Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 12

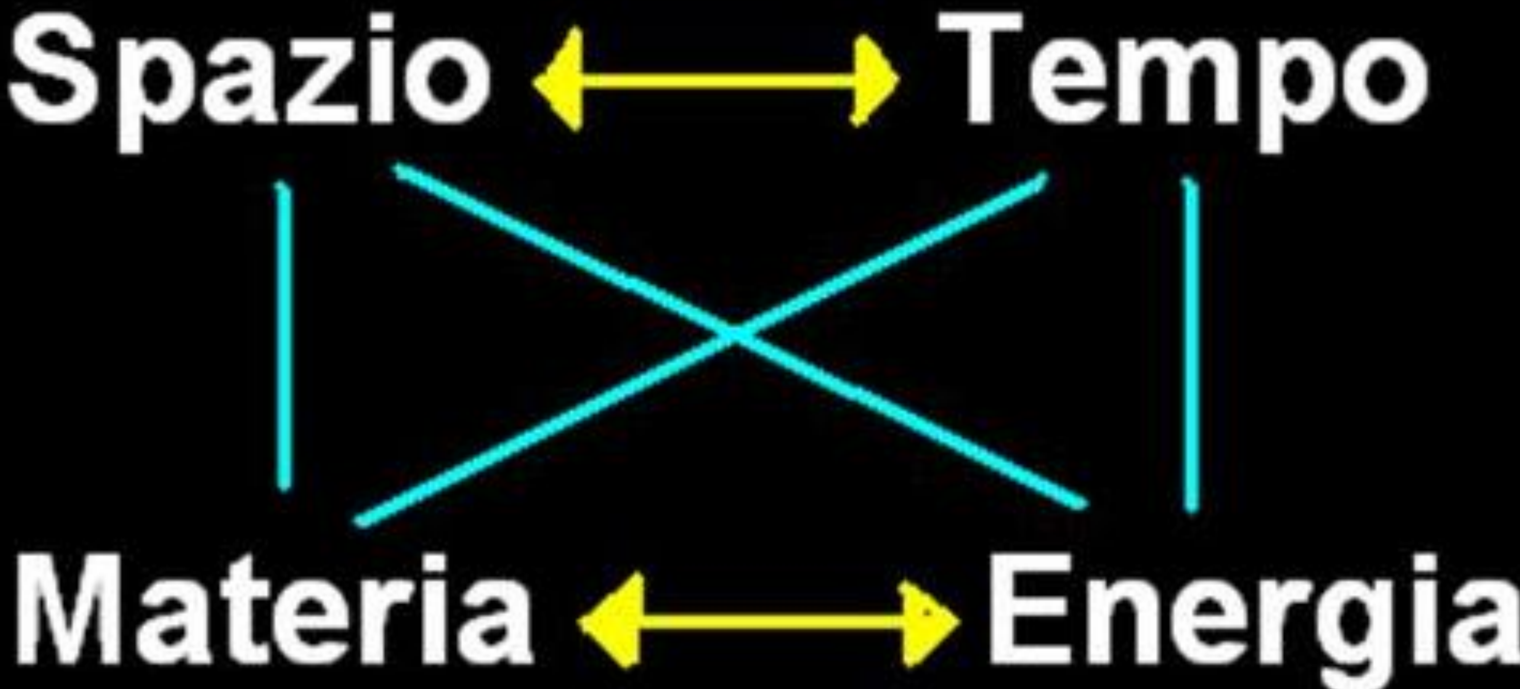
Gli "*Wormholes*": i cunicoli spazio-temporali

Ciò che non va contro le leggi della Fisica è realizzabile

prima o poi...

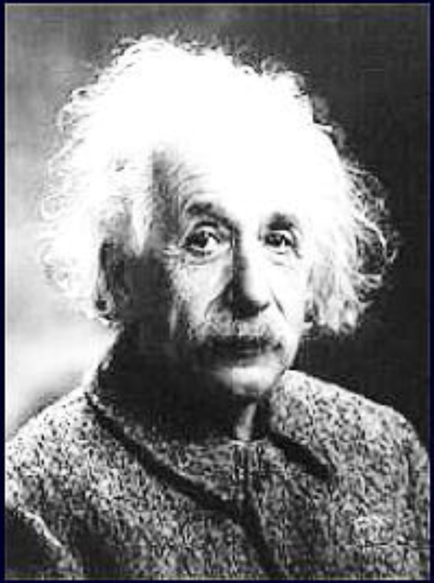

Spazio
Tempo
Materia
Energia
4 diversi aspetti della stessa cosa...

Esiste quindi una corrispondenza incrociata tra tutti...



sono legati indissolubilmente...

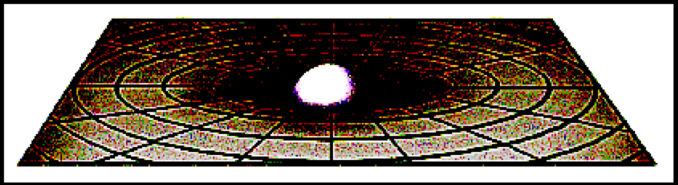
Le due rivoluzioni scientifiche dovute ad Albert Einstein



- 1905: Relatività ristretta. Equivalenza tra massa ed energia.
- 1915: Relatività generale. La massa curva lo spazio-tempo

La Massa e lo Spazio: la nuova visione di Einstein

- Relatività Generale: la massa “curva” lo spazio, determinandone la geometria .
- La gravità è espressa dalla geometria dello spazio (i corpi si muovono lungo le ‘geodetiche’ della metrica)
- LO SPAZIO NON E’ PIU’ QUELLO DI EUCLIDE E DI PITAGORA….



Equazione del campo gravitazionale

Tensore
di Einstein

Costante

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = k T_{\mu\nu}$$

Tensore di Curvatura
(di Ricci Curbastro)

Tensore Metrico

Scalare di Curvatura

Tensore
Energia-Impulso

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

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

ρ = densità di massa (massa/volume)

ρc^2 = densità di energia (Energia/volume)

τ = tensione radiale

p = pressione laterale

Curvatura e gravitazione

Maggiore è il campo gravitazionale e maggiore è la curvatura.

Si, ma c'è un limite...

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

tensore metrico

Raggio di Schwartzschild

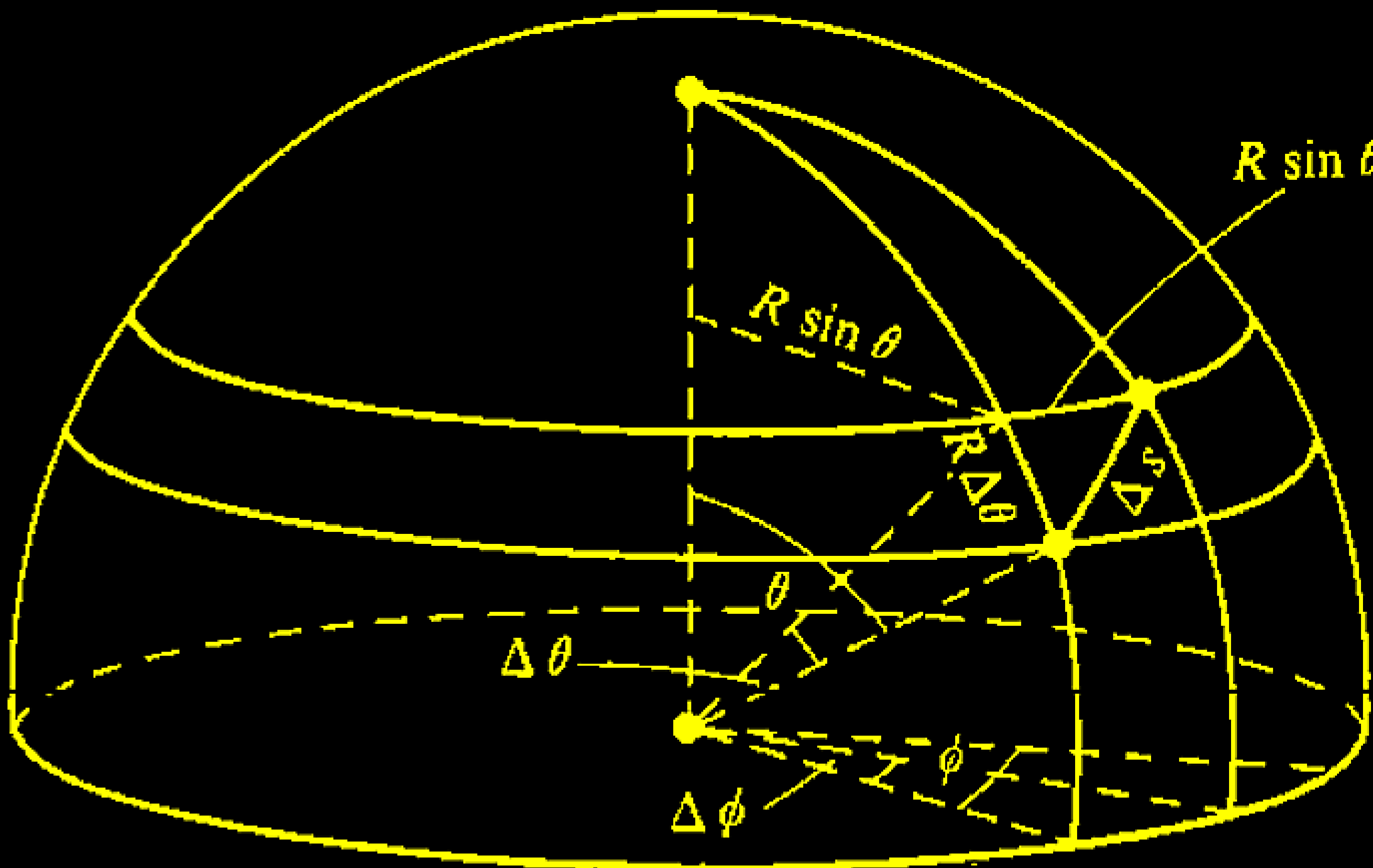
$$\boxed{r_s = \frac{2GM}{c^2}}$$

r_s = raggio

G = costante di gravitazione universale

M = massa

c = velocità della luce

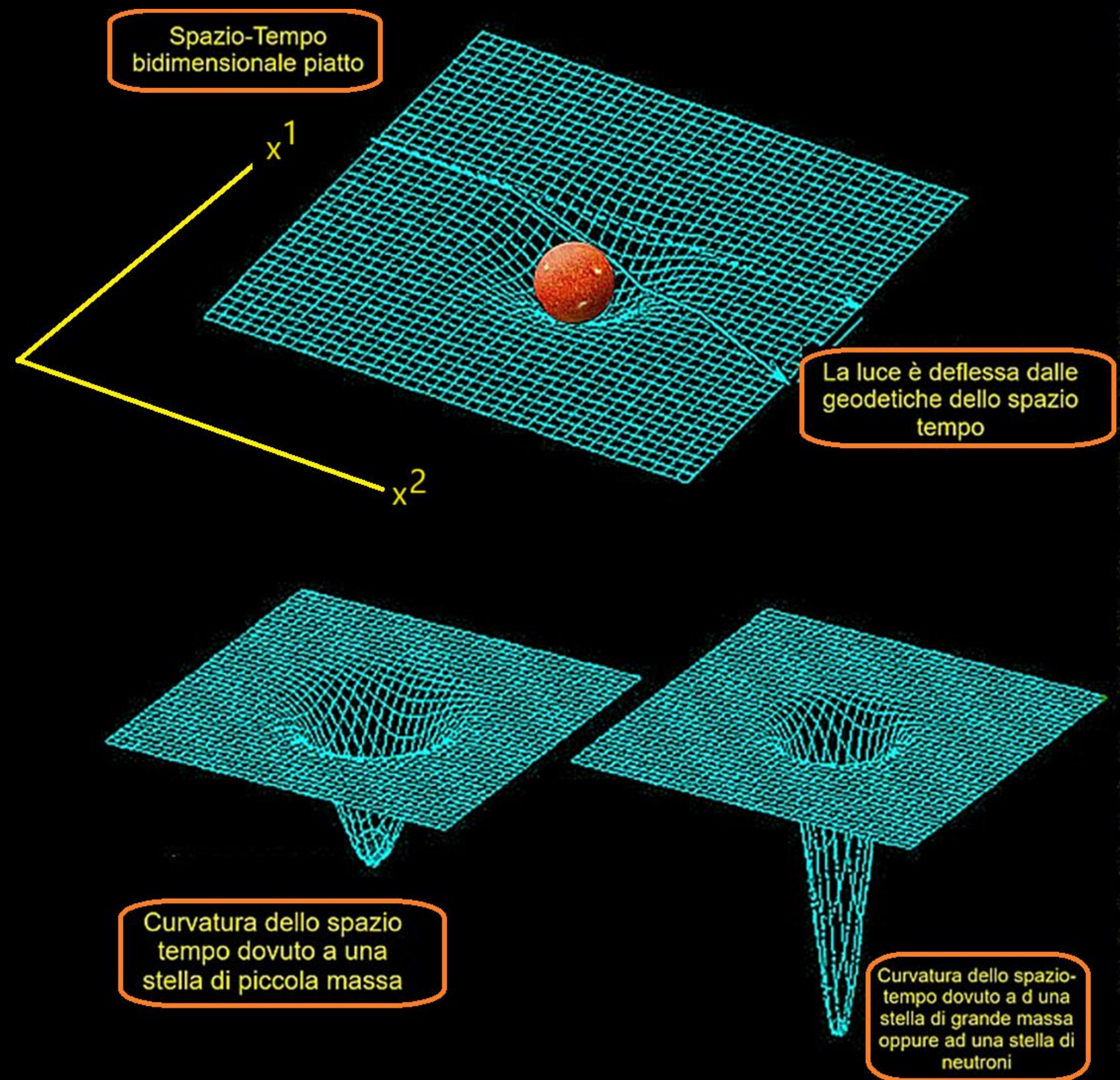


Elemento di linea Δs su una sfera in coordinate sferiche

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2$$

Esempio: Spazio a 2 dimensioni: x^1 e x^2

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{pmatrix}$$



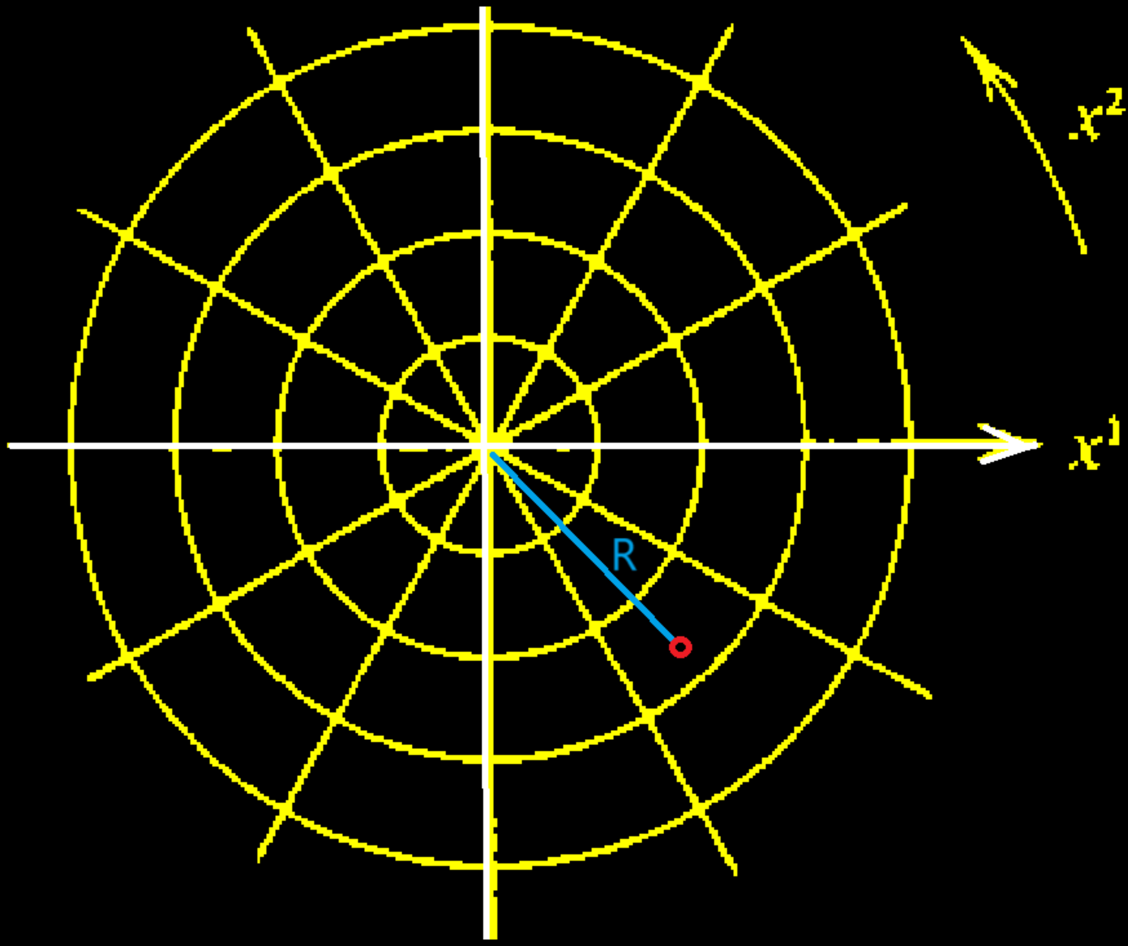
Curvatura locale di una superficie bidimensionale nel punto di coordinate x^1 e x^2

$$K = \frac{1}{2g_{11}g_{22}}\left\{-\frac{\partial^2 g_{11}}{\partial(x^2)^2} - \frac{\partial^2 g_{22}}{\partial(x^1)^2} + \right.$$

$$+ \frac{1}{2g_{11}}\left[\frac{\partial g_{11}}{\partial x^1}\frac{\partial g_{22}}{\partial x^1} + \left(\frac{\partial g_{11}}{\partial x^2}\right)^2\right] +$$

$$\left. + \frac{1}{2g_{22}}\left[\frac{\partial g_{11}}{\partial x^2}\frac{\partial g_{22}}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial g_{22}}{\partial x^1}\right)^2\right]\right\}.$$

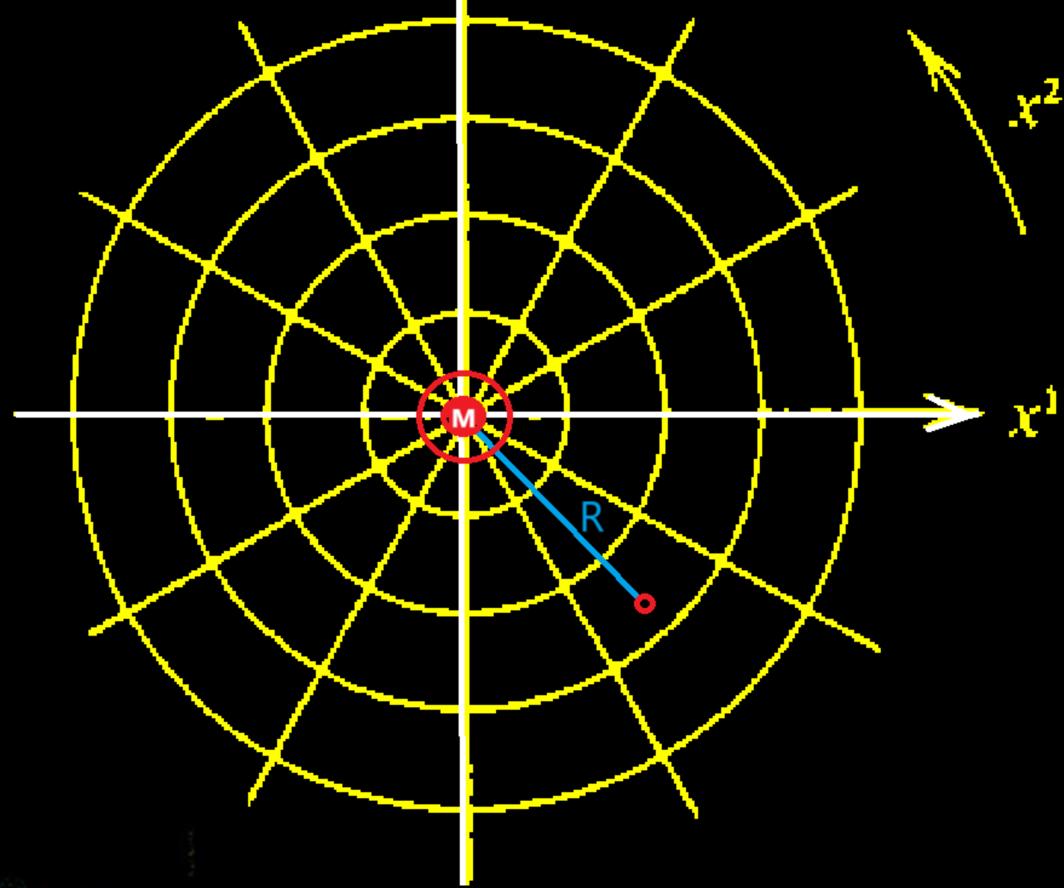
opportuna scelta delle coordinate…



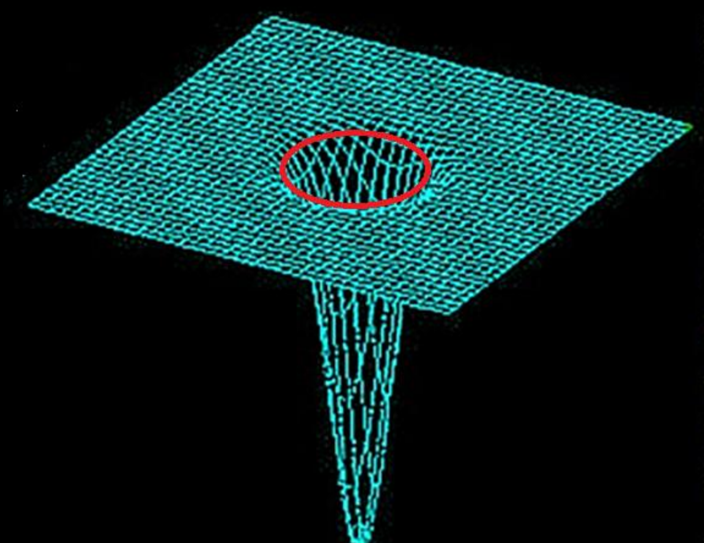
Tensore Metrico

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{pmatrix}$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} R^2 & 0 \\ 0 & R^2 \sin^2 x^1 \end{pmatrix}.$$



Orizzonte degli eventi



se ci fosse una massa M
all'origine delle coordinate...

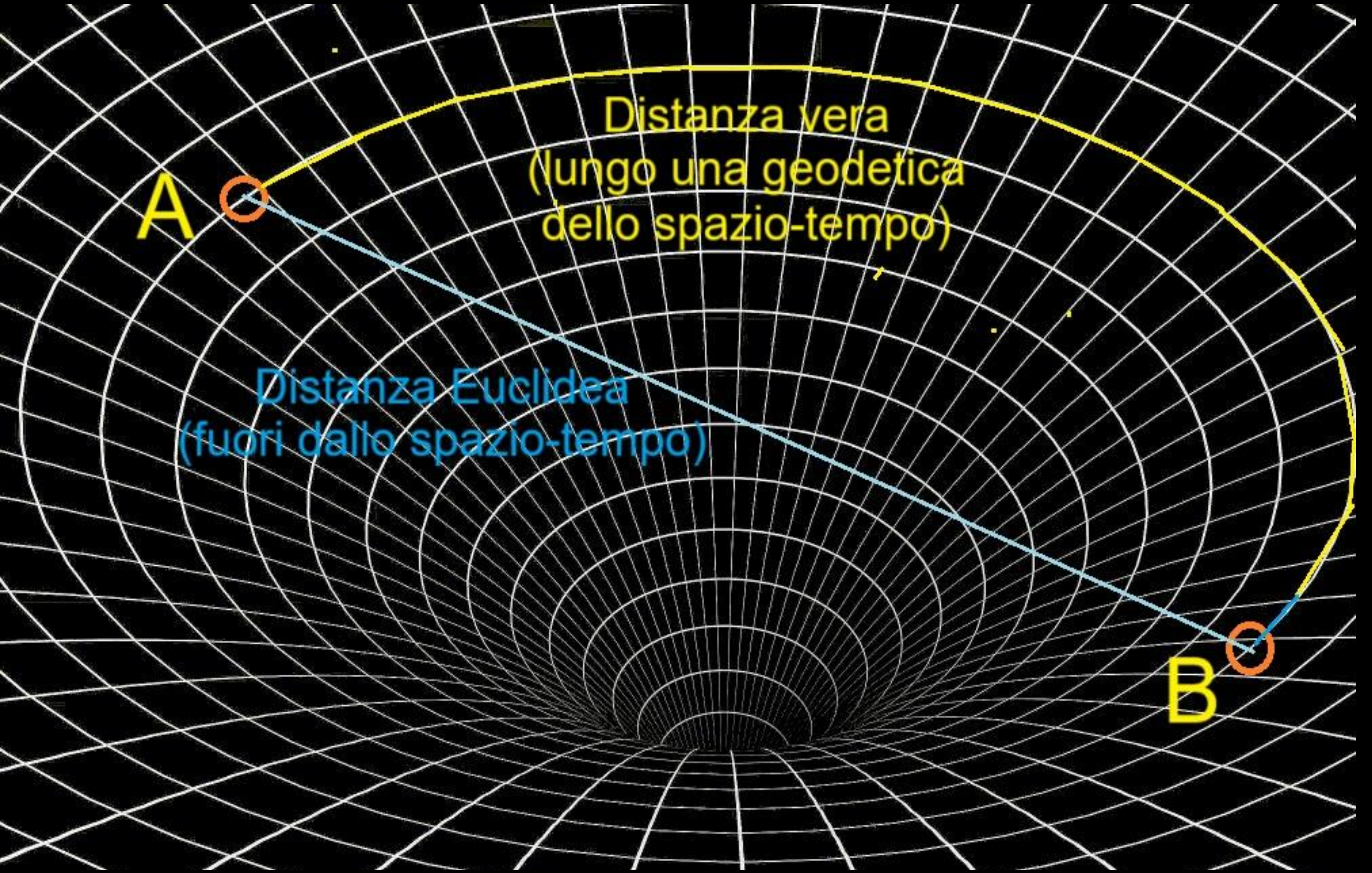
$$g_{11} = \left(\frac{2GM}{c^2 R}\right)$$

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

La metrica di Schwartzschild

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2,$$

ove con M si indica la massa della sorgente, con G la costante di gravitazione universale e con c la velocità della luce. Si noti che per $M \to 0$, si ritrova lo spaziotempo di Minkowski; per $M > 0$, invece, la metrica di Minkowski si ottiene asintoticamente per $r \to \infty$.

La scelta delle coordinate sferiche appare la più naturale, viste le simmetrie del problema, ma le componenti della metrica risultano singolari per $r = \dfrac{2GM}{c^2}$. Nel corso degli anni sono stati introdotti differenti sistemi di coordinate locali, per mettere in mostra determinate caratteristiche della geometria dello spazio-tempo.

È possibile scrivere la metrica in forma matriciale:

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

Tensore Metrico

Essa è singolare nei punti ove è singolare la matrice $g_{\mu\nu}$.

Per la metrica di Schwarzschild ciò avviene quando

- $1 - \dfrac{2GM}{c^2 r} = 0 \iff r = \dfrac{2GM}{c^2};$
- $r = 0.$

La soluzione di Schwarzschild

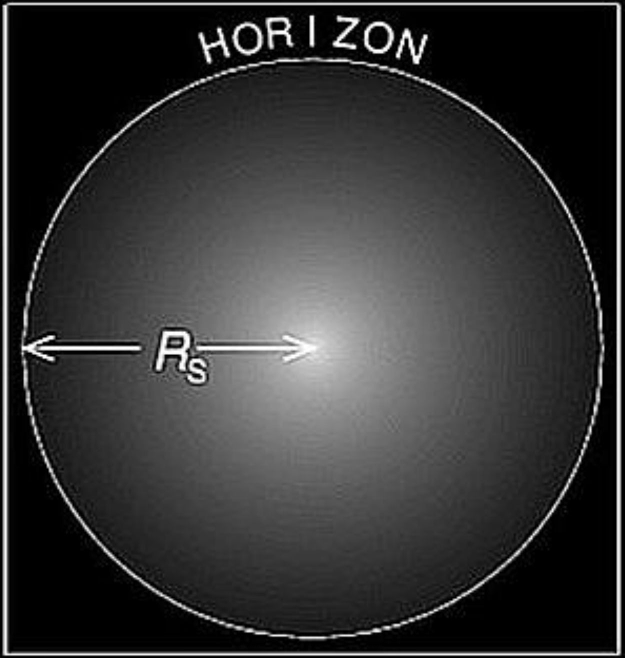
Nel 1916 l'astrofisico Karl Schwarzschild trova per primo una soluzione alle equazioni della relatività di Einstein per un oggetto sferico, statico e immerso in uno spazio vuoto. Se l'oggetto è concentrato entro un raggio critico, allora nulla, neanche la luce, può più uscirne.

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

Tensore Metrico

simmetria sferica

Maggiore è il campo gravitazionale e maggiore è la curvatura.

Si, ma c'è un limite...

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

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

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

Raggio di Schwartzschild

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

r_s = raggio

G = costante di gravitazione universale

M = massa

c = velocità della luce

Che succede a casa nostra? cioè vicino al Sole…

Prendiamo il primo termine del tensore metrico g_{00}

$$g_{00} = 1 - \frac{2GM}{r\,c^2}$$

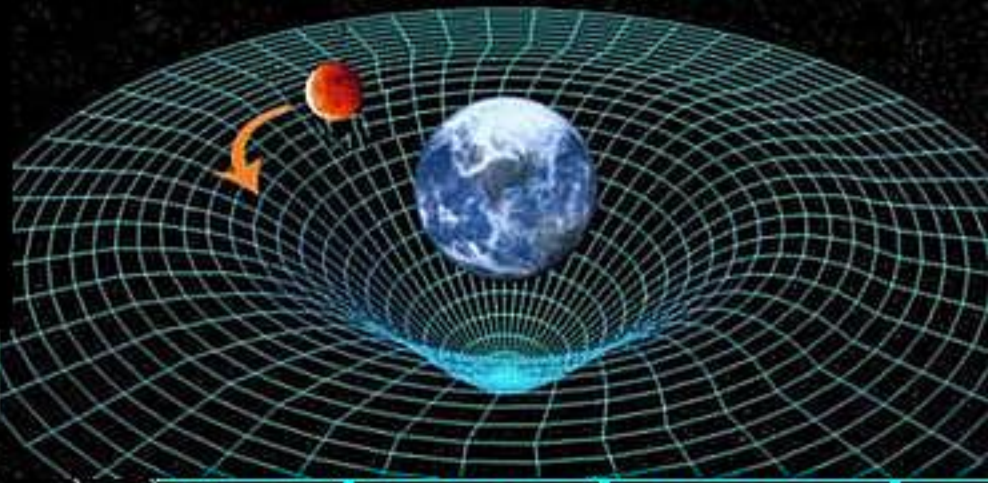
$$\frac{2GM_{sole}}{c^2\,R_{sole}}$$ è dell'ordine di 10^{-6}

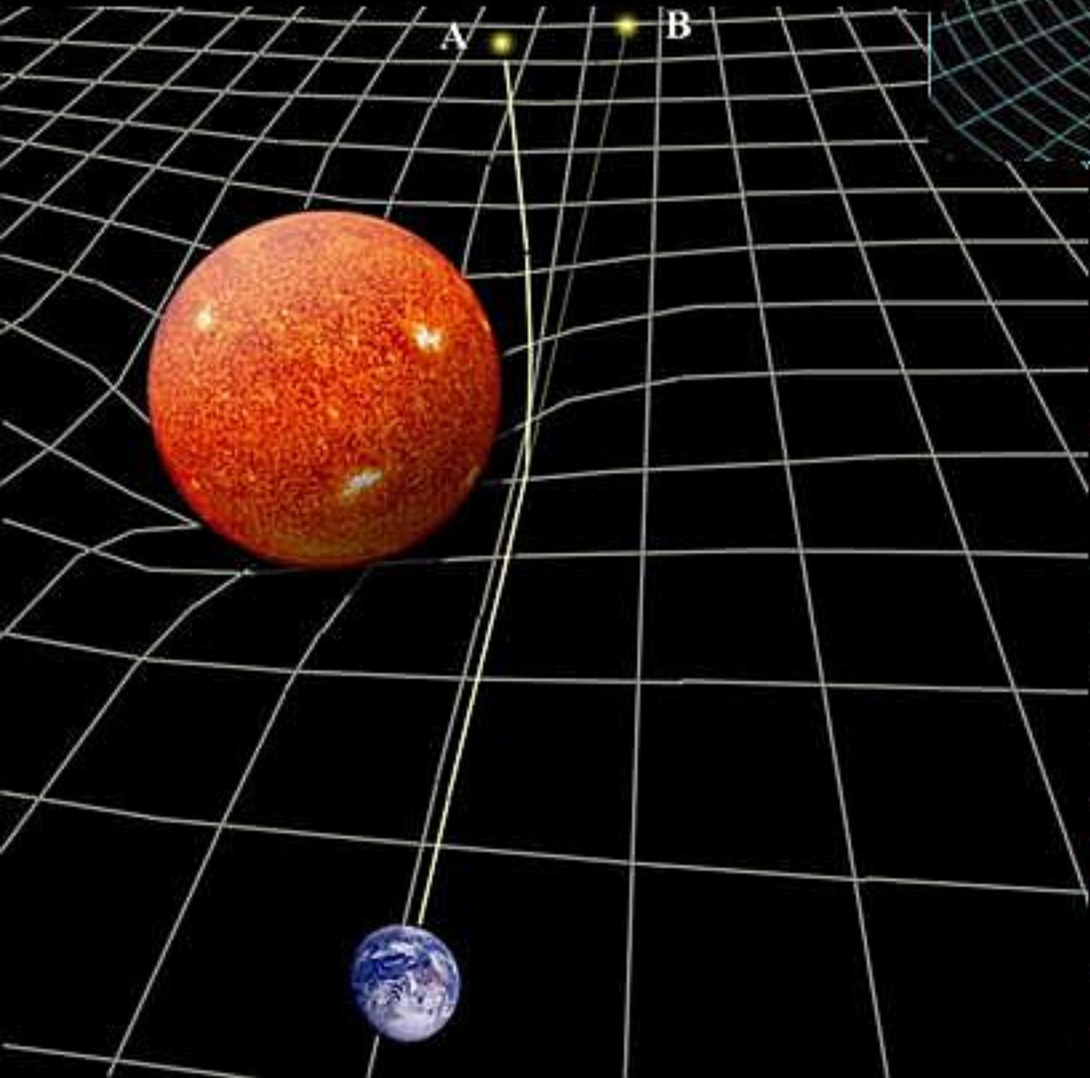
$M_{sole} = 2 \times 10^{30}$ Kg

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

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

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.

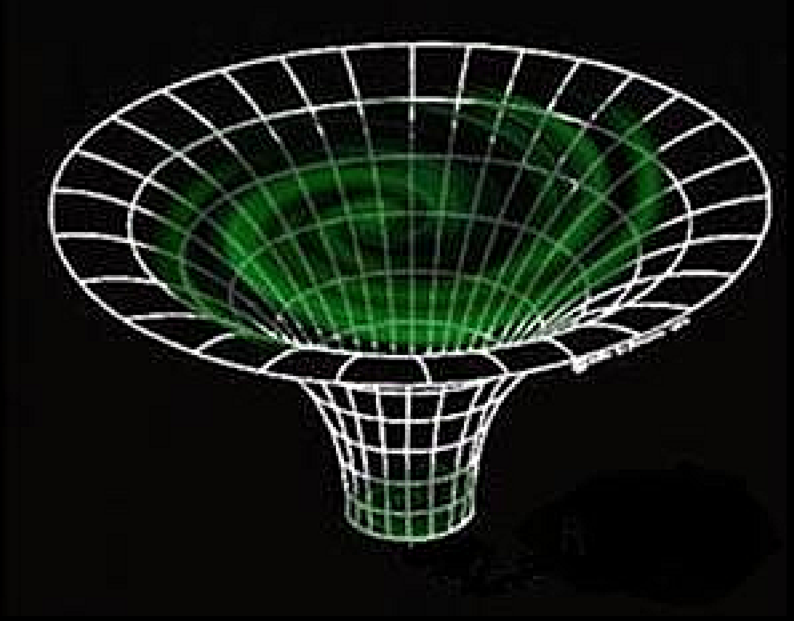
1) Il campo gravitazionale diminuisce allontanandosi dalla concentrazione di massa.

2) La curvatura dello spazio tempo aumenta avvicinandosi alla concentrazione di massa.

3) lo scorrere del tempo rallenta avvicinandosi alla concentrazione di massa.

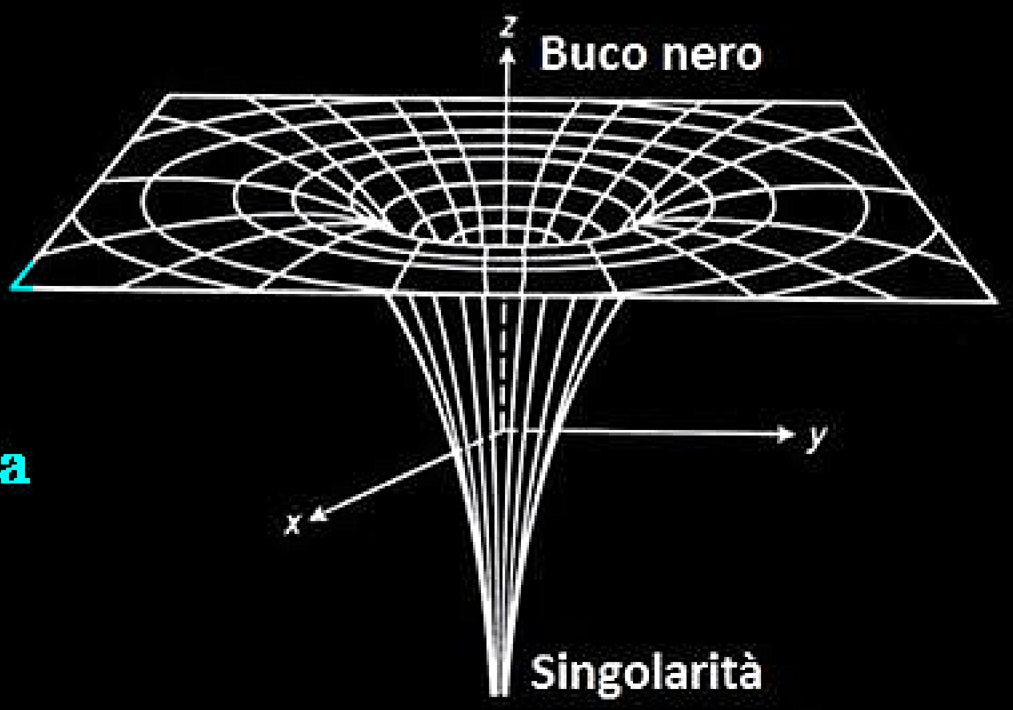
$$\boxed{t(d) = t(d°) \cdot \left(1 + \frac{2\,g}{c^2} (d - do) \right)}$$

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



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 vita, 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.



Tensore di Stress-Energia

simmetria sferica

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

ρ = densità di massa (massa/volume)

ρc^2 = densità di energia (Energia/volume)

τ = tensione radiale

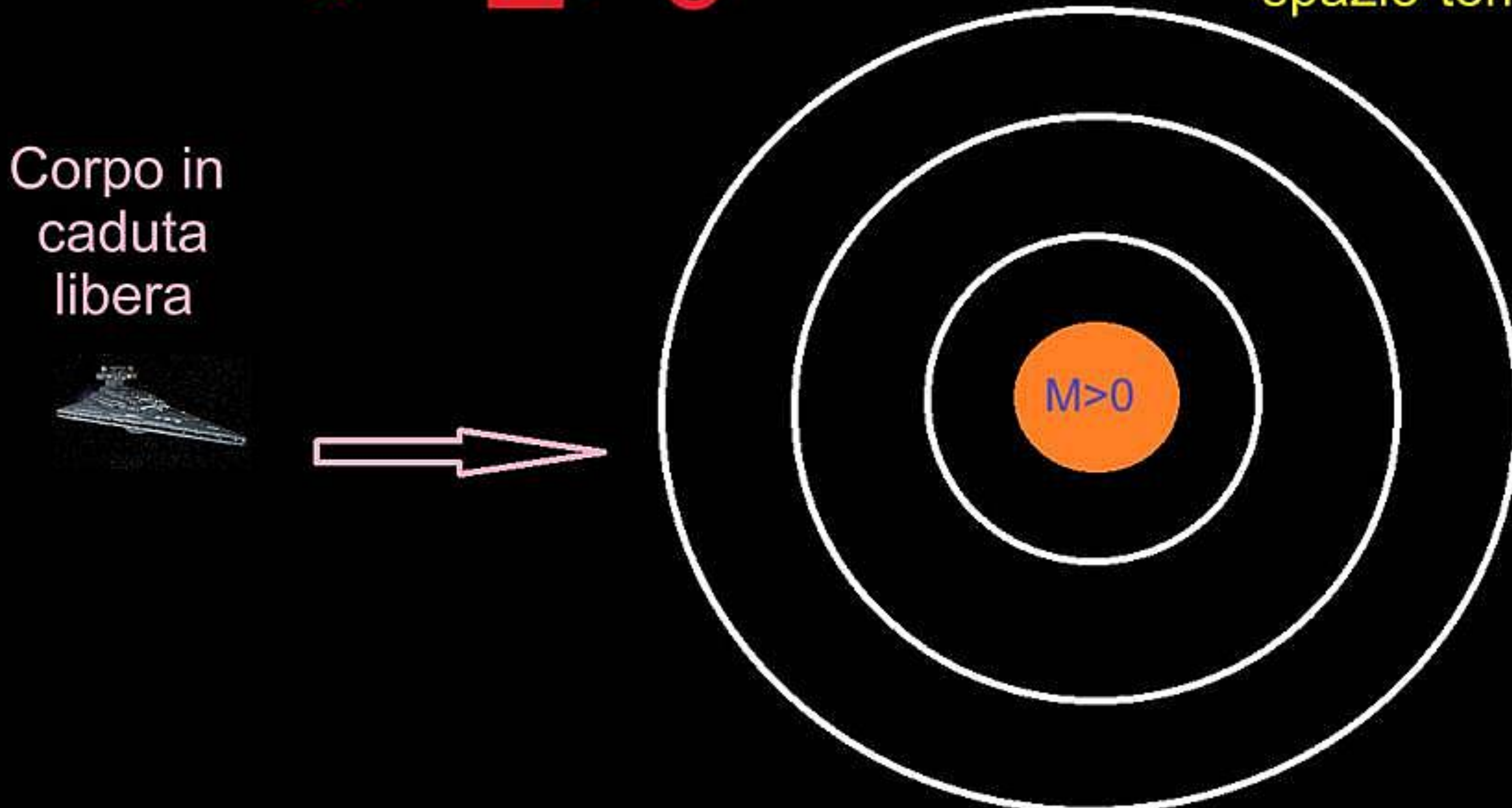
p = pressione laterale

Curvatura = $\dfrac{G\rho}{c^2}$

$\dfrac{G}{c^2}$ = 7.4 x 10^{-30} m/Kg

Energia E>0

Geodetiche dello spazio-tempo



Massa positiva ⇨ Curvatura positiva

Gravità attrattiva

Che succede se nel Tensore di Stress-Energia si pone una densità di massa negativa?

...anche l'Energia deve essere negativa...

Che succede al Tensore metrico?

Elementi del tensore $T_{\mu\nu}$

$T_{tt} = \rho \cdot c^2$ è la densità di massa-energia.

Energia
Negativa

$T_{rr} = -\tau$ è la tensione radiale

$T_{\theta\theta} = p$ è la pressione laterale

$T_{\varphi\varphi} = p$ è di nuovo la pressione laterale

dell'equazione di Einstein:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}\, g_{\mu\nu} R = -[8\,\pi\, G/c^4]\, T_{\mu\nu}$$

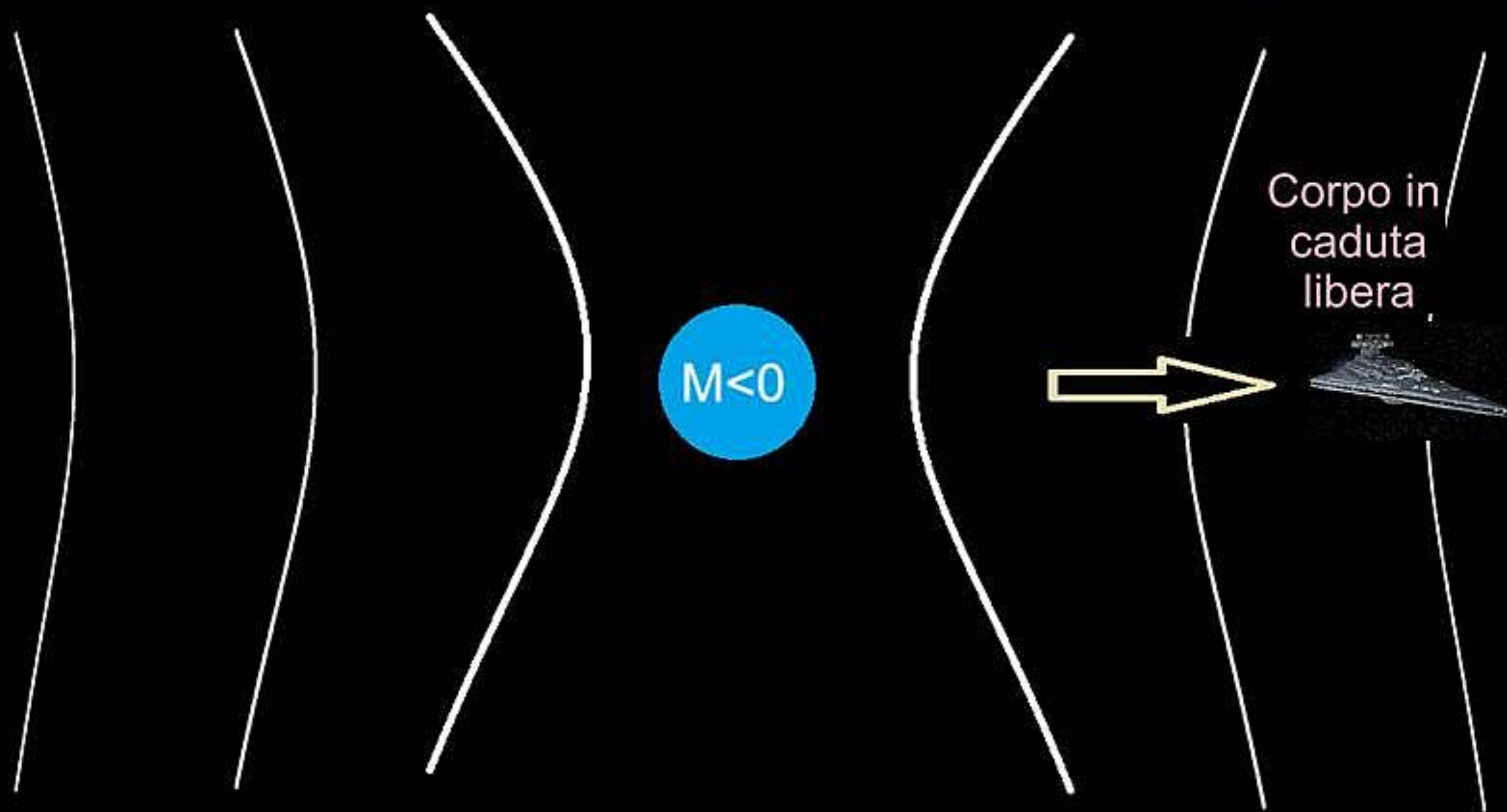
se $T_{tt} = \rho \cdot c^2 < 0 \Rightarrow m/V \cdot c^2 < 0 \Rightarrow E/V < 0$

E = energia negativa, energia del vuoto, energia esotica

Geodetiche dello spazio-tempo

Energia E<0

Geodetiche dello spazio-tempo



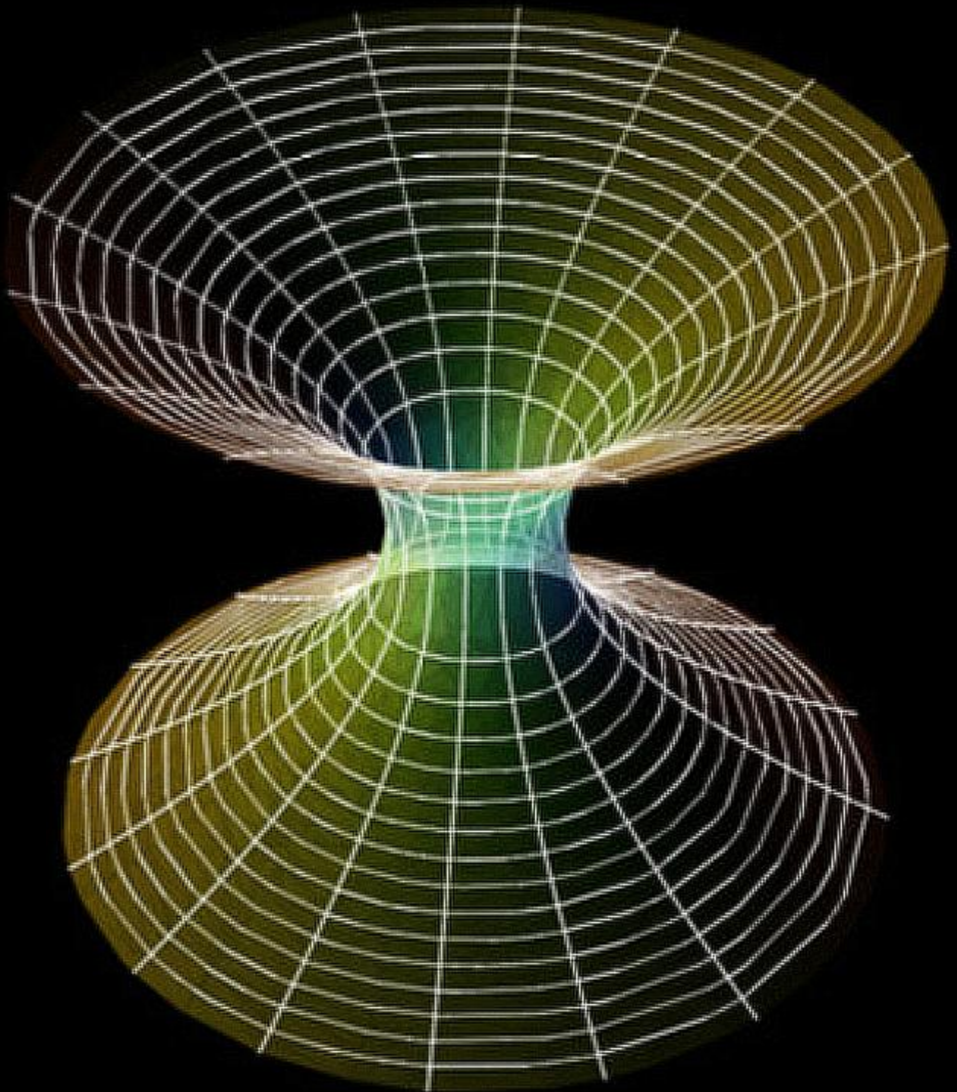
Massa negativa ⇨ curvatura negativa

Gravità repulsiva

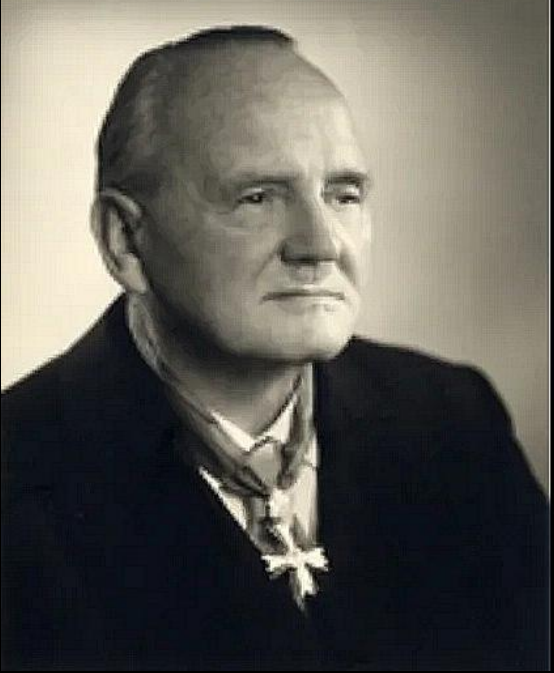
se $T_{tt} = \rho \cdot c^2 < 0 \Rightarrow m/V \cdot c^2 < 0 \Rightarrow E / V < 0$

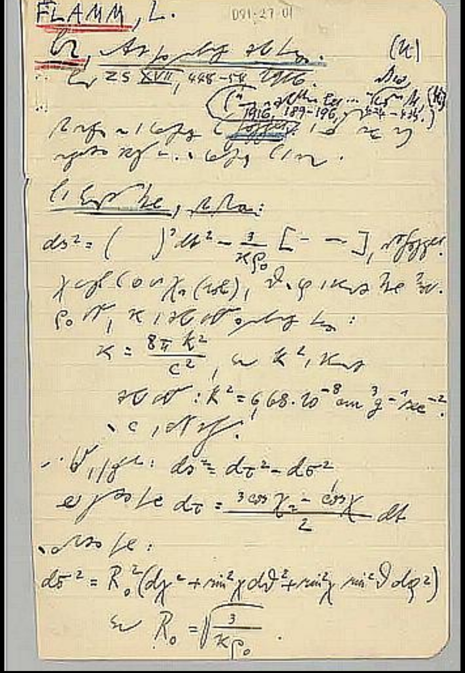
$$\text{Curvatura} = \frac{G\,\rho}{c^2} < 0$$

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



Geodetiche dello Spazio-Tempo





Chi ottenne per primo questo risultato?

Ludwig Flamm (Vienna, 20 gennaio 1885 – Vienna, 4 dicembre 1964)

Contributions to Einstein's theory of gravitation.

by L u d w i g F l a m m .

A. E i n s t e i n has significantly improved the understanding of his new theory of gravitation by the summary which he gave recently.[1])*1 The popular accounts given by M. B o r n[2]) and E. F r e u n d l i c h[3]) have also been clarifying. However, the exact solutions for gravitational fields with spherical symmetry, which were found and discussed by K. S c h w a r z s c h i l d[4]) are particularly instructive. In the present lines, the author wishes to add further conclusions to these. In particular, the remarkable properties of the gravitational field will be made quite clear. In this way, the physical assumptions of the general theory of relativity might perhaps appear even more

... l can be treated ... of the constants

... d inside a ball of ... er. The presence

Original paper: Ludwig Flamm, Beiträge zur Einsteinschen Gravitationstheorie, *Physikalische Zeitschrift* XVII (1916), pp. 448–454.

Ecco come funziona...

Se temete di non sopravvivere saltate pure questa slide...

L'equazione del campo gravitazionale di Einstein è la seguente:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - ½\, g_{\mu\nu} R = -[8\, \pi\, G/c^4\,]\, T_{\mu\nu}$$

Dove $G_{\mu\nu}$ è il tensore di curvatura di Einstein, $R_{\mu\nu}$ è il tensore di curvatura di Ricci, R è lo scalare di Ricci che corrisponde alla traccia (la diagonale principale) del tensore $R_{\mu\nu}$ e $T_{\mu\nu}$ è il tensore sforzo-energia cioè una quantità matriciale che codifica la densità e il flusso dell'energia e della quantità di moto di una sorgente di materia, di fatto quella che genera il campo gravitazionale, G è la costante di gravitazione universale di Newton (6,673 x 10^{-11} Nm^2/kg^2) e c è la velocità della luce nel vuoto (3 x 10^8 m/sec). In termini molto semplificati, questa relazione afferma che la gravità, non è una forza, bensì è una manifestazione della curvatura locale dello spazio-tempo la cui geometria è definita dagli elementi del tensore $G_{\mu\nu}$ che nel caso generale sono 16, ma che in realtà, salvo casi particolari, sono solo 4 diversi da zero. Gli indici greci $\mu = 0, \dots, 3$ e $\nu = 0, \dots, 3$ indicano le coordinate spazio-temporali $X_0, \dots, X_3$, tali che $X_1, \dots, X_3$ sono le coordinate spaziali e X_0 è la coordinata temporale.

Questi requisiti ci portano quindi a definire la seguente metrica sfericamente simmetrica in uno spazio-tempo lorentziano a simmetria sferica, ds^2 la quale descrive la geometria del wormhole attraversabile.

$$ds^2 = - e^{2\Phi(r)} c^2 dt^2 + [1-b(r)/r]^{-1} dr^2 + r^2 d\Theta^2$$

dove:

$$d\Theta^2 = d\theta^2 + sin^2\theta\, d\varphi^2$$

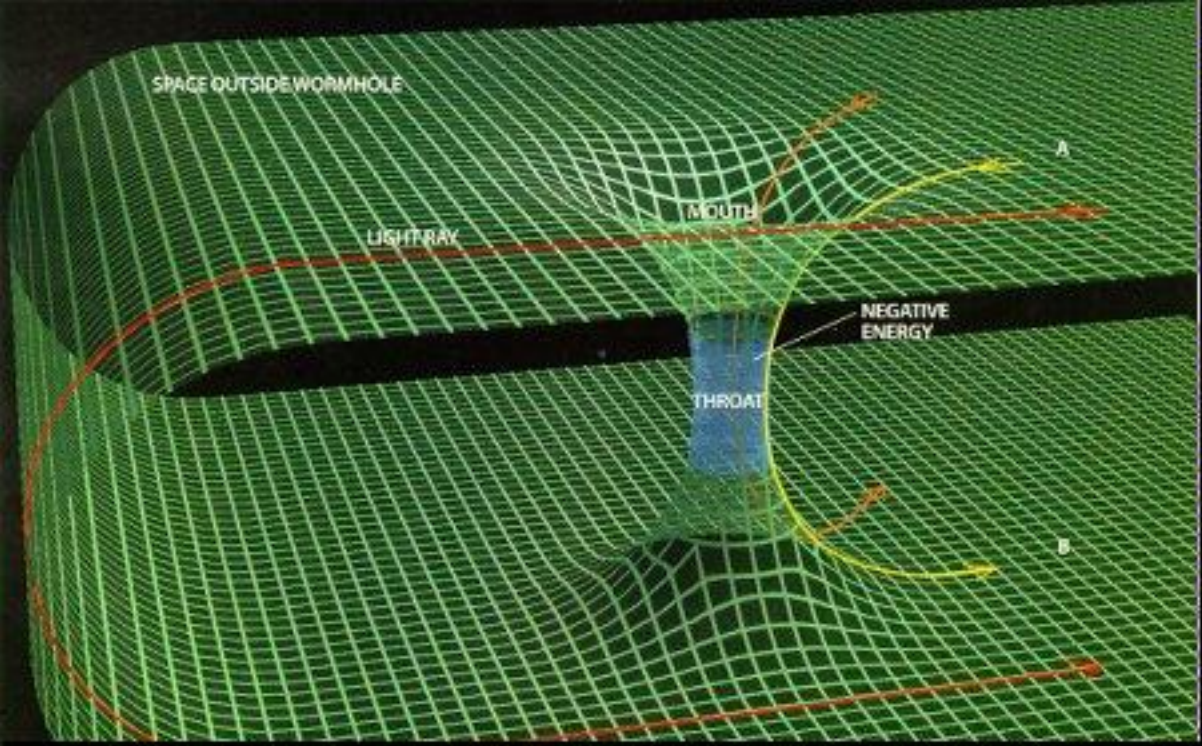
in coordinate polari standard (r,θ,φ). Ricordiamo che una metrica spaziale, ds è una funzione di distanza Lorentz-invariante tra due punti qualsiasi dello spazio-tempo, definita da:

$$ds^2 = g_{\mu\nu}\, dx^\mu\, dx^\nu$$

dove $g_{\mu\nu}$ è il tensore metrico che è una matrice di 4x4 =16 elementi che codifica la geometria dello spazio-tempo e dx^μ è la separazione infinitesima tra due punti di coordinate x^μ e x^ν. La funzione $\Phi(r)$ è una funzione di *redshift* liberamente specificabile che definisce il tempo proprio di attraversamento della gola del wormhole e $b(r)$ è una funzione di forma liberamente specificabile che definisce la geometria spaziale (ipersuperficie) della gola del wormhole.

Wormholes

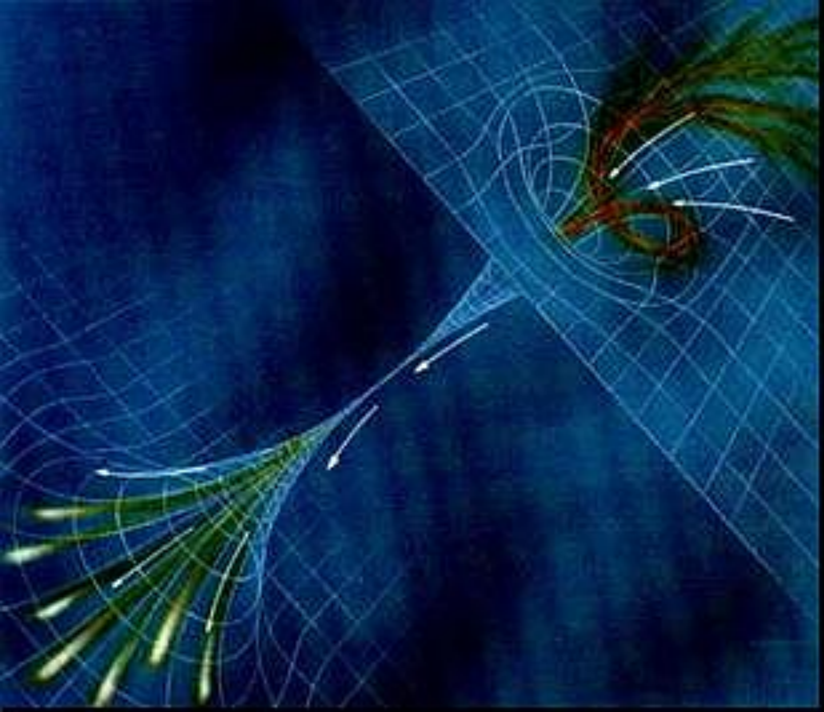
Una scorciatoia attraverso lo spazio-tempo



Tale possibilità è rappresentata dai Wormhole, o pointi di Einstein-Rosen. Questi buchi neri hanno caratteristiche speciali:

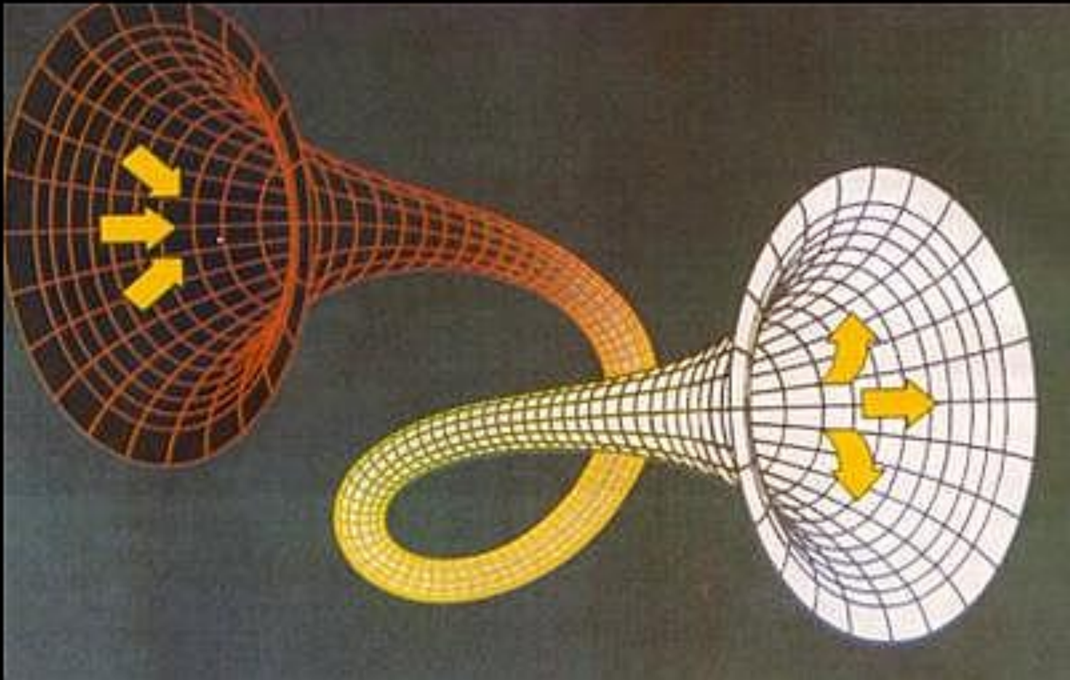
- Devono essere rotanti
- Devono avere una massa molto grande, almeno 1000 masse solari

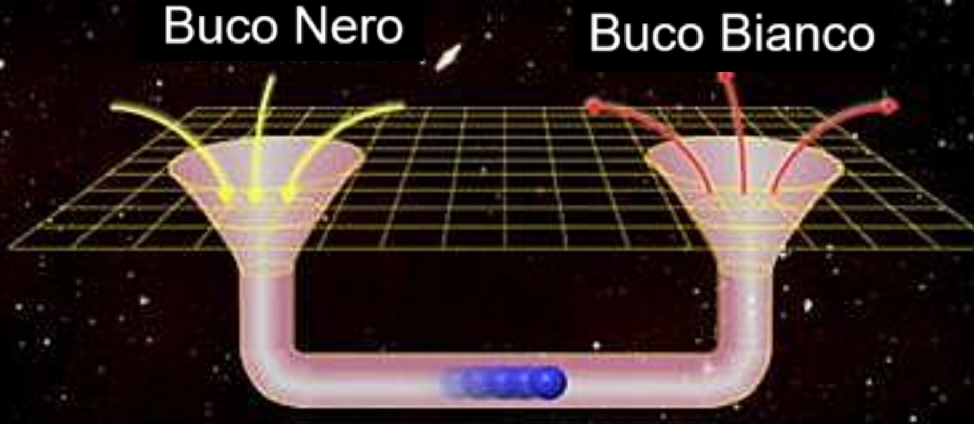
Il primo requisito risulta necessario per l'attraversamento del wormhole: un buco nero rotante potrebbe non avere una singolarità nel suo centro, bensì una specie di anello. In questa maniera sarebbe possibile attraversarlo senza necessariamente finirvi addosso. Il secondo requisito è necessario per la sopravvivenza di qualsiasi oggetto dopo aver attraversato l'orizzonte, infatti avendo una grande massa, e quindi un grande raggio, le forze che vengono esercitate su un oggetto che attraversasse l'orizzonte potrebbero essere sopportabili.



Oppure potrebbero collegare due universi paralleli e risultare quindi essere, oltre che dei passaggi tra due tempi e spazi differenti, anche tra due universi. Quest'ultima possibilità semplificherebbe la diatriba intorno ai problemi che il viaggio nel tempo crea, in quanto modificando il passato dell'universo di arrivo non modificheremmo il nostro.

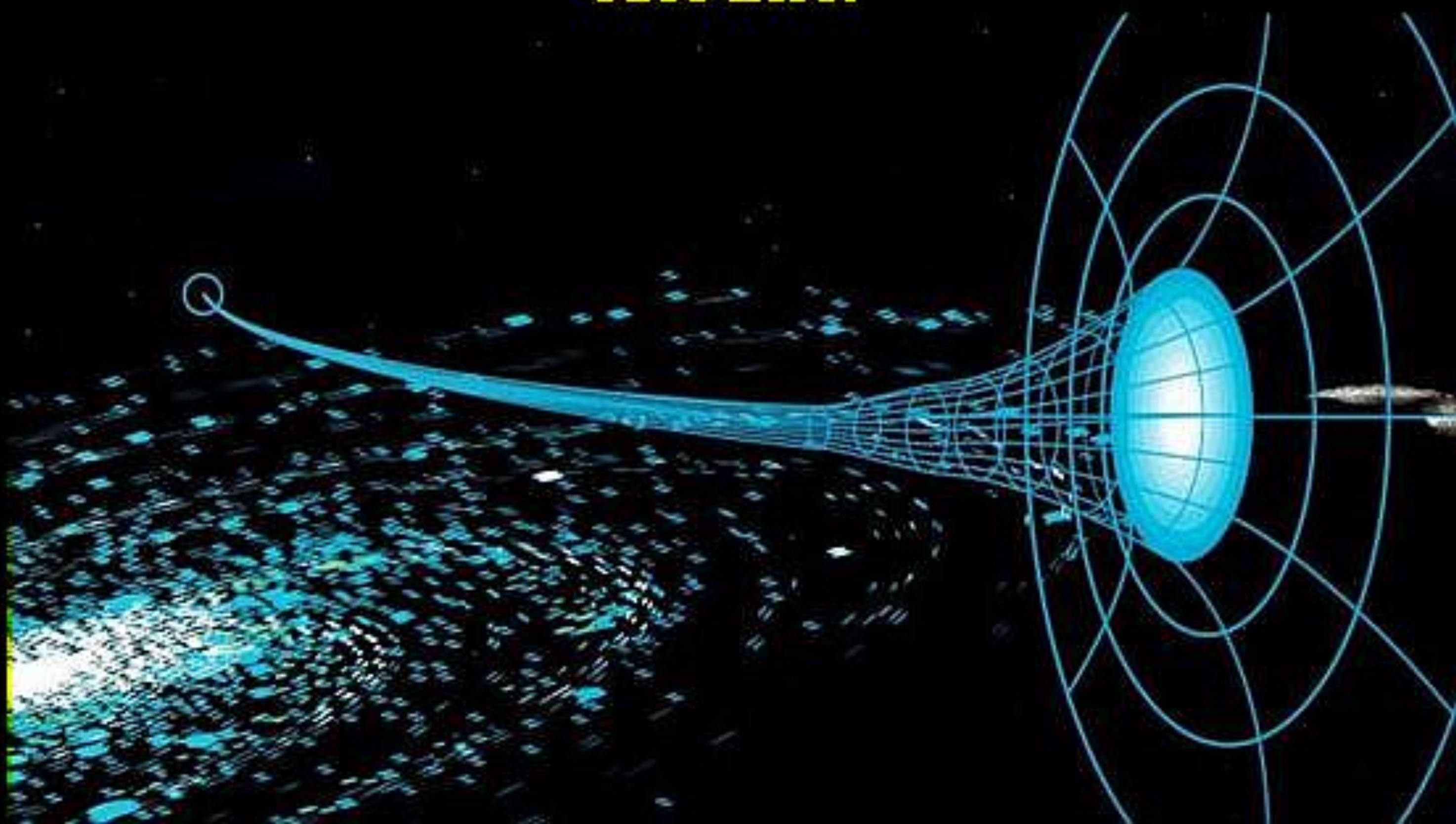
Anche queste "macchine del tempo" risultano avere delle problematiche: prima di tutto non si sa con precisione quali siano le leggi fisiche dopo aver attraversato l'orizzonte, inoltre non sarebbe possibile un viaggio di ritorno e saremmo costretti dall'altra parte.





Questi cunicoli potrebbero collegare zone diverse dello stesso universo, quindi rappresentare scorciatoie che ci farebbero viaggiare nel tempo e nello spazio.

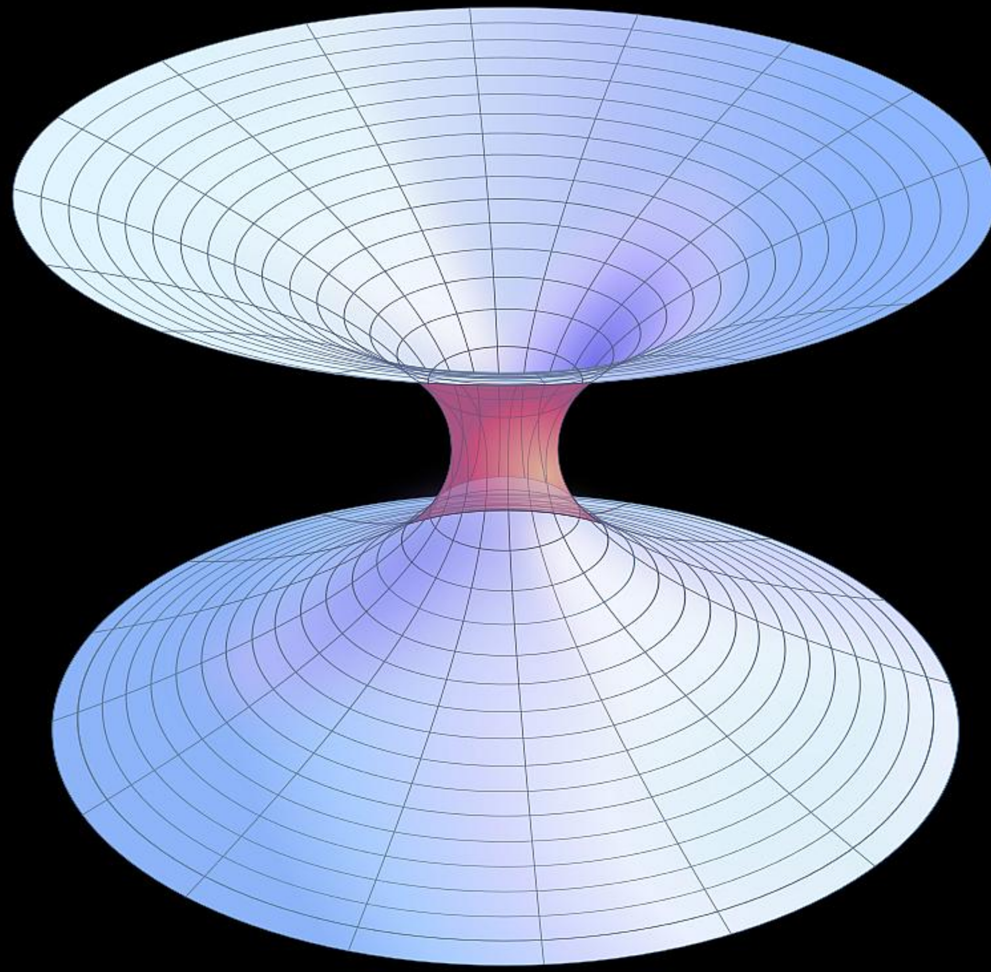
Anche in un caso di pieno rispetto dei due requisiti fondamentali, niente però ci assicura un viaggio proficuo. Infatti per un viaggio di tale genere sono necessari altri corpi detti “buchi bianchi” che espellono la materia catturata dal buco nero.



Con gli Wormhole Lorentziani è più semplice…

Gli Wormholes Lorenziani non hanno singolarità e nemmeno un orizzonte degli eventi quindi sono attraversabili.

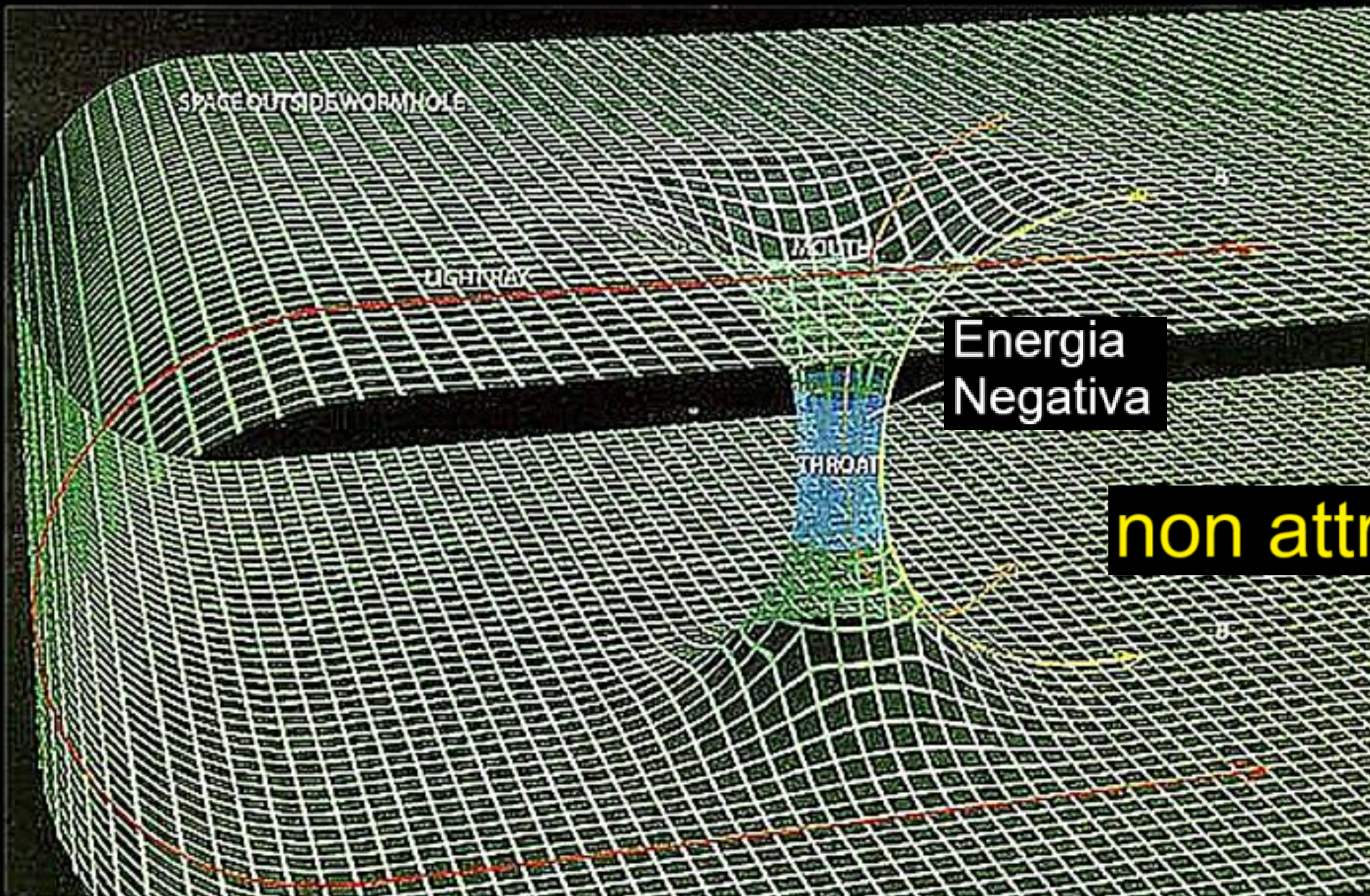
Basta progettarli bene…



Un wormhole lorenziano bidimensionale che può collegare due punti distanti dello stesso universo oppure due differenti universi.

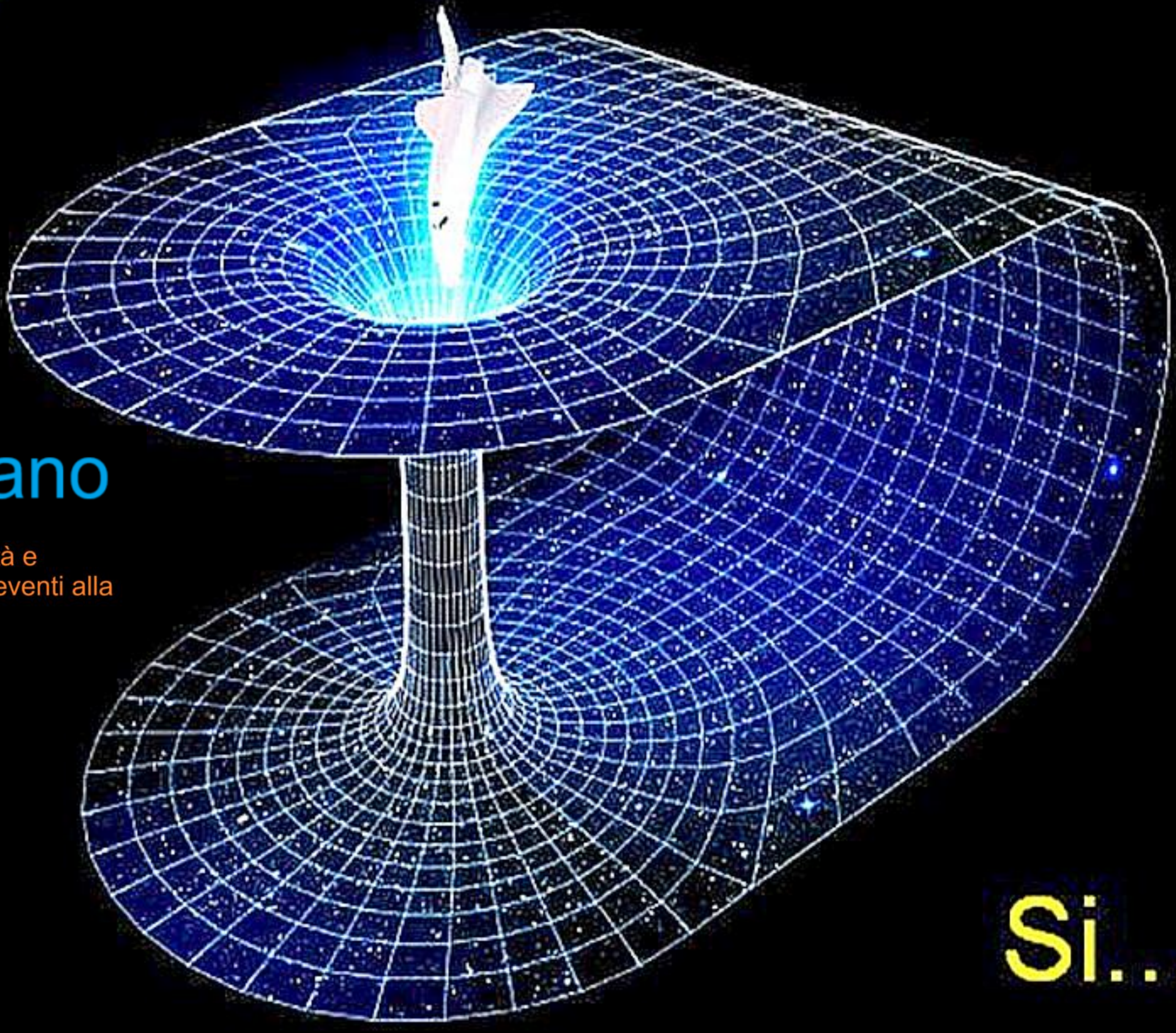
Senza singolarità e
senza orizzonte degli eventi alla
strozzatura

Ponte di Einstein-Rosen (Wormhole)



Nell'Universo la distanza non è costante, ma dipende dalla curvatura dello Spazio-Tempo

Si può passare attraverso?



Lorentziano

Senza singolarità e
senza orizzonte degli eventi alla
strozzatura

Si....

Requisiti per un wormhole attraversabile

1) Il tempo di viaggio attraverso il tunnel o la gola del wormhole dovrebbe essere di circa 1 anno, come visto sia dagli astronauti in viaggio che dagli osservatori statici esterni.

2) Il tempo proprio misurato dagli astronauti non deve essere dilatato da effetti relativistici.

3) Quando si attraversa il wormhole, l'accelerazione gravitazionale e l'accelerazione mareale-gravitazionale tra le diverse parti del corpo dei viaggiatori devono essere dell'ordine di 1g o in altre parole, circa pari all'accelerazione di gravità vicino alla superficie terrestre: $1g = 9{,}81\ m/s^2$. (viaggio confortevole)

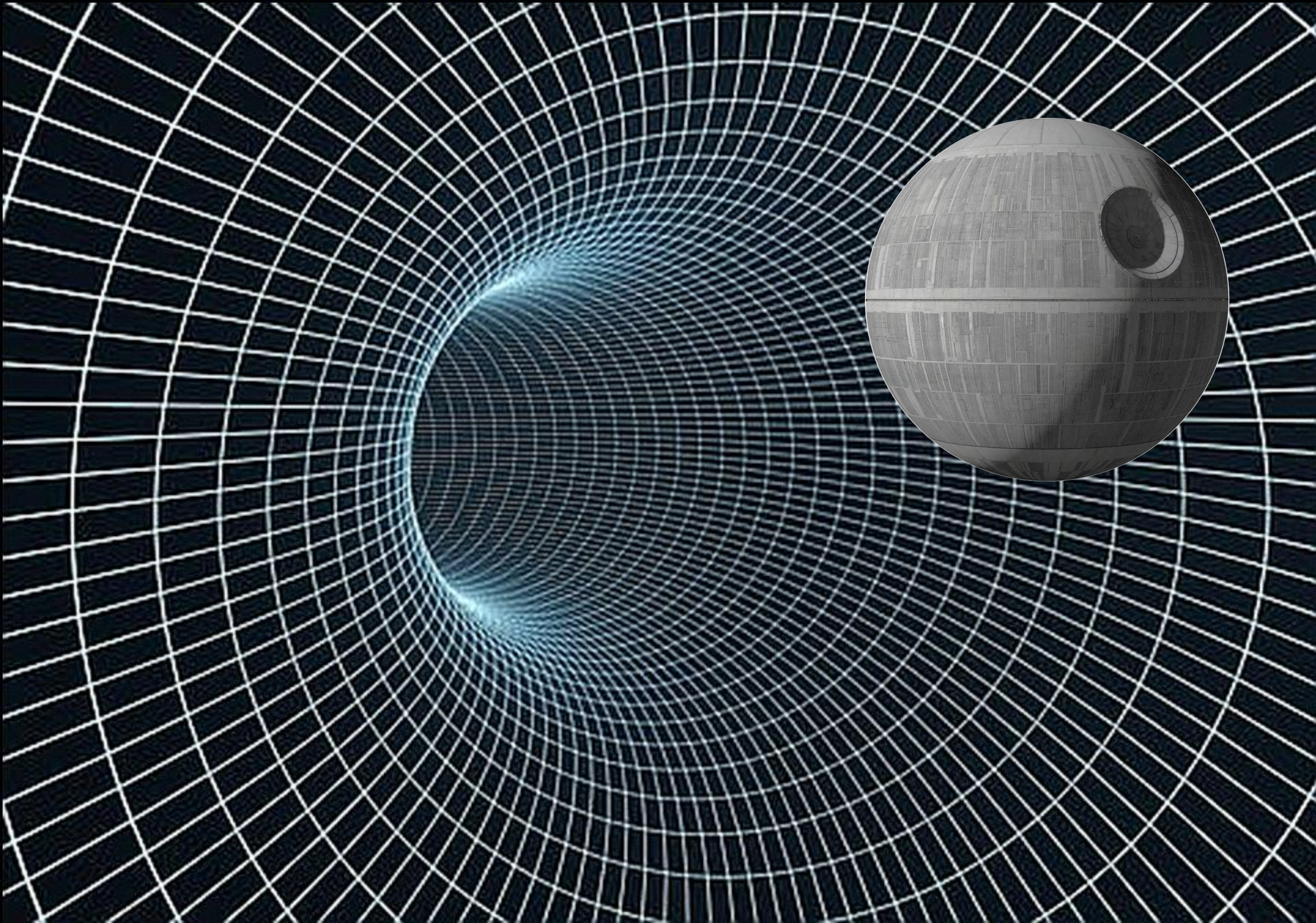
4) La velocità reale di viaggio attraverso il tunnel spazio temporale dovrebbe essere: $v \ll c$.

5) Gli astronauti umani e quindi composti da materia ordinaria non devono fondersi con il materiale che genera la curvatura del wormhole. Il wormhole deve essere attraversato da una sorta di tubo vuoto attraverso il quale i viaggiatori possano muoversi.

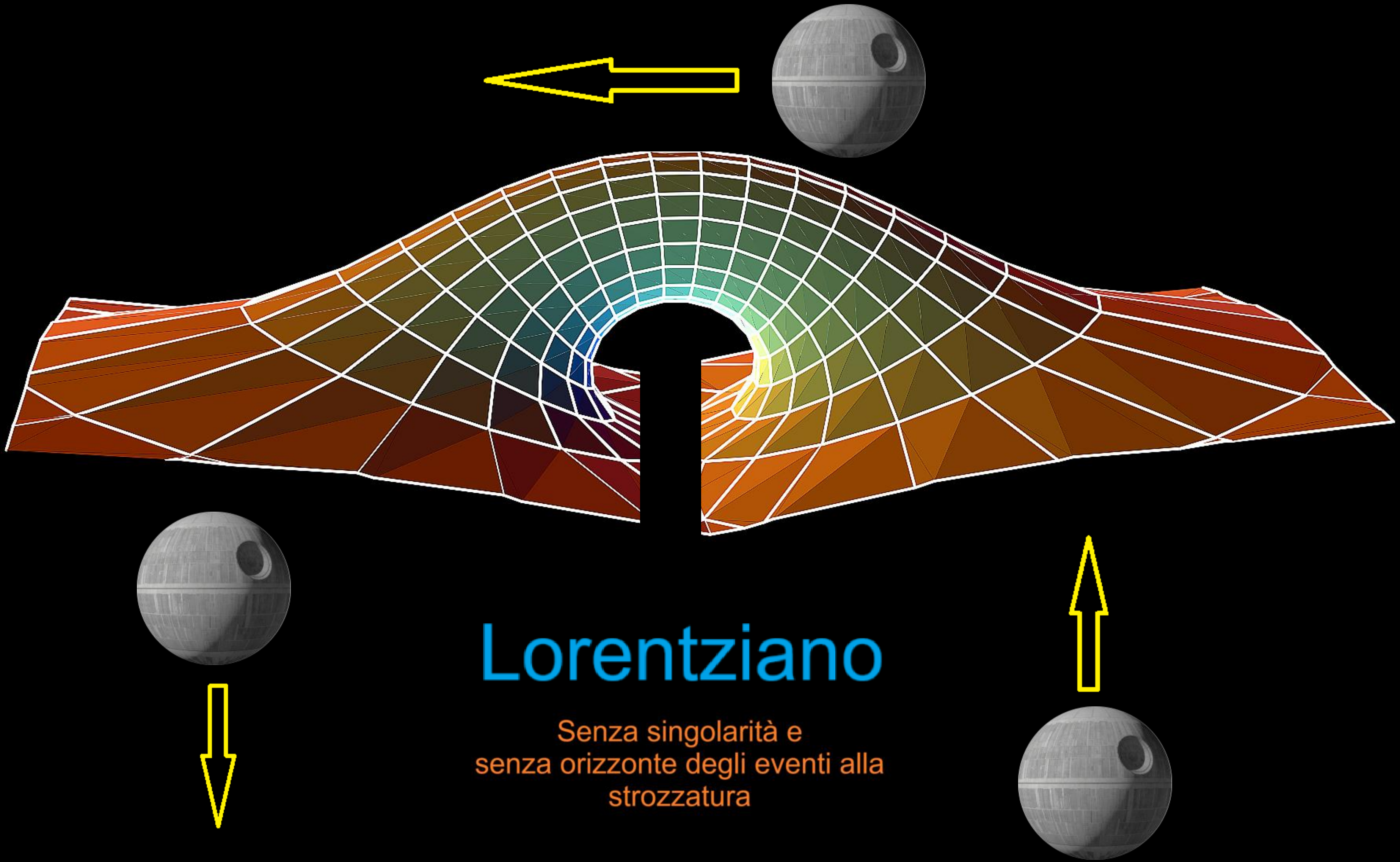
6) Non deve esistere un orizzonte degli eventi nella gola del wormhole, altrimenti si potrebbe verificare un'inversione temporale.

7) Non deve esistere una singolarità nella gola del wormhole, oppure della materia infinitamente collassata. Questo ucciderebbe immediatamente gli astronauti.

Cunicolo spazio- temporale



Wormhole attraversabile che connette due regioni distanti dello stesso universo

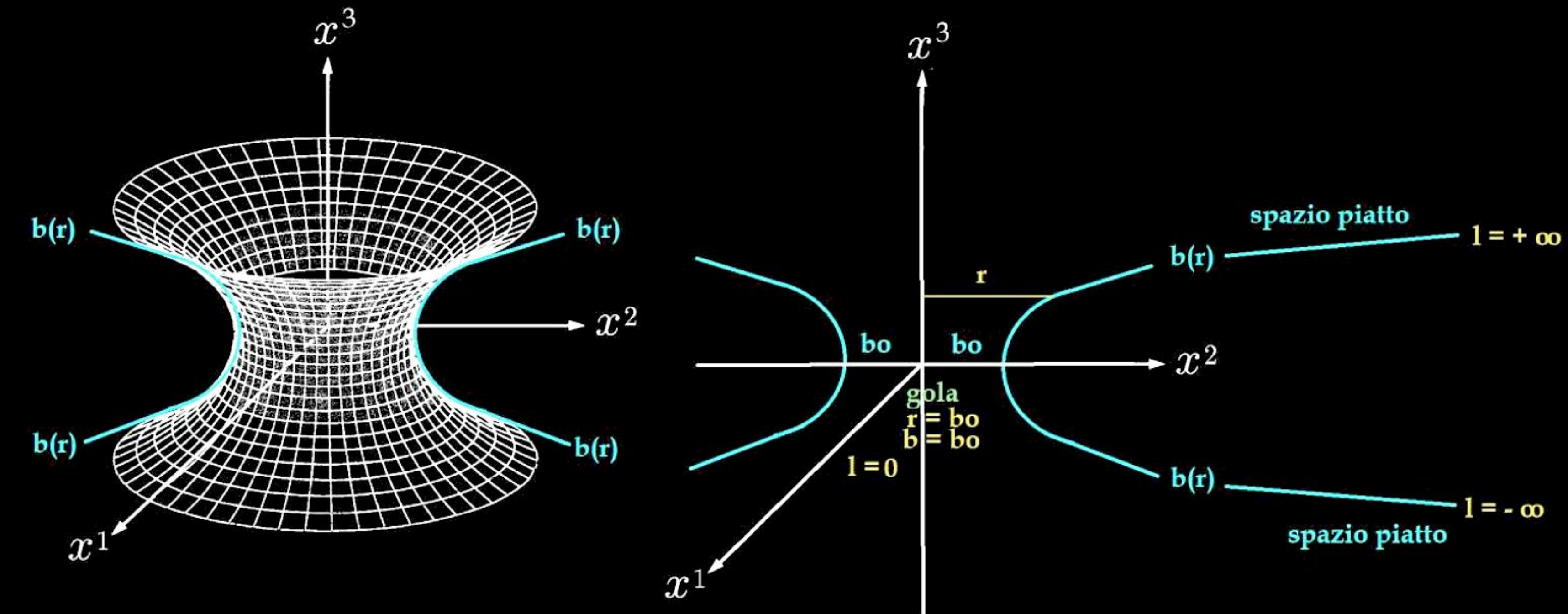


Lorentziano

Senza singolarità e
senza orizzonte degli eventi alla
strozzatura

Progettiamo un wormhole attraversabile

Lorentziano



schema esplicativo

Soluzione

Sia $b(r)$ una funzione arbitraria che definisce il profilo del wormhole, (vedere lo schema precedente) dove r è la distanza di ogni punto dall'asse di simmetria $\mathbf{X}^3$ e sia $\Phi(r) = 0$ una funzione che descrive gli effetti della forza mareale esercitata dalla materia che compone il wormhole, allora per generare e tenere aperto quel particolare wormhole con un'ampiezza della gola pari a b_o sono necessarie una densità di materia/energia $\rho(r)$ pari a:

$$\rho(r) = (db(r)/dr) \cdot c^2 / (8 \cdot \pi \cdot G \cdot r^2)$$

Energia Negativa

una tensione $\tau(r)$ pari a:

$$\tau(r) = b(r) \cdot c^4 / (8 \cdot \pi \cdot G \cdot r^3)$$

e una pressione laterale $p(r)$ pari a:

$$p(r) = [b(r) - (db(r)/dr)] \cdot c^4 / (16 \cdot \pi \cdot G \cdot r^3)$$

dove $(db(r)/dr)$ è la derivata prima della funzione arbitraria $b(r)$.

Questa soluzione è una delle tante possibili che possono essere ottenute manipolando opportunamente l'equazione del campo gravitazionale di Einstein.

Elementi del tensore $T_{\mu\nu}$

$T_{tt} = \rho \cdot c^2$ è la densità di massa-energia.

$T_{rr} = -\tau$ è la tensione radiale

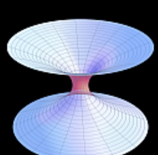
$T_{\theta\theta} = p$ è la pressione laterale

$T_{\varphi\varphi} = p$ è di nuovo la pressione laterale

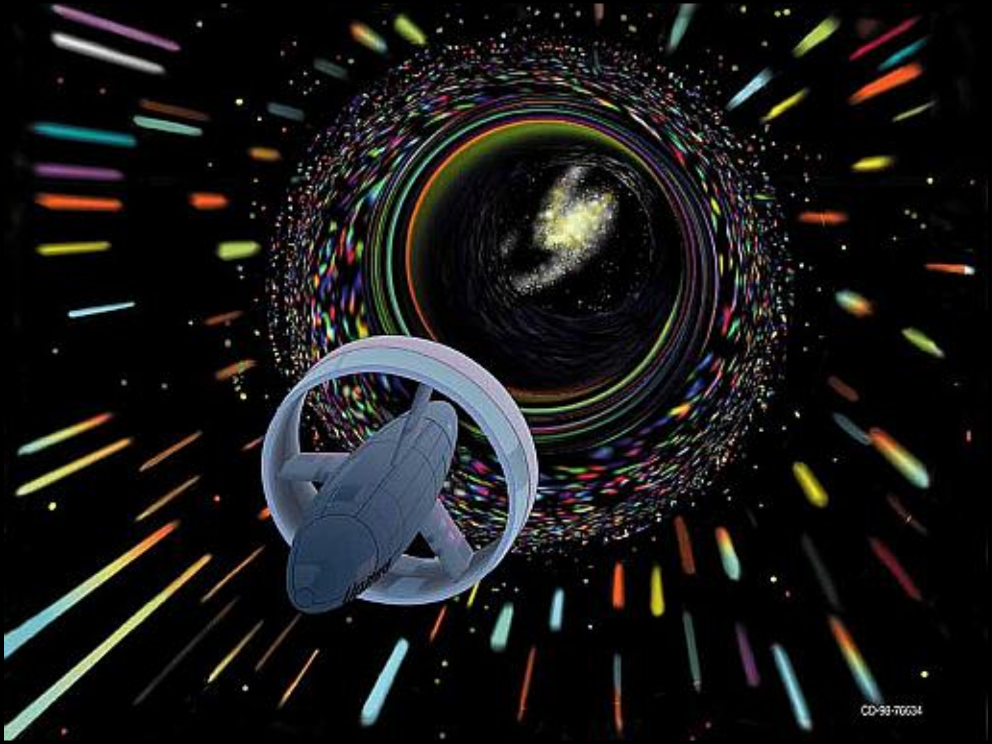
Energia Negativa

dell'equazione di Einstein:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}\, g_{\mu\nu} R = -[8\,\pi\, G/c^4\,]\, T_{\mu\nu}$$



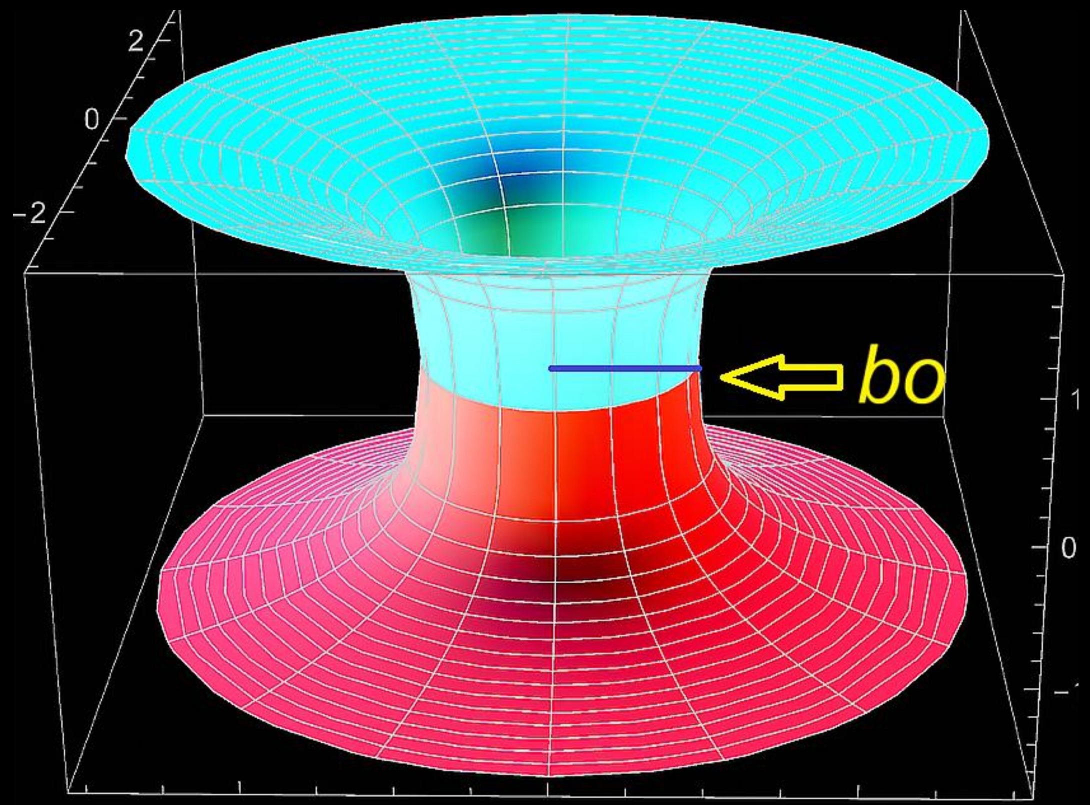
Riassumendo abbiamo che (equazione di campo) + (assenza di orizzonte degli eventi nella gola del wormhole) implicano che $\tau > \rho \cdot c^2$ nella gola che a sua volta implica che gli astronauti che si muovono ad alta velocità entro la gola del wormhole vedono la presenza di una massa-energia negativa e questo viola le tre fondamentali condizioni energetiche: a) la condizione di energia debole (WEC), b) la condizione di energia forte (SEC) e c) la condizione di energia dominante (DEC) , in parole povere vedranno la presenza di materia esotica che potrebbe (ma non lo sappiamo per certo) essere proibita dalle leggi della Fisica.



Un esempio semplicissimo potrebbe essere $b(r) = bo + \sqrt{(r)}$ con ad esempio $bo = 1000$ *metri*. Ricordiamo che le unità di misura sono quelle tipiche del sistema MKS quindi metri, kilogrammi, secondi, etc. Ricordatevi che un wormhole attraversabile è costoso, vi servirà una massa negativa (esotica) pari a:

$$M_{wh} = -(2.7 \times 10^{27} \cdot bo)\ kg$$

Per generare l'energia oscura (negativa) per poterci passare dentro e per tenerlo aperto per poter tornare a casa…



aspetto di un Wormhole

Viaggi interstellari e intergalattici possibili

Massima velocità raggiungibile:

la velocità della luce

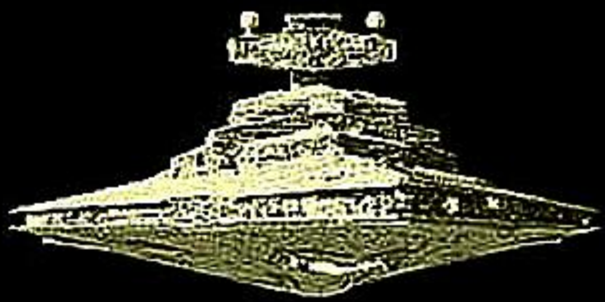
c = 300.000 Km/sec

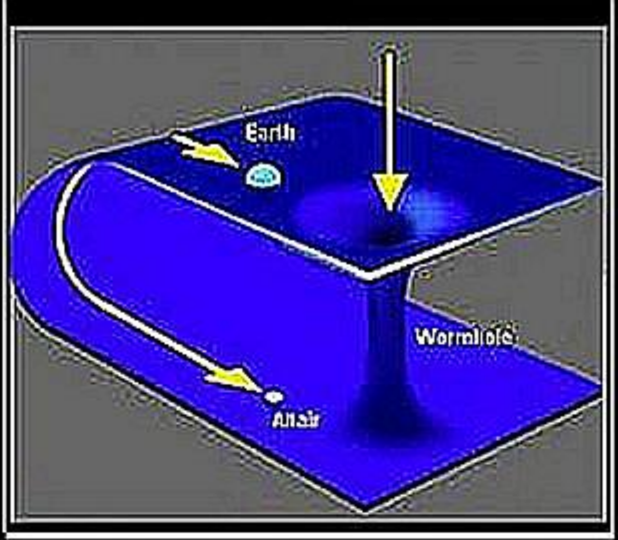
tempo di viaggio: massimo...

T(anni) = distanza (AL) / c

Esempio

Distanza Terra - Altair: 16,73 Anni Luce





Distanza: 16,73 AL x 365 g x 86400 s x 300000 Km/s

$= 1{,}6 \times 10^{14}$ Km

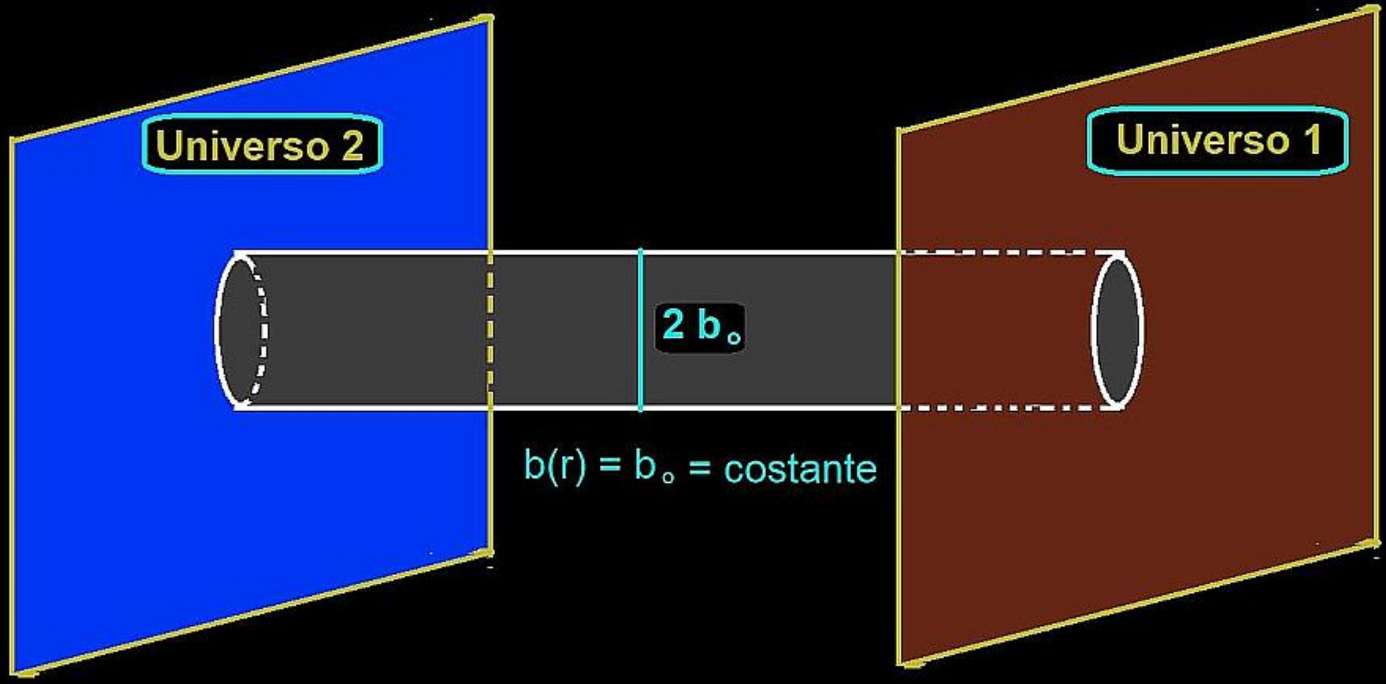
viaggiando a 25000 Km/h si impiegherebbero:
722736 anni

Passando per il wormhole: 50000 Km
... fattibile in 2 ore di viaggio

Velocità equivalente: 41,7 c

Un trucco…

più o meno infame,
giudicate voi...



Un wormhole che minimizza la richiesta di materia esotica per essere aperto e mantenuto, si ottiene imponendo la funzione arbitraria di forma $b(r)$ = *costante* = b_o lungo tutto il cunicolo il cui diametro è pari a $2{\cdot}b_o$. Il cunicolo cilindrico è a curvatura nulla quindi la densità di massa-energia richiesta per generarlo è pari a zero.

A questo punto è facile mostrare che la densità di massa $\rho(r) = \rho(b_o) = 0$ lungo tutto il cunicolo spazio-temporale e quindi anche la densità di energia $\rho(r) \cdot c^2 = \rho(b_o) \cdot c^2 = 0$.

Calcoliamo ora la tensione radiale τ e avremo:

$$\tau(r) = \tau(b_o) = c^4 /(8 \cdot \pi \cdot G \cdot b_o^2)$$

e ora la pressione laterale p e risulterà:

$$p(r) = p(b_o) = c^4 /(16 \cdot \pi \cdot G \cdot b_o^2)$$

La richiesta di massa esotica sarà quindi:

$$M_{wh} = - 2 \cdot b_o \cdot c^2 / G$$

anche la lunghezza del cilindro può essere ridotta a zero….

Soluzione STARGATE

permette l'attraversamento istantaneo del cunicolo spazio-temporale emergendo istantaneamente in un altro universo oppure da qualche parte nello stesso universo.

La richiesta di massa esotica sarà

$$M_{wh} = -\,2 \cdot b_o \cdot c^2 \,/\, G$$

$$M_{wh} = -(2.7 \times 10^{27} \cdot bo)\ kg$$

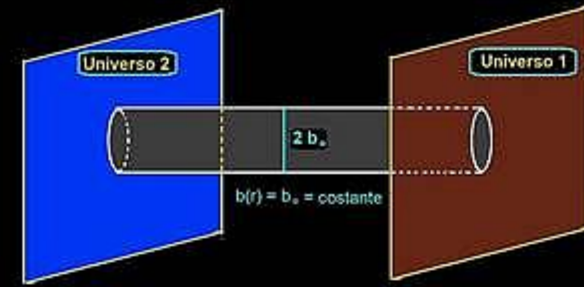
Massa negativa

La massa negativa è fuori dal corridoio quindi è attraversabile

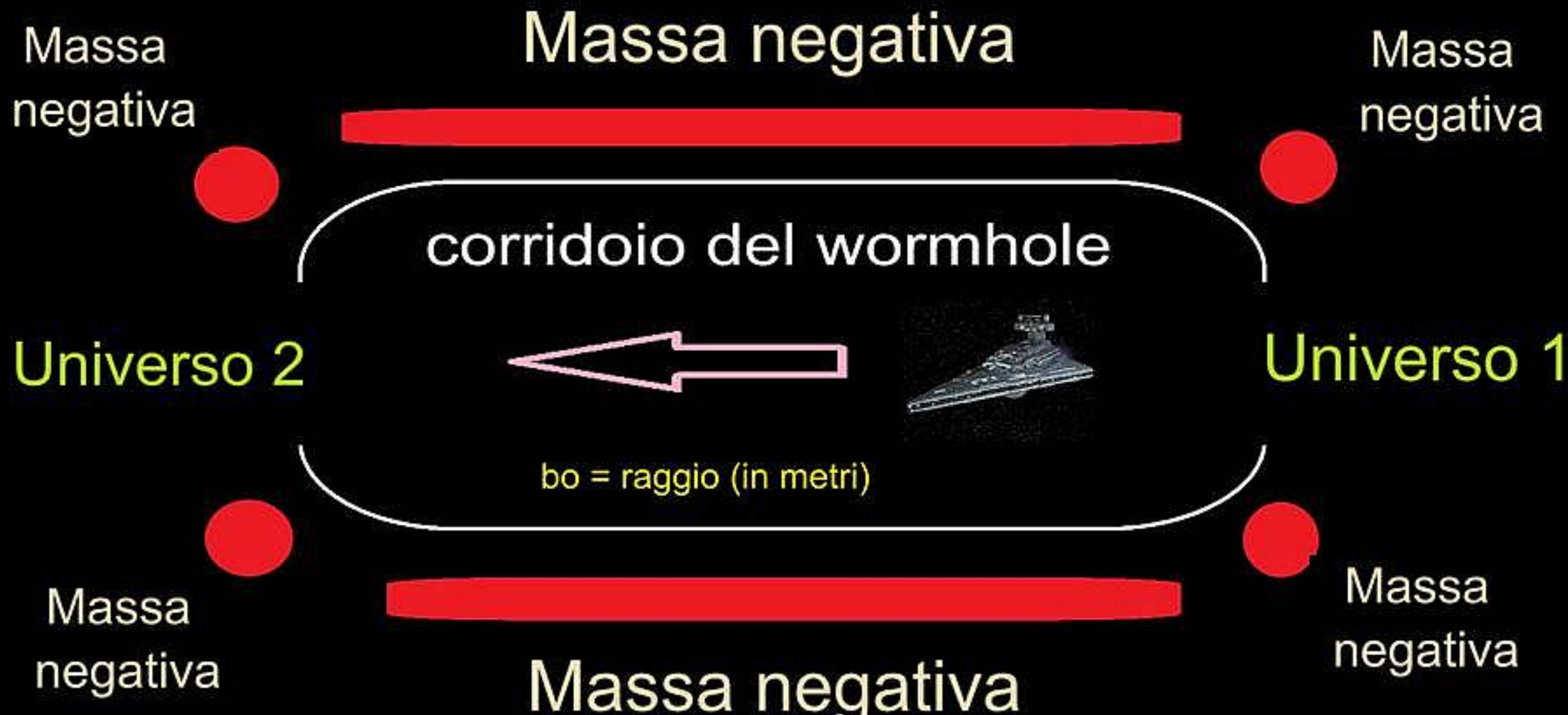
Densità di energia minore di zero

Occhio agli spigoli...

Gli spigoli netti
sono fratture nello
spazio-tempo!!!



$$M_{wh} = -(2.7 \times 10^{27} \cdot bo)\ \ kg$$



Un trucco infame non basta…
eccone uno doppiamente infame:

gli Wormholes Poliedrici

Un wormhole a sezione poligonale minimizza la quantità di Energia Esotica richiesta per tenerlo aperto.

Densità di massa negativa richiesta:

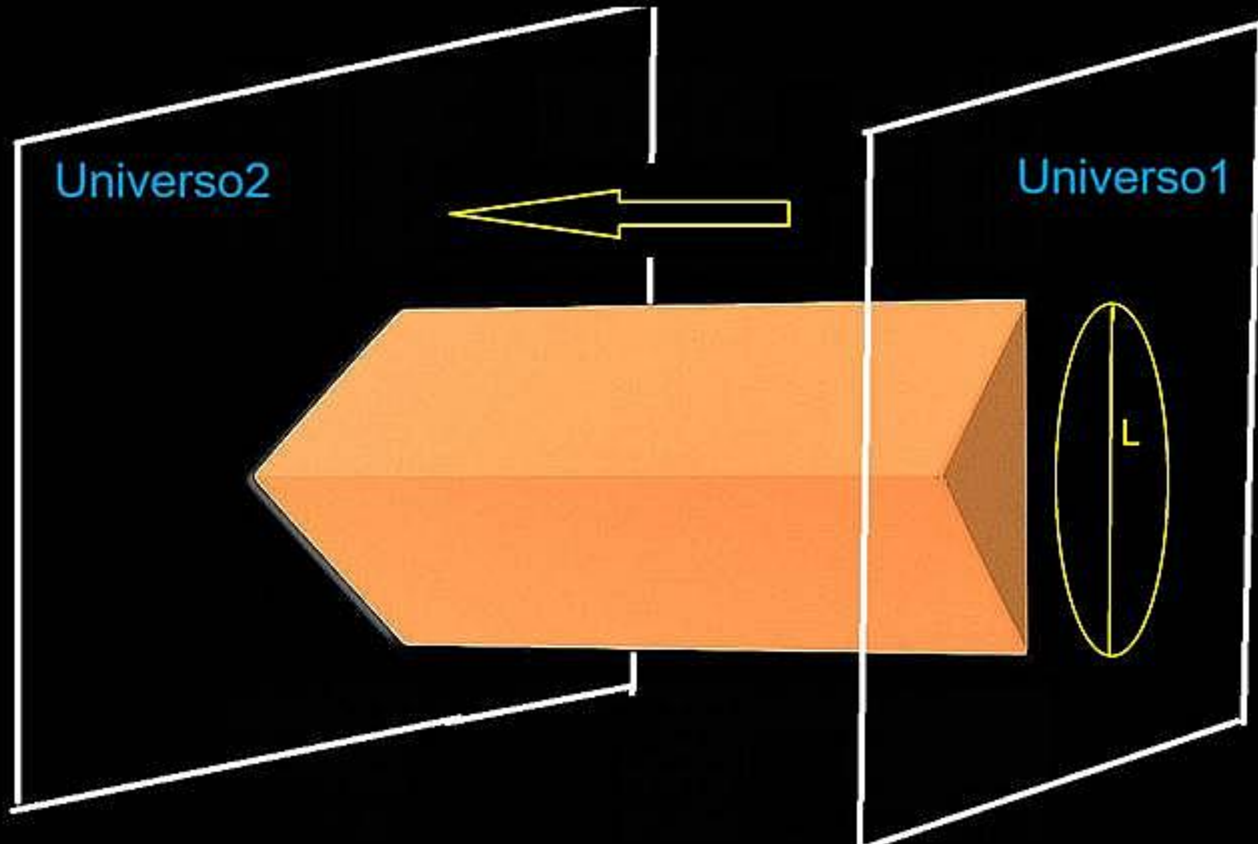
$$\rho = -\frac{(n-2)}{n} \cdot \frac{mp}{lp} \quad Kg/m$$

mp = massa di Plank

lp = lunghezza di Plank

n = numero degli spigoli

Wormhole di minima energia negativa



spigoli arrotondati!!

Gli spigoli netti sono fratture nello spazio-tempo!!!

$$\rho = -\frac{1}{3} \cdot \frac{mp}{lp} \quad Kg/m$$

ma:

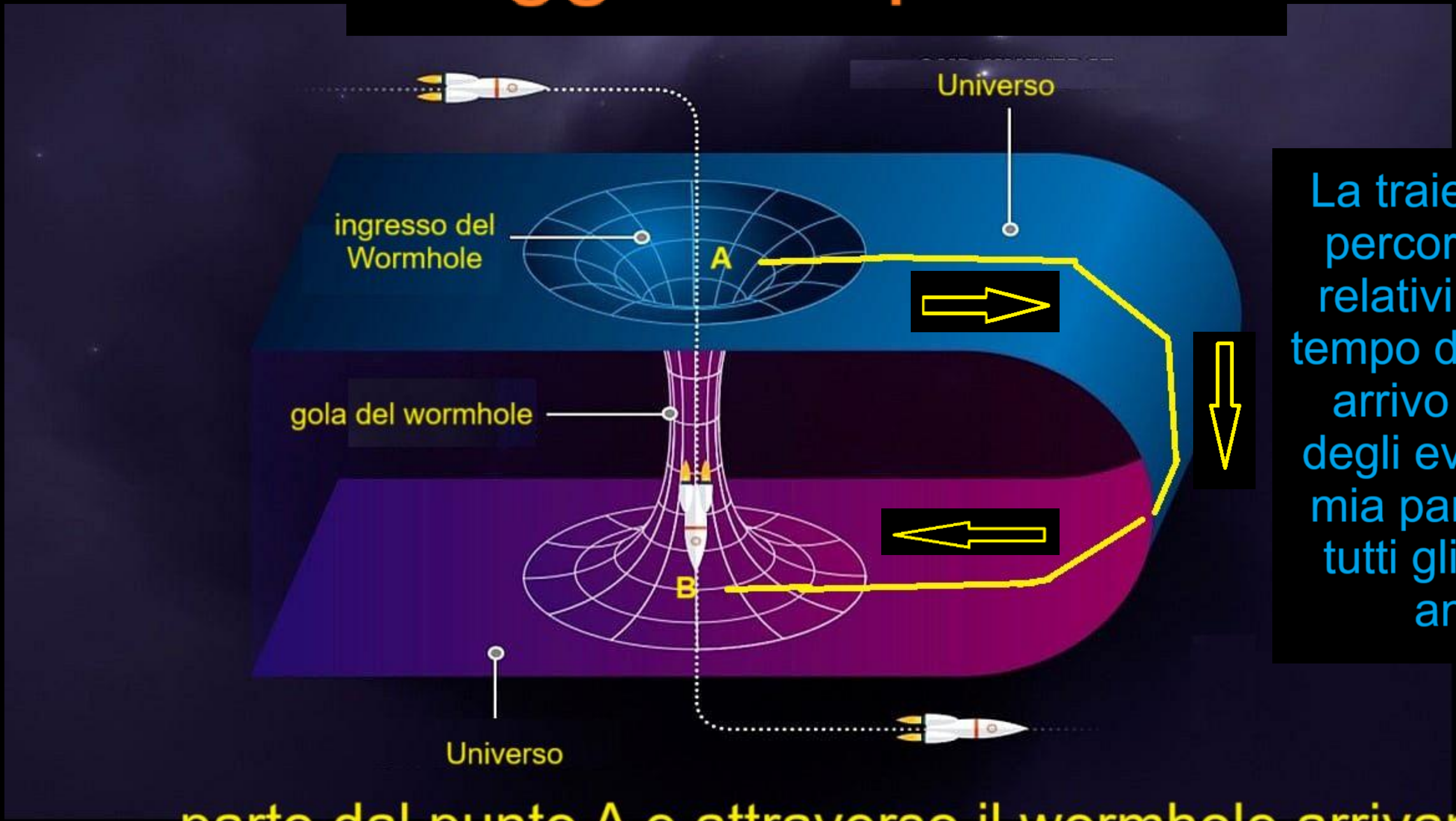
$$\frac{mp}{lp} = 1.35 \times 10^{27} \quad Kg/m$$

allora:

$$M_{wh} = 1.35 \times 10^{27} \cdot \frac{(n-2)}{n} \cdot L \quad Kg$$

L = Diametro del cerchio circoscritto alla sezione poligonale (metri)

Viaggio nel passato



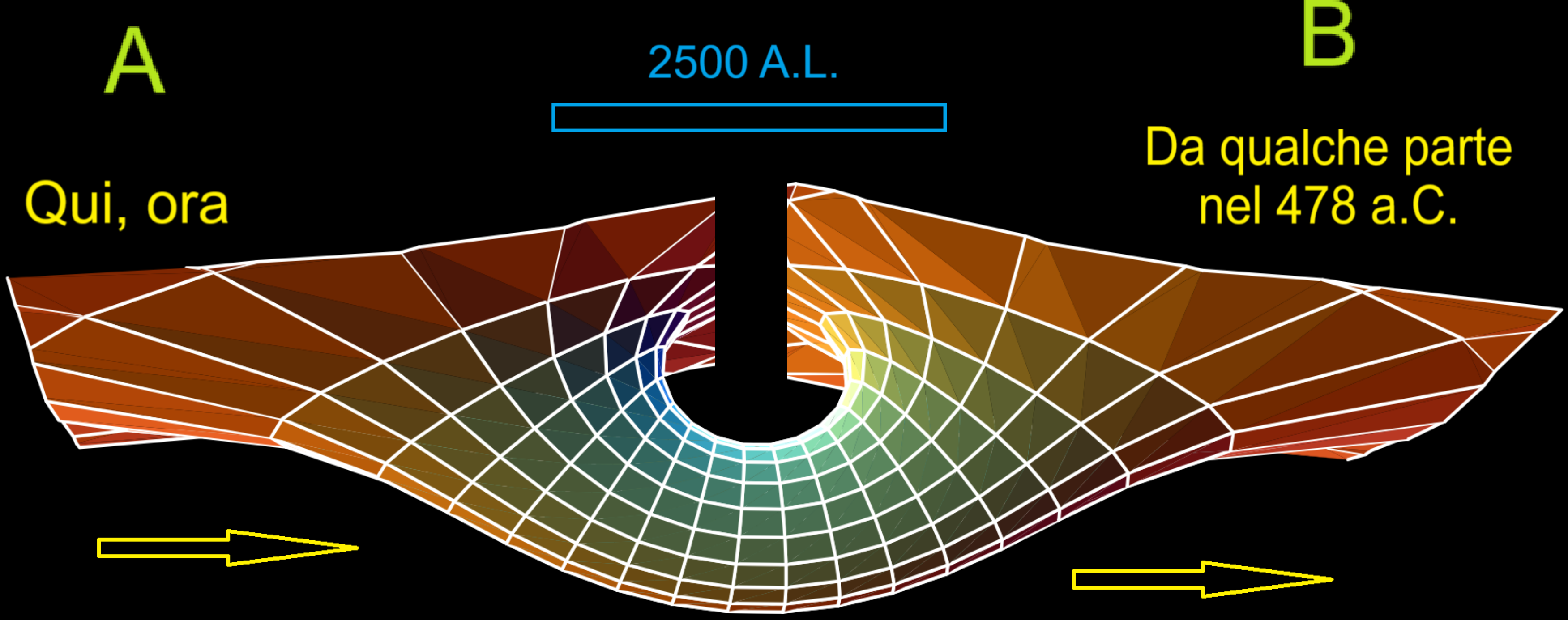
La traiettorie in giallo verrà percorsa dai raggi di luce relativi a tutti gli eventi del tempo della mia partenza. Io arrivo in B 10 anni prima degli eventi del tempo della mia partenza, quindi vedrò tutti gli eventi accaduti 10 anni prima in poi

parto dal punto A e attraverso il wormhole arrivando in B istantaneamente. Il raggio di luce che porta l'informazione del mio viaggio percorre la traiettoria in giallo da A a B impiegando 10 anni, quindi io arrivo in B 10 anni prima della notizia della mia partenza. Siccome il cunicolo può essere arbitrariamente corto, A e B coincidono e quindi io arrivo di nuovo in A in tempo per vedere la mia partenza...

Un interessante problema archeologico

Progetto un wormhole lorentziano che collega i due punti A e B distanti 2500 anni luce. Parto da A oggi e raggiungo B in un'ora. Arrivato in B assisto agli eventi avvenuti 2500 anni fa con lo sfasamento temporale di 1 ora perché quando arrivo io stanno arrivando i segnali (immagini) degli eventi accaduti 2500 anni fa, meno 1 ora. Mi trovo quindi nel 478 a.C.

Assisto agli eventi storici, ma non posso modificarli, perché al massimo modifico un segnale luminoso, non l'evento che è accaduto a 2500 A.L. di distanza. Questo è la Congettura della Censura Cronologica (Hawking e Penrose, Thorne e Politzer 2004)



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...

L'Energia del Vuoto

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

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

I_{co} = *Quantità di informazione contenuta nell'Universo*

$\hbar$ = *Costante di Plank ridotta*

c = *Velocità della Luce (c=300.000 Km/sec)*

R = *Raggio dell'Universo (R=13.7 miliardi di Anni Luce*

Densità dell'Energia Oscura

Gli Wormholes Lorentziani esistono in natura?
Si!!
Sono creati e istantaneamente distrutti dalle fluttuazioni quantistiche (*Quantistic Foam*)

Possono generarsi attraverso il Principio di Indeterminazione di Heisemberg:

$$\Delta E \cdot \Delta t \simeq h$$

Werner Karl Heisenberg nel 1927, anno in cui pubblicò il suo articolo sul principio di indeterminazione.

Grazie per l'attenzione!!