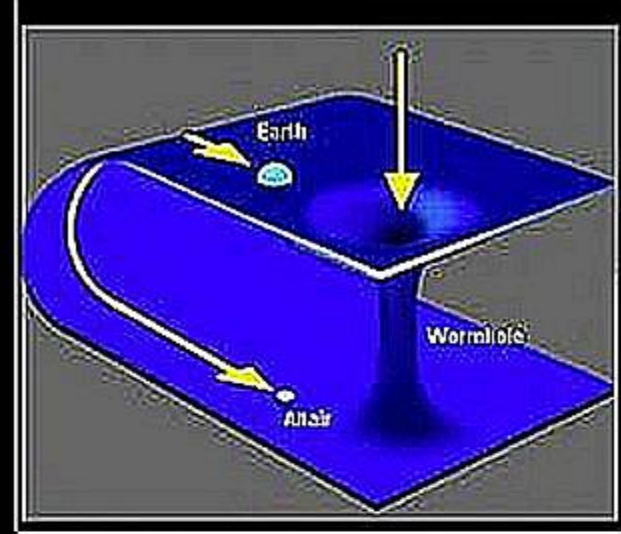
$$M_{\text{sole}} = 2 \times 10^{30} \text{ Kg}$$

$$R_{\text{sole}} = 7 \times 10^8 \text{ m}$$

...che rappresenta una correzione molto piccola alla metrica  
piatta (euclidea)...

# Esempio

Distanza Terra - Altair: 16,73 Anni Luce



Distanza:  $16,73 \text{ AL} \times 365 \text{ g} \times 86400 \text{ s} \times 300000 \text{ Km/s}$   
 $= 1,6 \times 10^{14} \text{ Km}$

viaggiando a  $25000 \text{ Km/h}$  si impiegherebbero:  
 $722736$  anni

Passando per il wormhole:  $50000 \text{ Km}$   
... fattibile in  $2$  ore di viaggio

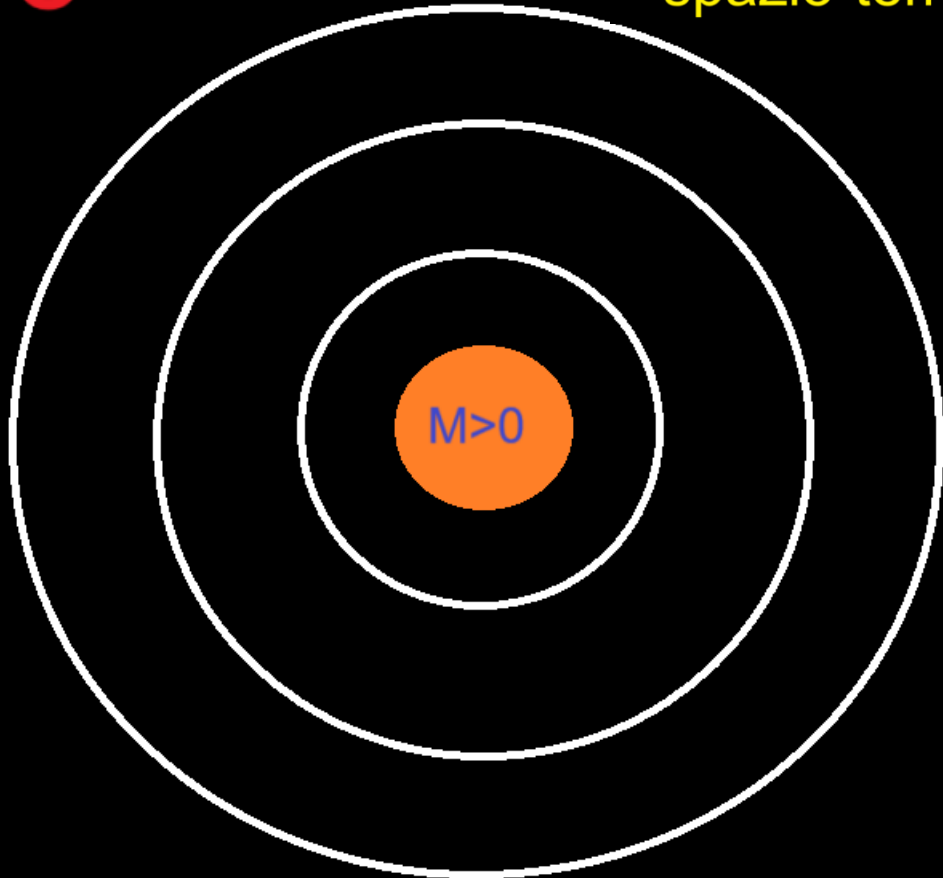
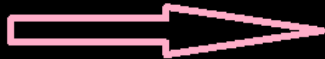
Velocità equivalente:  $41,7 \text{ c}$



Energia  $E > 0$

Geodetiche dello spazio-tempo

Corpo in caduta libera



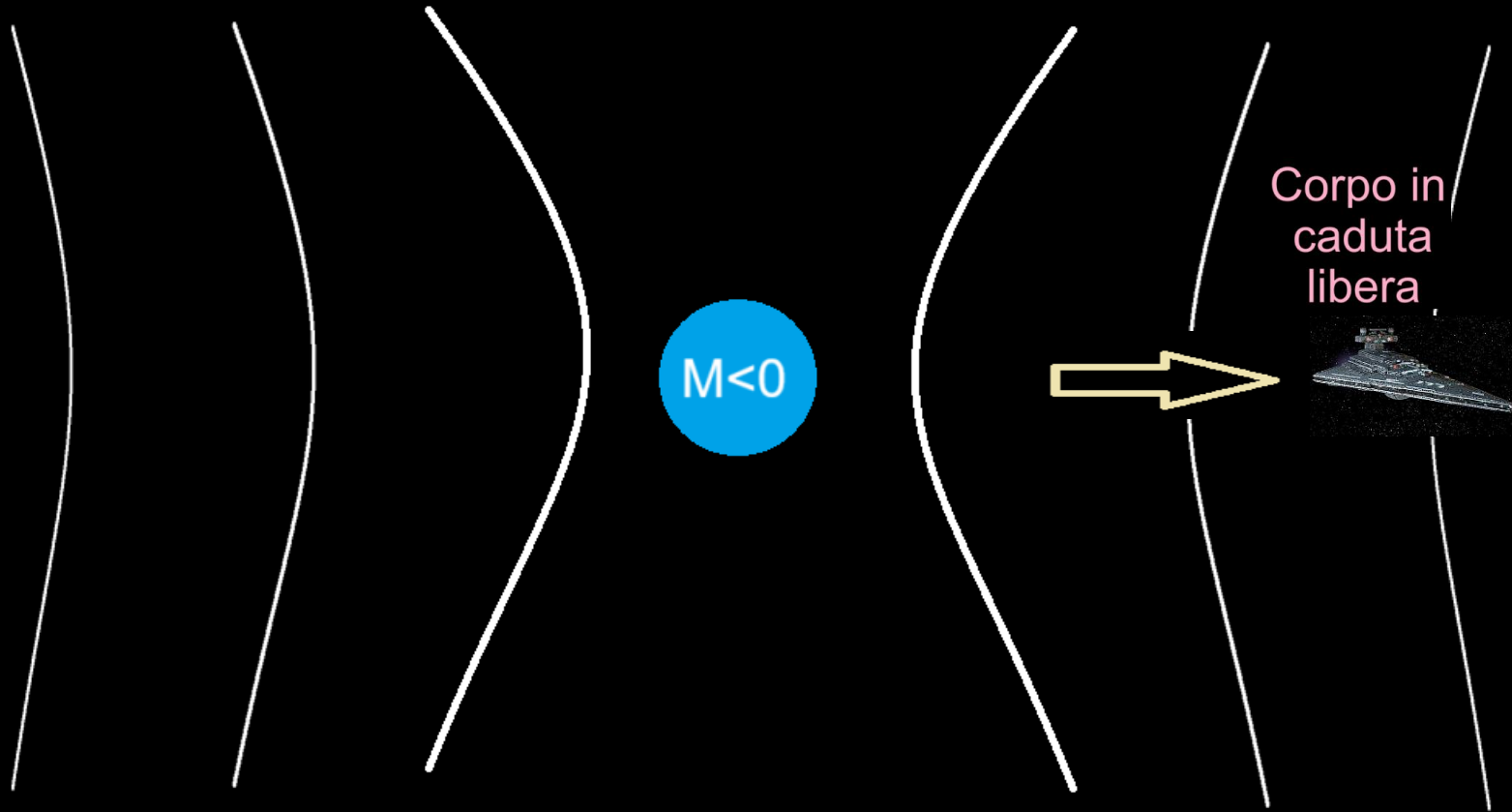
Massa positiva  $\Rightarrow$  Curvatura positiva

Gravità attrattiva

Geodetiche dello spazio-tempo

Energia  $E < 0$

Geodetiche dello spazio-tempo



Massa negativa  $\Rightarrow$  curvatura negativa

**Gravità repulsiva**





**Viaggi interstellari  
e intergalattici possibili**



# Viaggi Superluminali

- Per tenere aperto un wormhole, o per “stirare” lo spazio nella propulsione di Alcubierre, occorrerebbe usare materia con massa negativa!
- Ordinariamente, tale materia non esiste. Nel mondo della Meccanica Quantistica, per fluttuazioni casuali, è però possibile che tale materia sia prodotta.

**BISOGNA IMPARARE**

**A PRODURLA...**



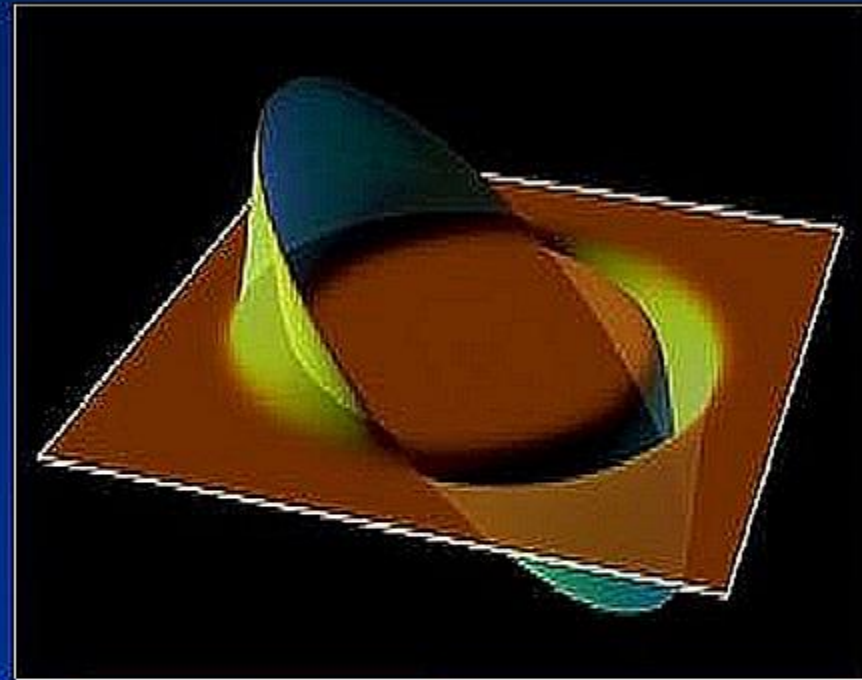
The image features a central cutaway illustration of a futuristic spacecraft, identified as an Alcubierre Warp Drive. The ship is depicted with a complex internal structure, including a central engine or reactor core, surrounded by various mechanical components and structural elements. The ship is shown moving through a dark, star-filled space, with a bright, glowing trail behind it, suggesting high-speed travel. The background is a dark, textured surface, possibly representing a spacetime metric or a warp bubble. The text "A.W.D." and "Alcubierre Warp Drive" is overlaid in a bold, yellow font, with "A.W.D." positioned above "Alcubierre Warp Drive".

**A.W.D.**  
**Alcubierre Warp Drive**



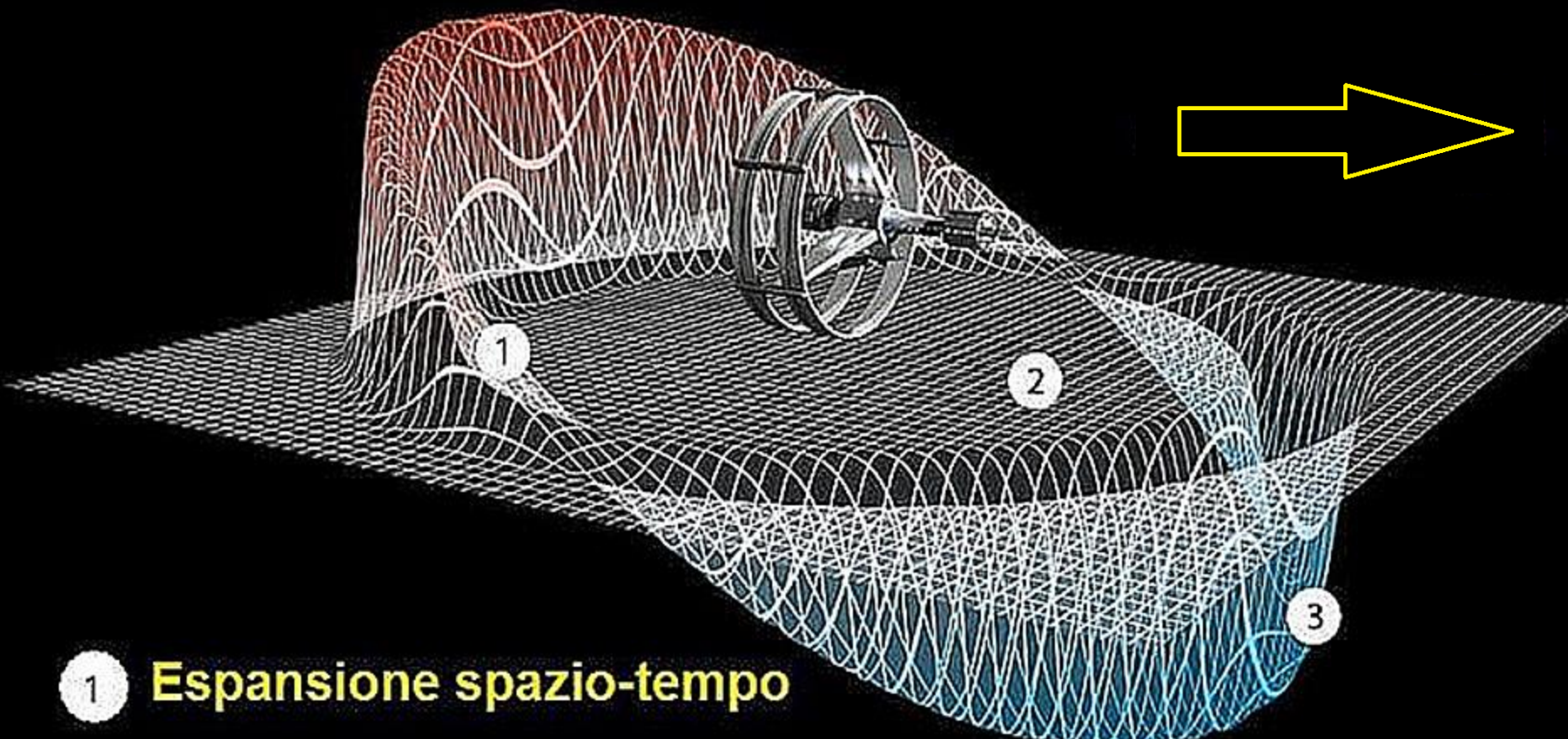
# Propulsione di Alcubierre

- L'astronave è ferma rispetto al “foglio” spazio-temporale. Tuttavia, il “foglio” può essere “stirato”, in modo da portare l'astronave a velocità anche molto superiori a quelle della luce. L'astronave è ferma rispetto al “foglio”: è il “foglio” che si “stira” velocemente.



Miguel Alcubierre

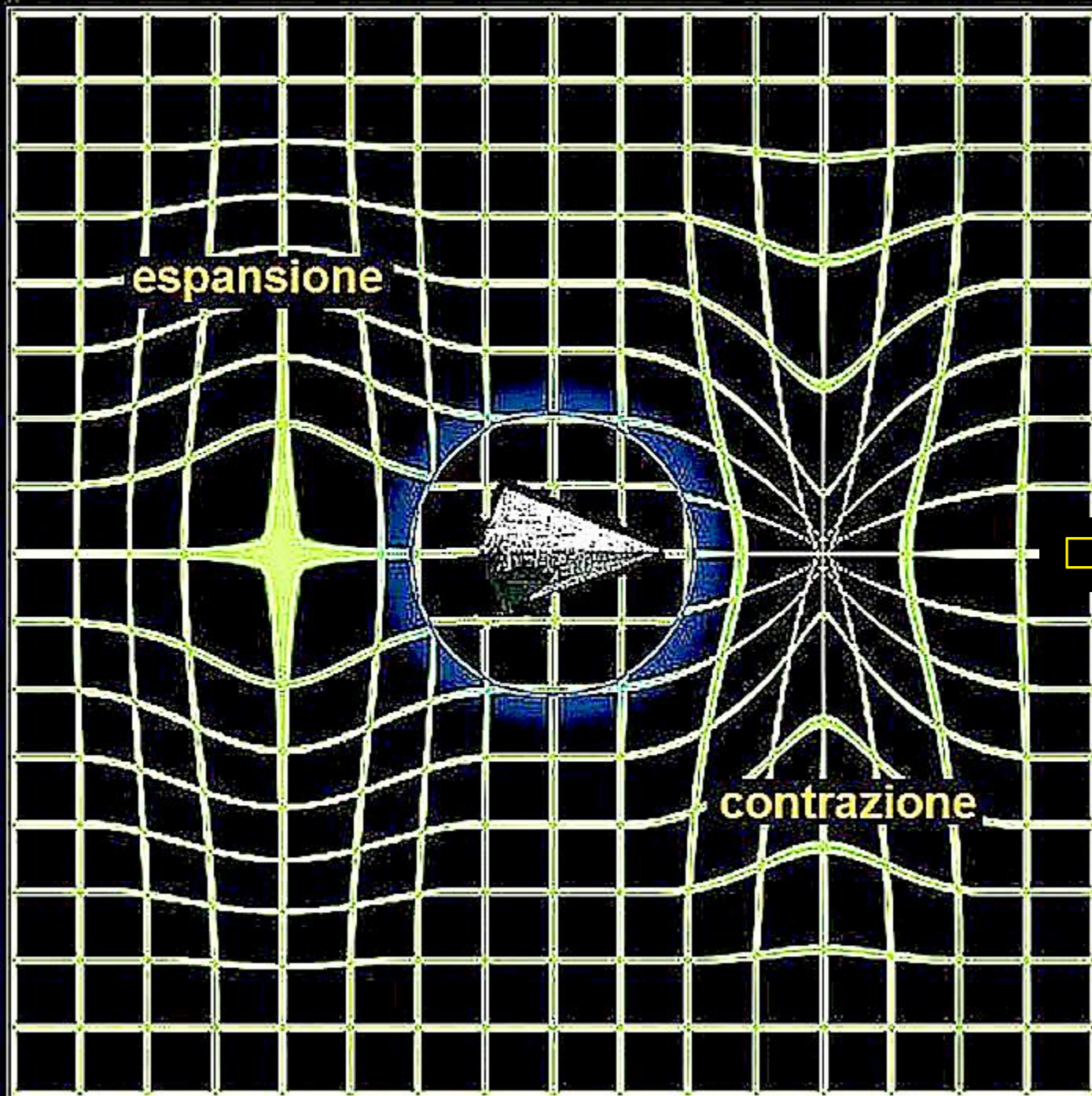




- 1 Espansione spazio-tempo
- 2 Spazio-Tempo stabile
- 3 Contrazione spazio-tempo

# Propulsione di Alcubierre





espansione

contrazione





Deformare lo Spazio-Tempo costa molta energia.

Per attuare la propulsione AWP occorre deformare opportunamente il tessuto spazio-temporale utilizzando una massa corrispondente a quella di un buco nero grande circa come l'astronave che deve viaggiare utilizzando l'AWP

# Quanto grande?

$$R_{bh} = \frac{2 \cdot G}{c^2} \cdot M_a \quad (\text{metri})$$

dove:

$M_a$  = massa dell'astronave

$R_{bh}$  = raggio del buco nero necessario a farla viaggiare (metri)



Facciamo qualche calcolo:



massa dell'astronave: 1 miliardo di Kg  
( 1 milione di tonnellate)

raggio del buco nero necessario a  
muoverla:  $1.5 \times 10^{-18}$  metri

è piccolo  $\Rightarrow$  evapora?



**Grazie per l'attenzione!!**