



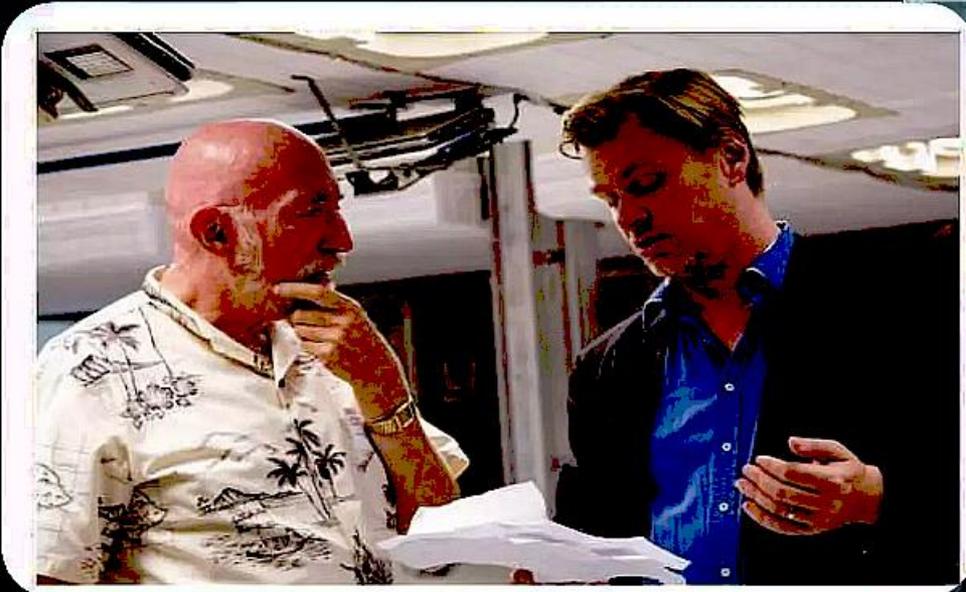
Università della Terza Età "Cardinale
Giovanni Colombo" - Milano

A. A. 2022 - 2023
Corso di Astrofisica

Docente:
Adriano Gaspani

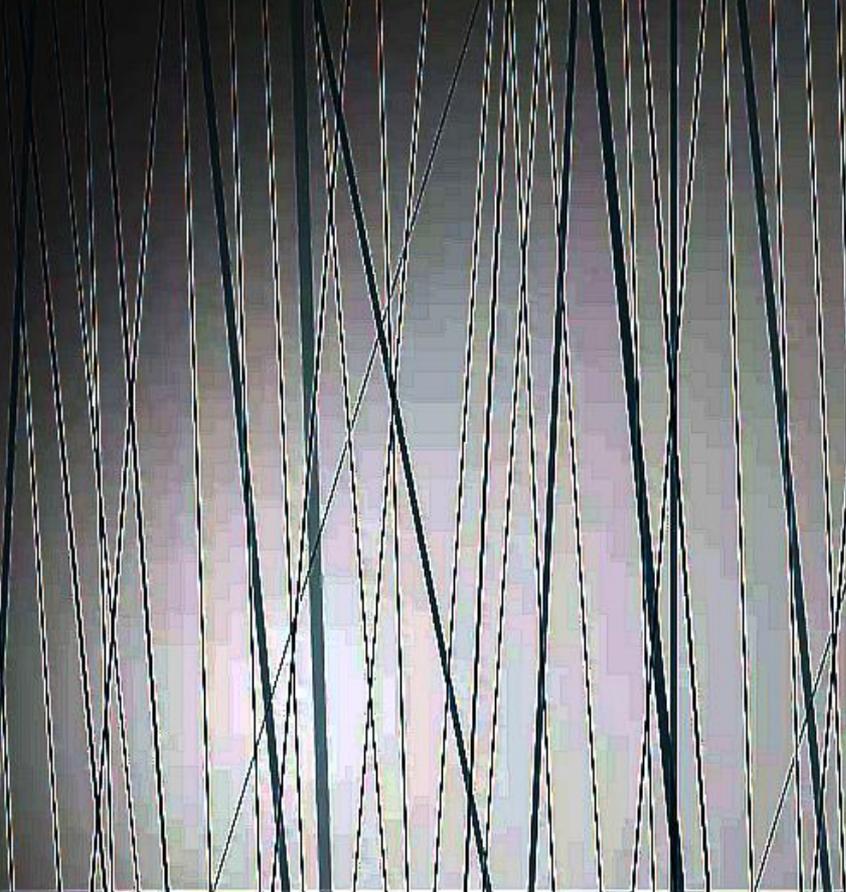
Gli *Wormholes*: i cunicoli spazio-temporali

- Interstellar, il film di Christopher Nolan del 2014, ha avuto grande successo ed è stato presentato come nuova frontiera nella trasposizione cinematografica di idee scientifiche d'avanguardia premiata anche con un Oscar nel 2015 per i migliori effetti speciali.



- Nella trama hanno un ruolo-chiave le distorsioni estreme dello spazio-tempo, e in particolare la dilatazione gravitazionale che fa scorrere il tempo più lentamente là dove la gravità è più intensa.
- Sulla falsariga del film ripercorriamo insieme alcuni concetti che possono aiutarci a capire meglio la natura della realtà e ... la trama del film!

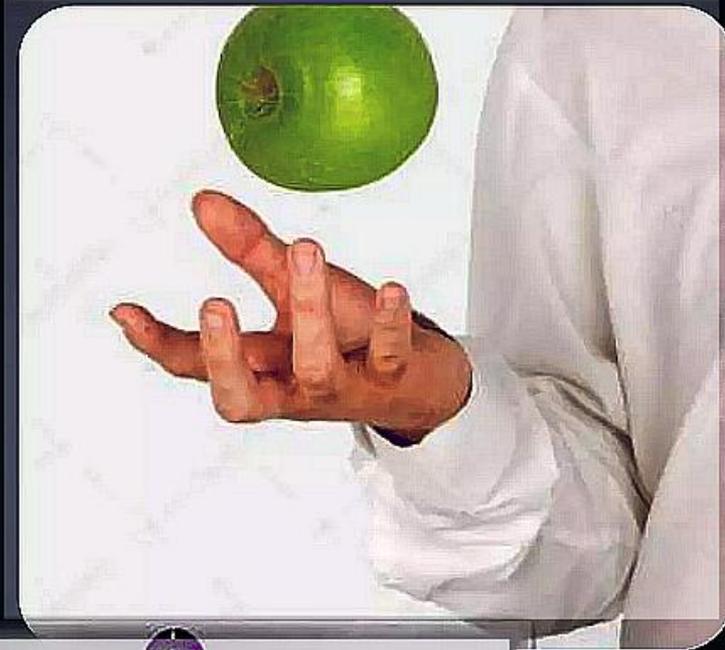




Che cos'è la Gravità

La forza che plasma l'Universo

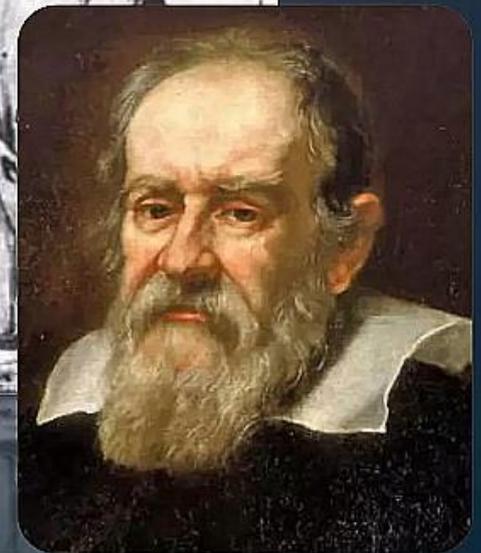
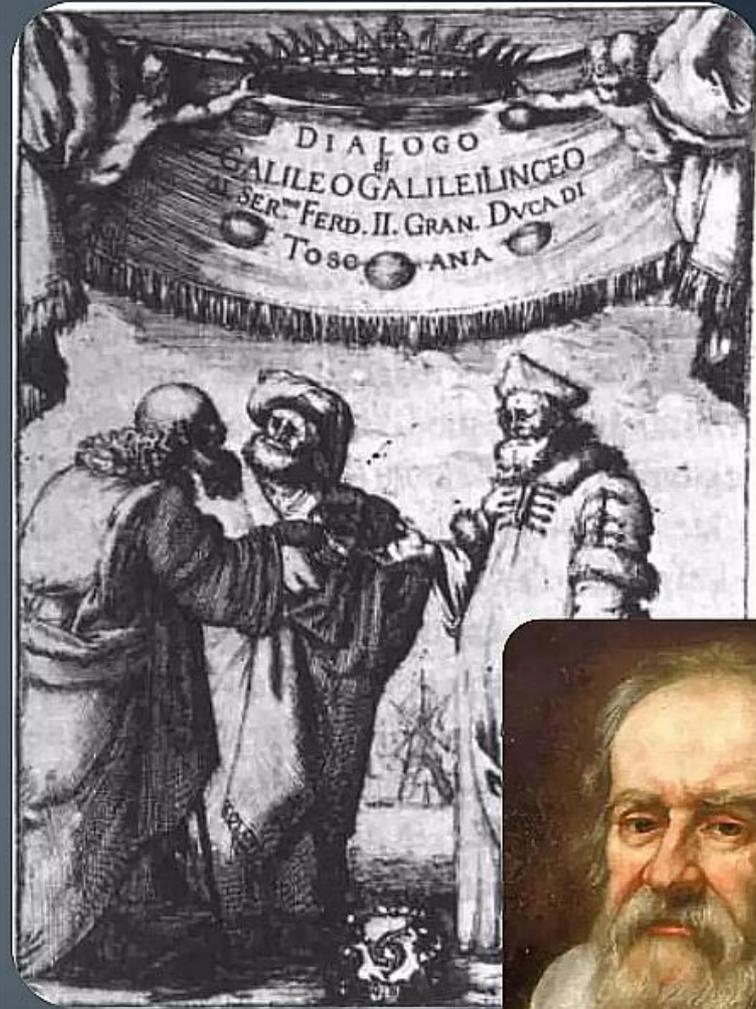
Che cos'è la gravità



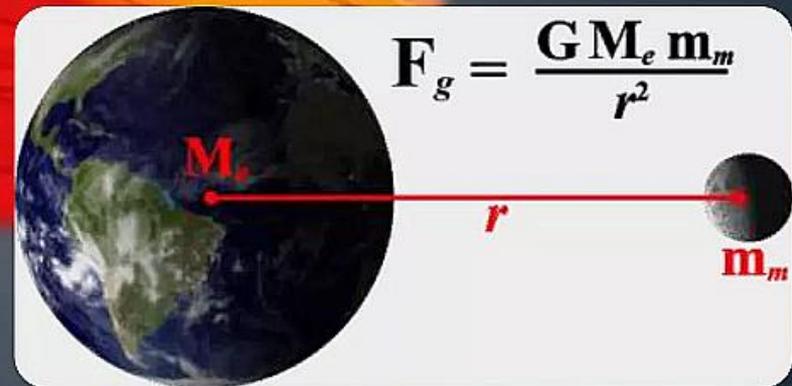
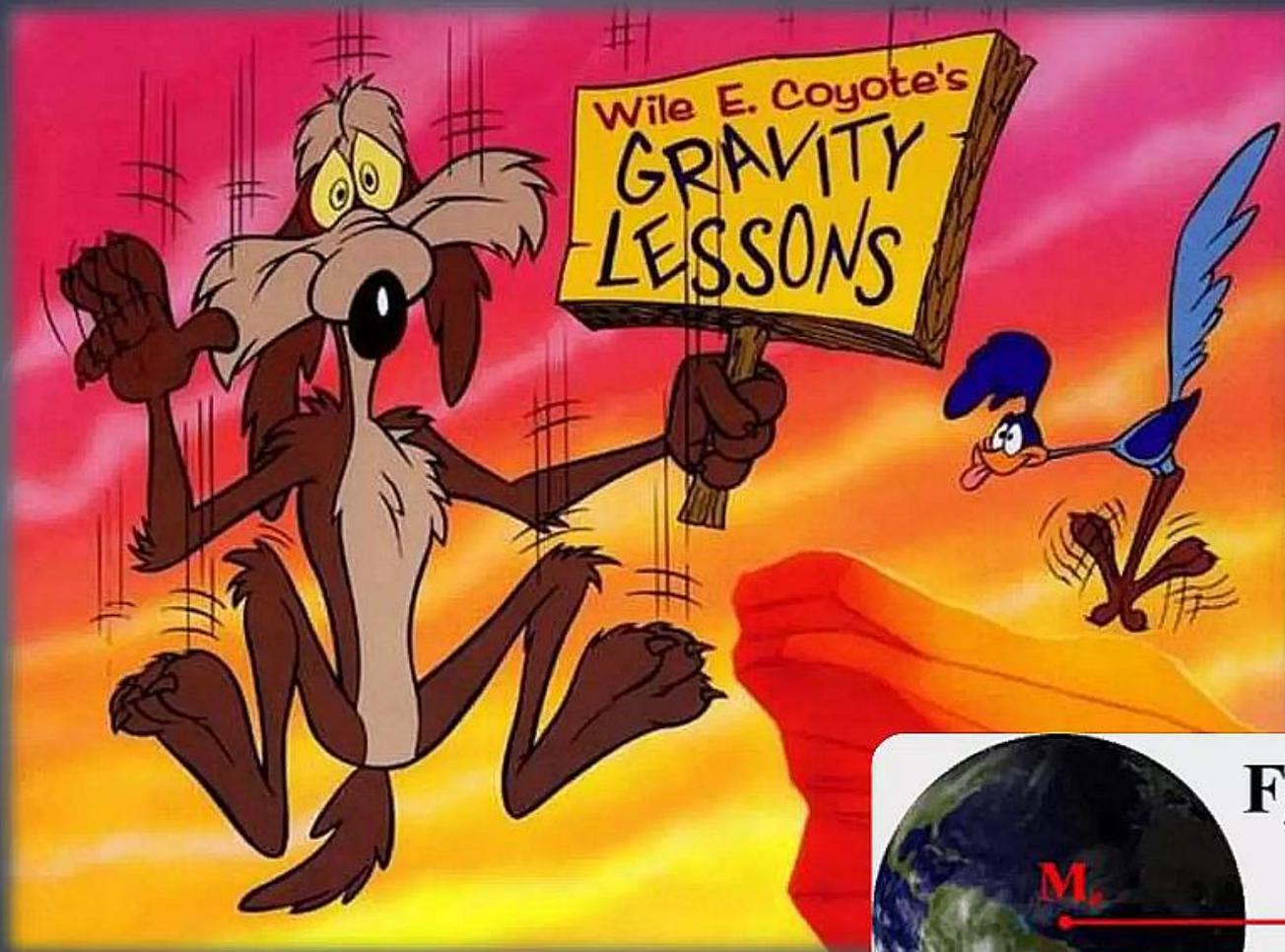
- Possiamo vedere la gravità al lavoro, ogni volta che si lascia cadere un libro, ogni volta che saliamo su una scala o lanciamo una palla in aria.
- È una presenza così costante nelle nostre vite che raramente ci si meraviglia per il suo mistero ...
- Ma cosa sappiamo realmente della gravità?

Che cos'è la gravità

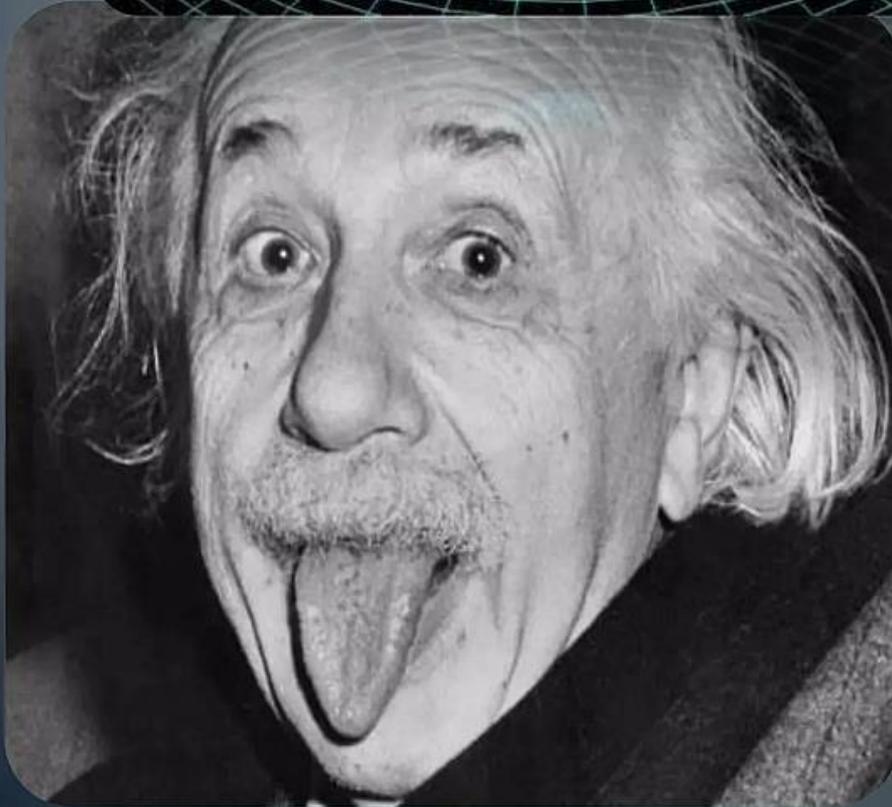
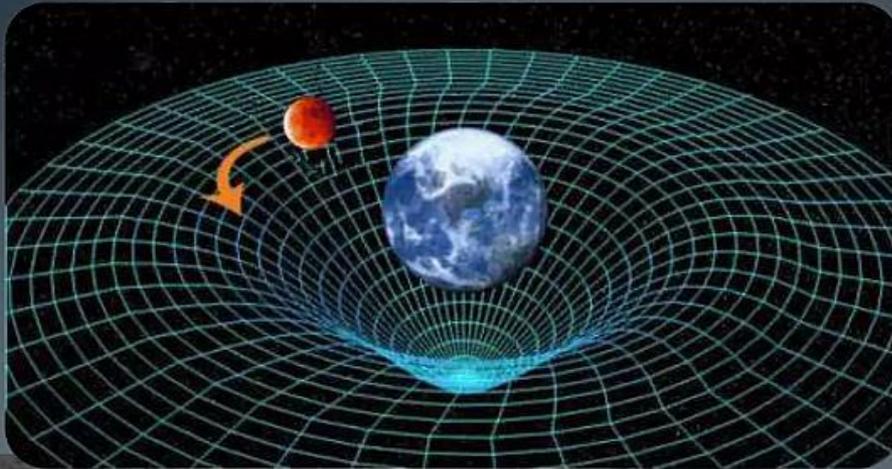
- Salviati: Qual è la causa del fatto che le cose cadono all'ingiù?
- Simplicio: La causa è notissima e ciaschedun sa che è la gravità!
- Sagredo: Voi errate signor Simplicio, voi dovevi dire che ciaschedun sa che essa si chiama gravità. Ma io non vi domando del nome bensì dell'essenza della cosa!



Che cos'è la gravità



Che cos'è la gravità



- Albert Einstein tramite la sua Teoria Generale della Relatività ha offerto una spiegazione molto diversa da quella di Newton.
- Einstein non credeva che la gravità fosse una forza bensì una sorta di distorsione nella forma dello spazio-tempo.
- **Ma cos'è lo spazio-tempo?**

Equazione del campo gravitazionale

Tensore
di Einstein

Costante

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

Tensore di Curvatura
(di Ricci Curbastro)

Tensore Metrico

Scalare di Curvatura

Tensore
Energia-Impulso

Curvatura e gravitazione

Maggiore è il campo gravitazionale e maggiore è la curvatura.

Sì, ma c'è un limite...

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

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.

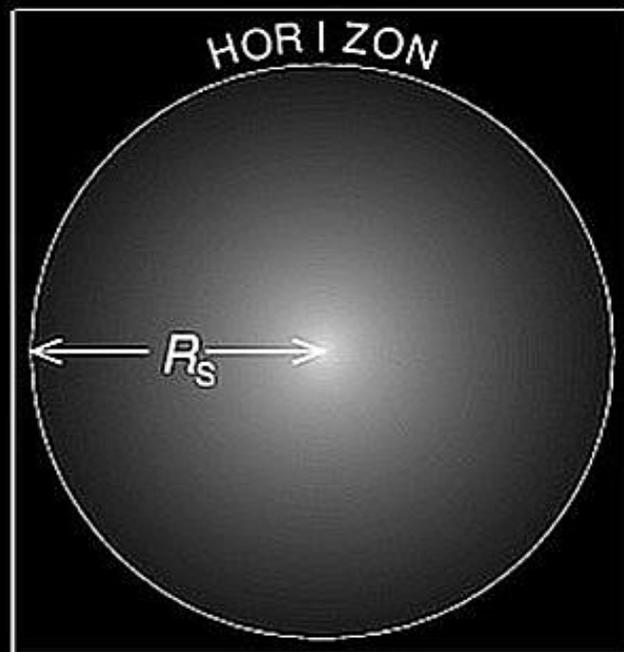


Karl Schwarzschild (1873-1916)

Raggio di Schwarzschild

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

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

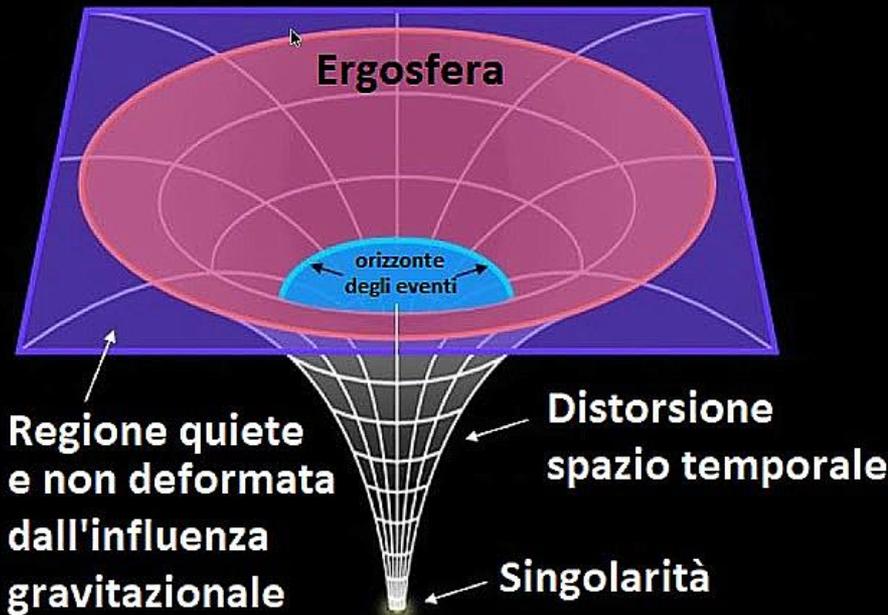


Nel 1967, Wheeler li battezza buchi neri

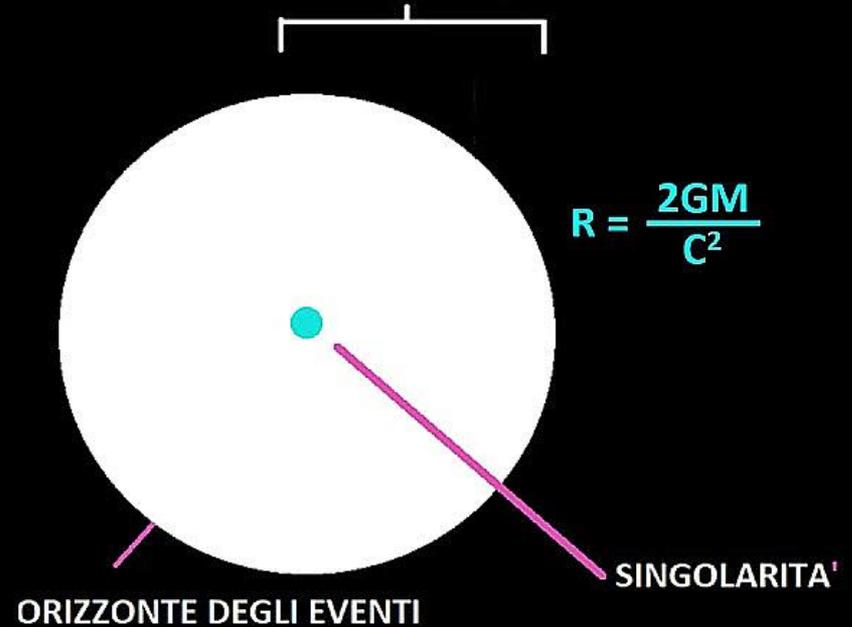
LA SINGOLARITA'

Il cuore dei buchi neri racchiude il mistero più grande: la singolarità. Secondo la relatività generale, qui la densità della materia e la deformazione dello spazio-tempo diventano infinite.

Spazio del buco nero

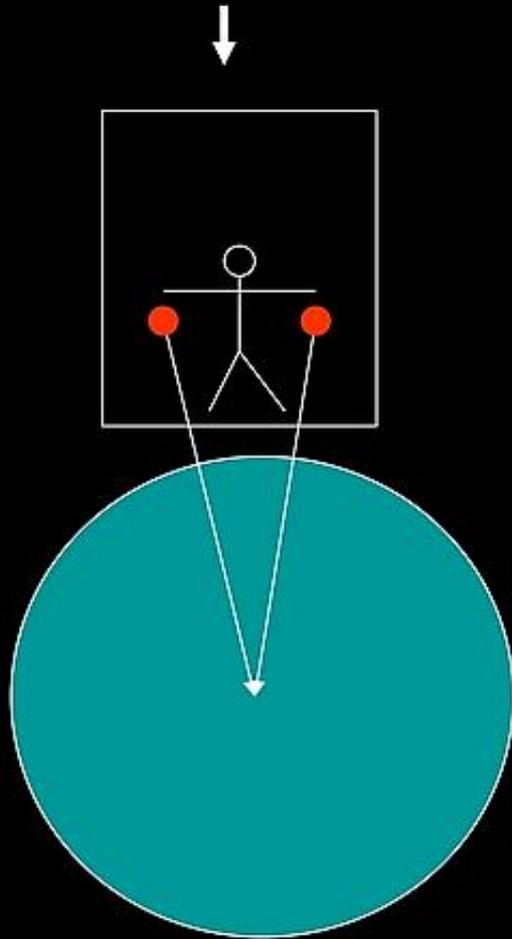


RAGGIO DI SCHARZSCHILD



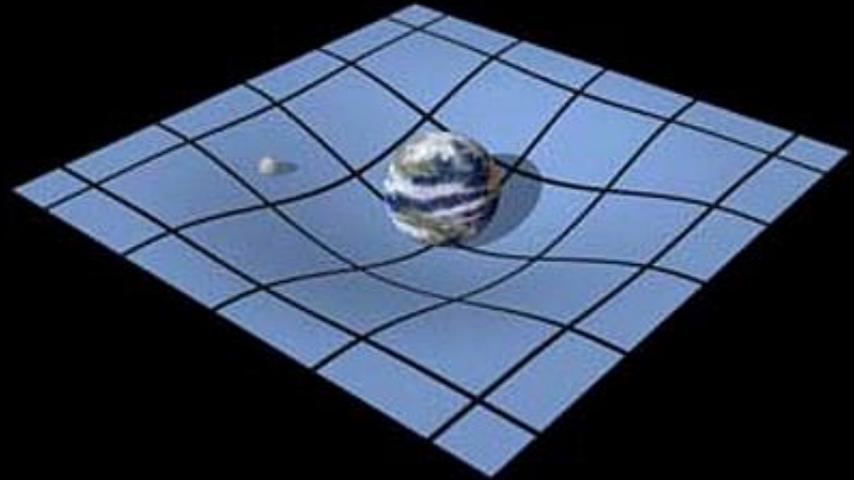
La singolarità non è mai nuda

Marea = Curvatura



Effetti di marea → curvatura ineliminabile

La curvatura dello spazio può essere molto pericolosa...



Buchi Neri

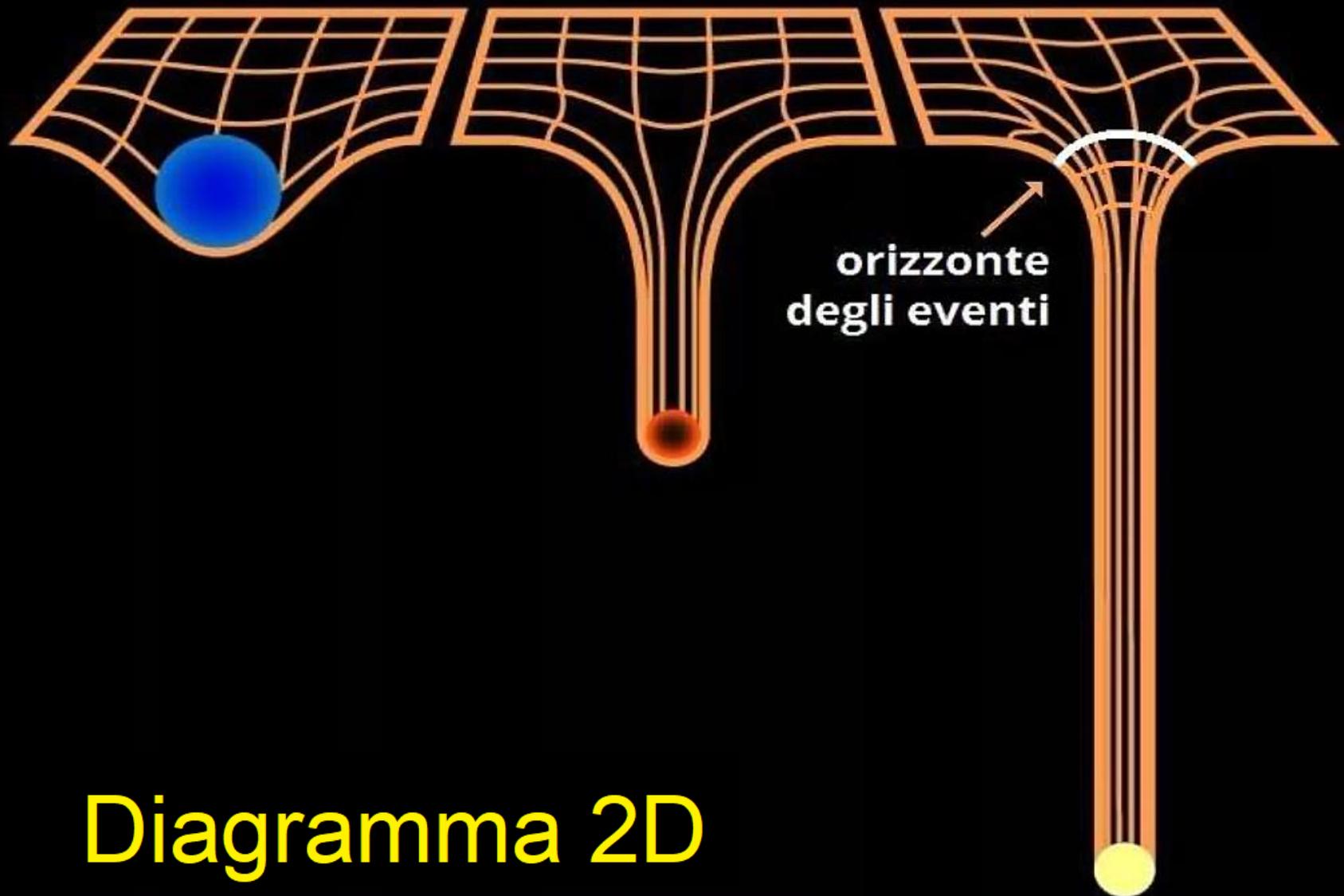


Diagramma 2D

Attenzione alle forze di marea!

Vicino all'orizzonte degli eventi, le forze di marea diventano fortissime (se il buco nero non è supermassiccio)

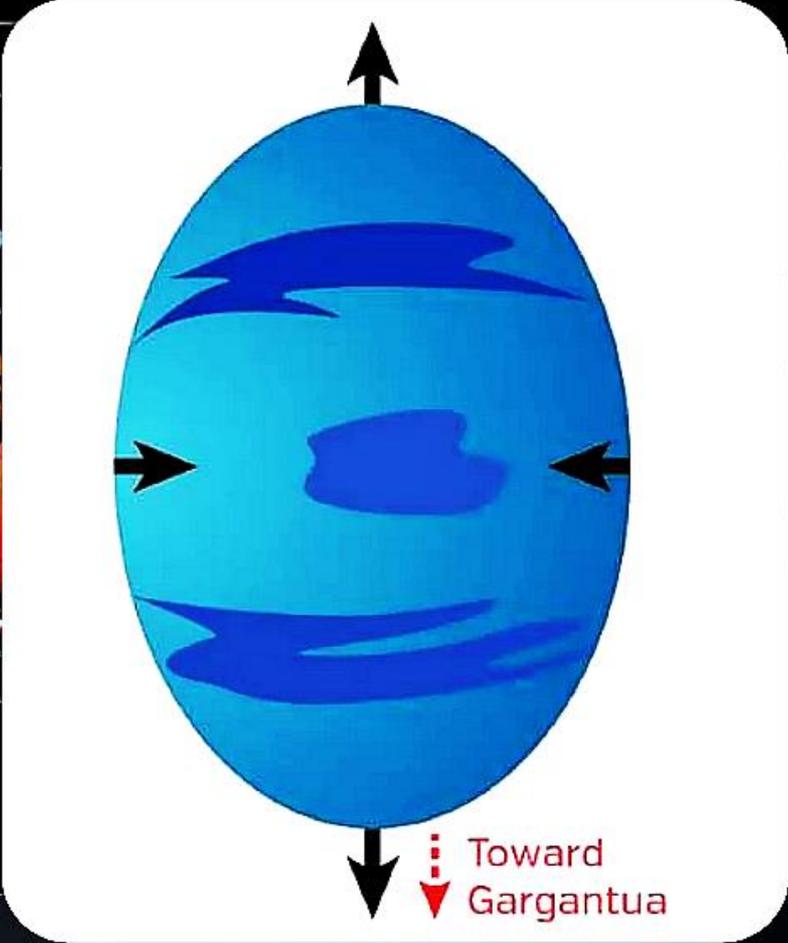
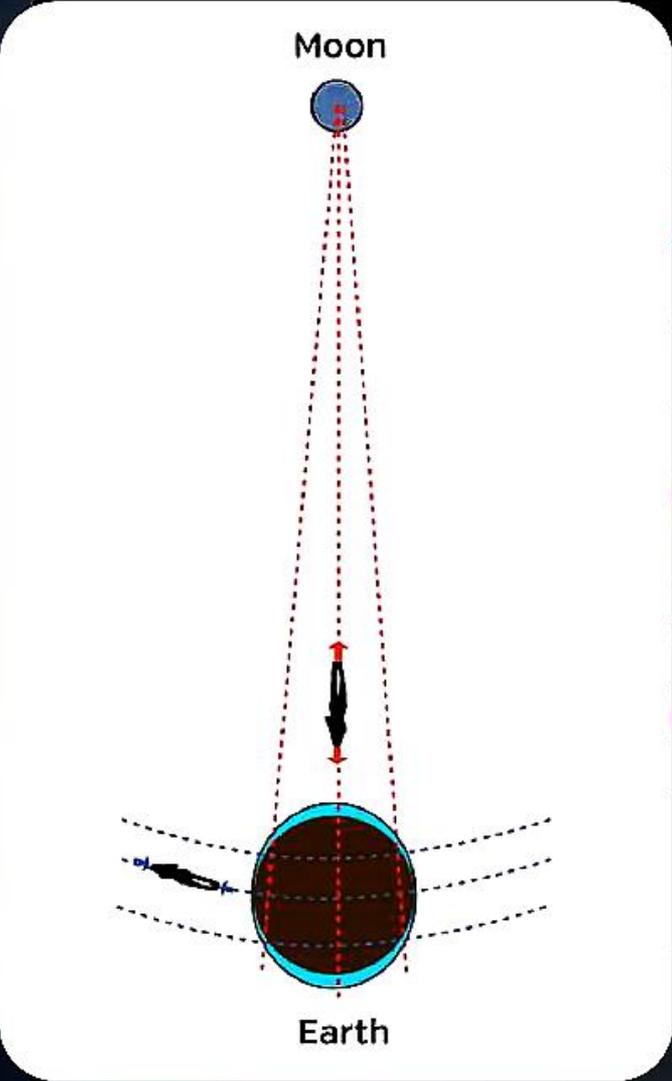


SPAGHETTIFICAZIONE

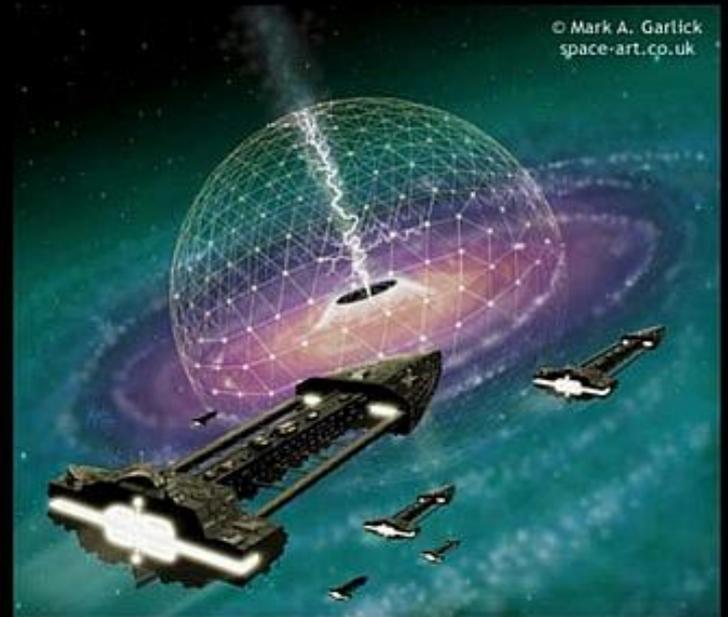
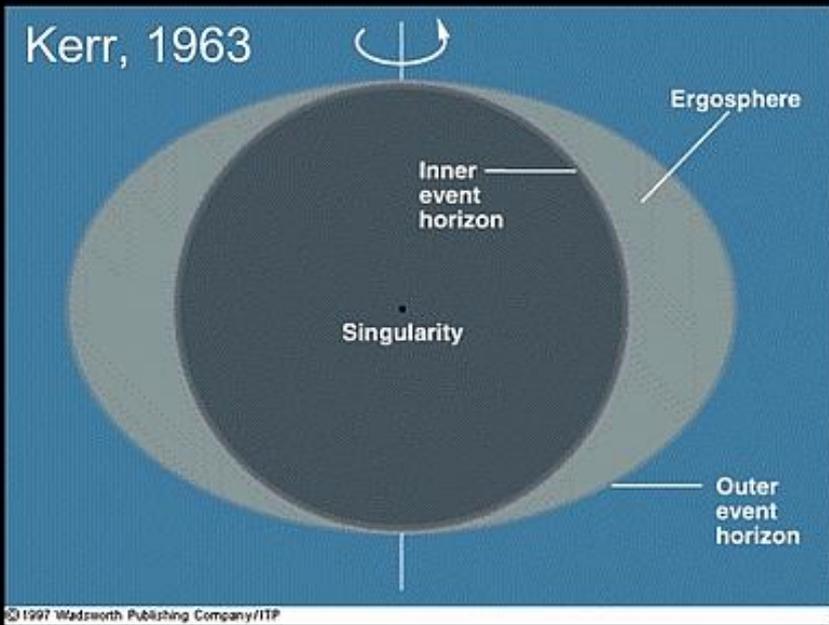
E' meglio cadere in un buco nero molto grosso (di miliardi di masse solari) che in uno "piccolo" di poche masse solari.



Maree



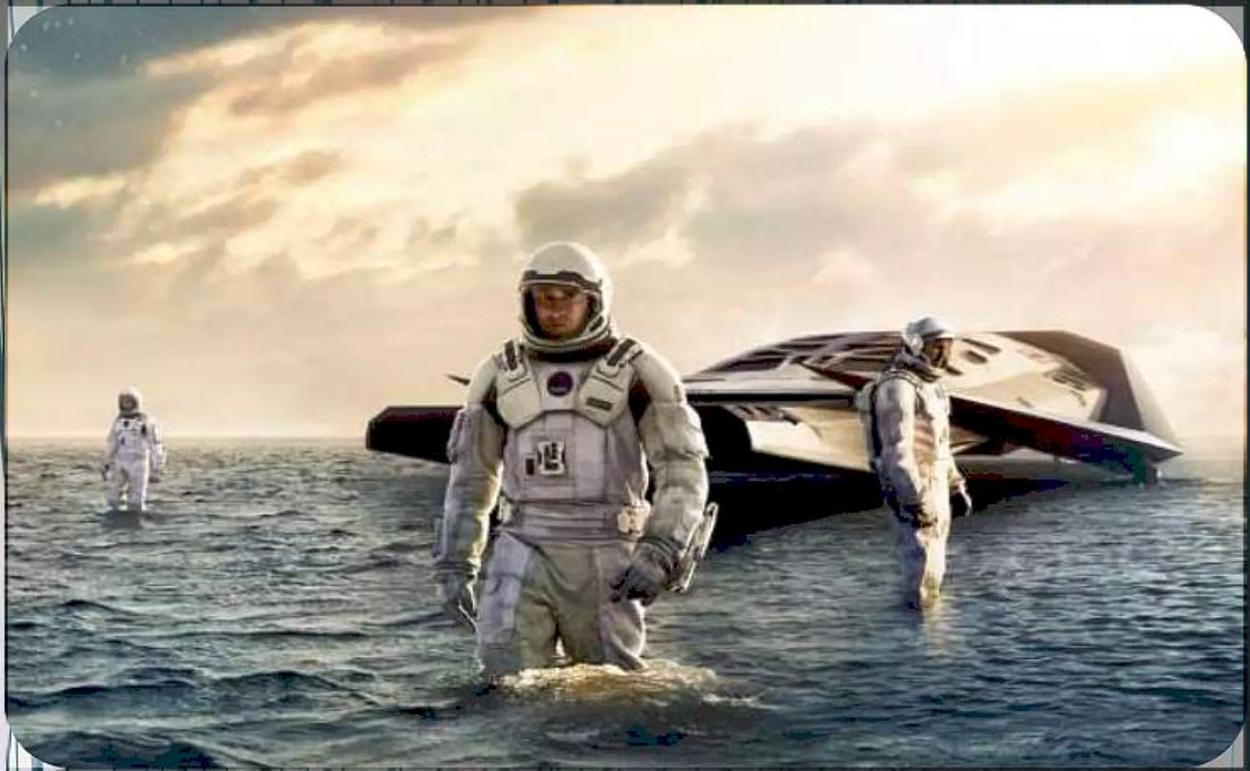
Buco nero in rotazione



Si può entrare e uscire dall'ergosfera di un buco nero.

Nell'ergosfera è impossibile seguire una traiettoria radiale diretta verso il buco nero: lo spazio-tempo è trascinato dal moto di rotazione.

Tutta l'energia associata alla rotazione di un buco nero si trova immagazzinata nell'ergosfera e può dunque essere estratta.



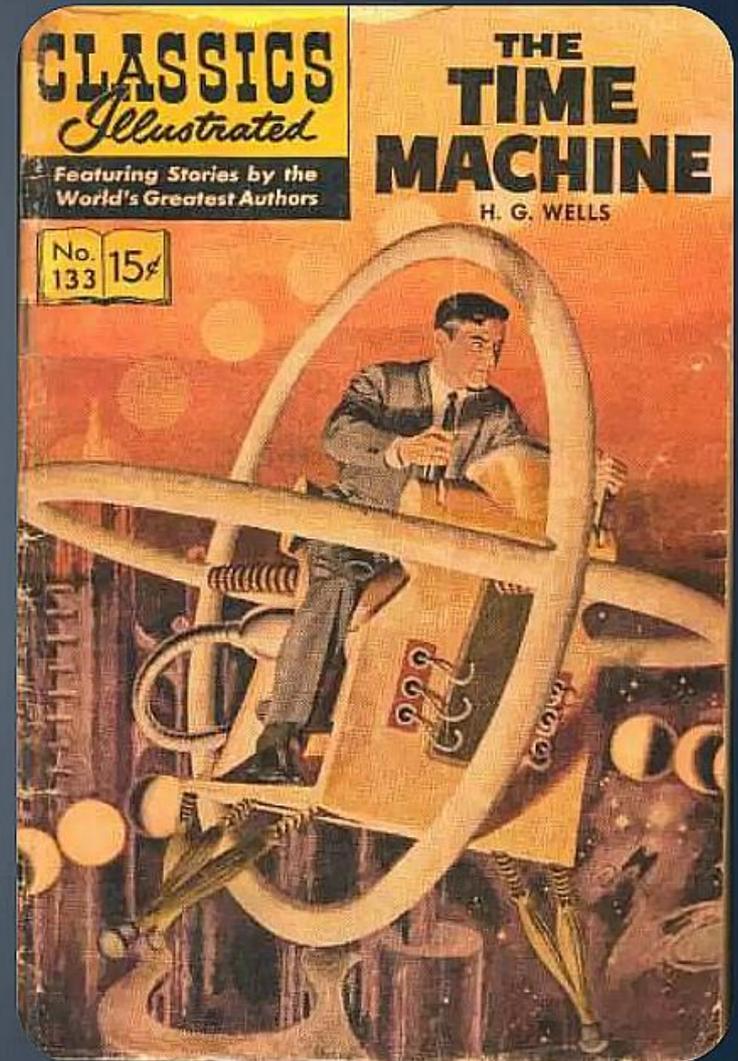
Il pianeta di Miller

Le forze di Marea



Lo spazio-tempo

« Un cubo che non duri neppure un secondo può esistere nella realtà? E' chiaro, - proseguì il Viaggiatore del Tempo mentre Filby sembrava immerso in profonde riflessioni, - è chiaro che ogni corpo reale deve estendersi in quattro dimensioni: deve avere cioè una lunghezza, un'altezza, una larghezza... e una durata. Ma per la naturale imperfezione dei sensi umani noi siamo inclini a sorvolare su quest'ultimo presupposto. Esistono in realtà quattro dimensioni: le tre che chiamiamo i tre piani dello spazio e una quarta cioè il tempo. La mente umana tende tuttavia a compiere una distinzione irrealistica fra le prime tre dimensioni e la quarta poiché siamo consapevoli di muoverci in una sola direzione lungo quest'ultima dal principio alla fine della nostra vita! »



Time Warp

- Volete invecchiare più tardi? Evitate le scale e i piani alti: il tempo scorrerà più lentamente... Di pochi miliardesimi di secondo!
- La geolocalizzazione GPS, che si basa su misure di tempo (il ritardo tra i segnali ricevuti da satelliti diversi) funziona proprio perché quelle misure vengono corrette come indicato dalla teoria generale di Einstein.

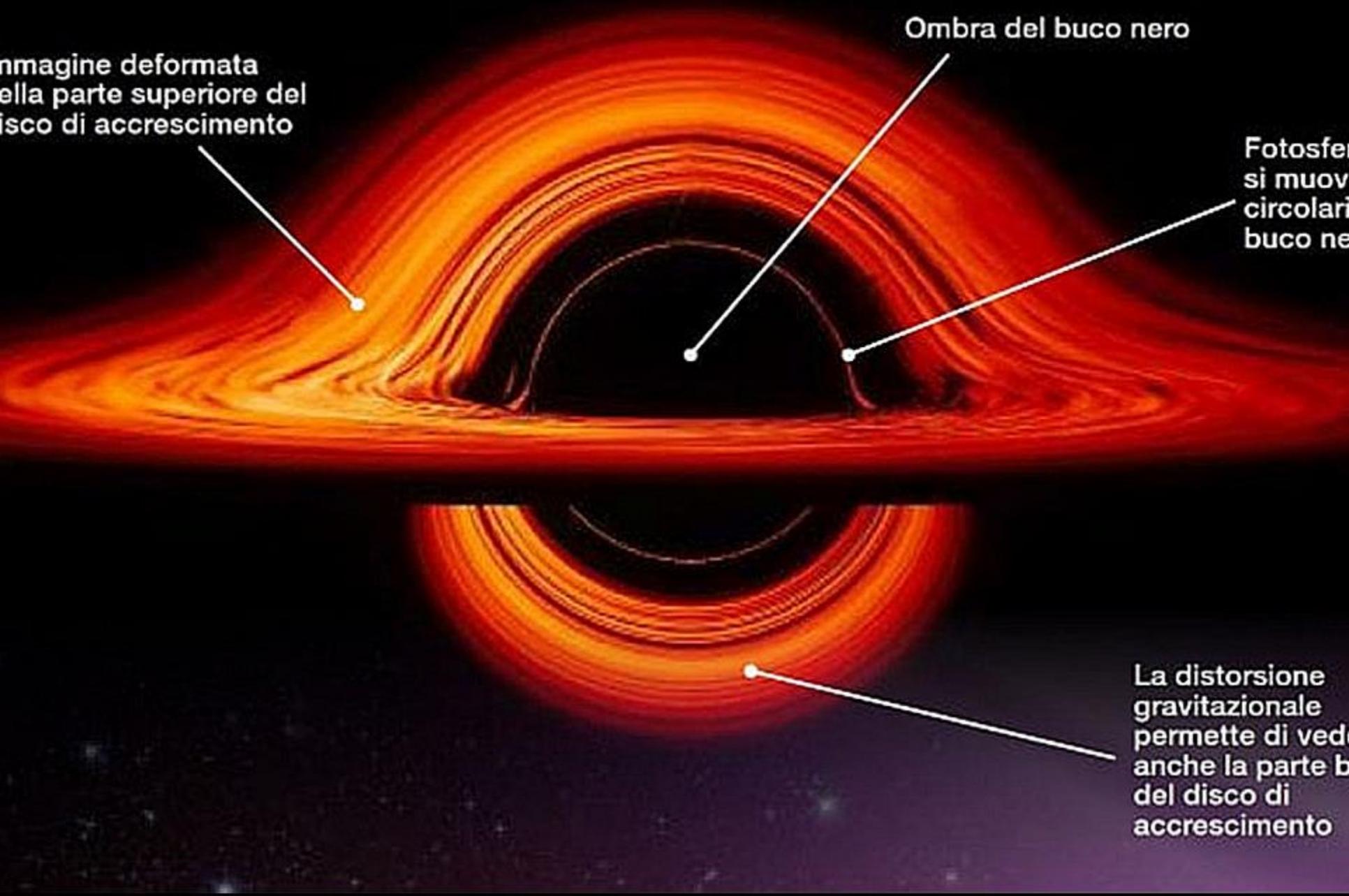


Immagine deformata
della parte superiore del
disco di accrescimento

Ombra del buco nero

Fotosfera
si muove
circolari
bucò ne

La distorsione
gravitazionale
permette di vedere
anche la parte
del disco di
accrescimento



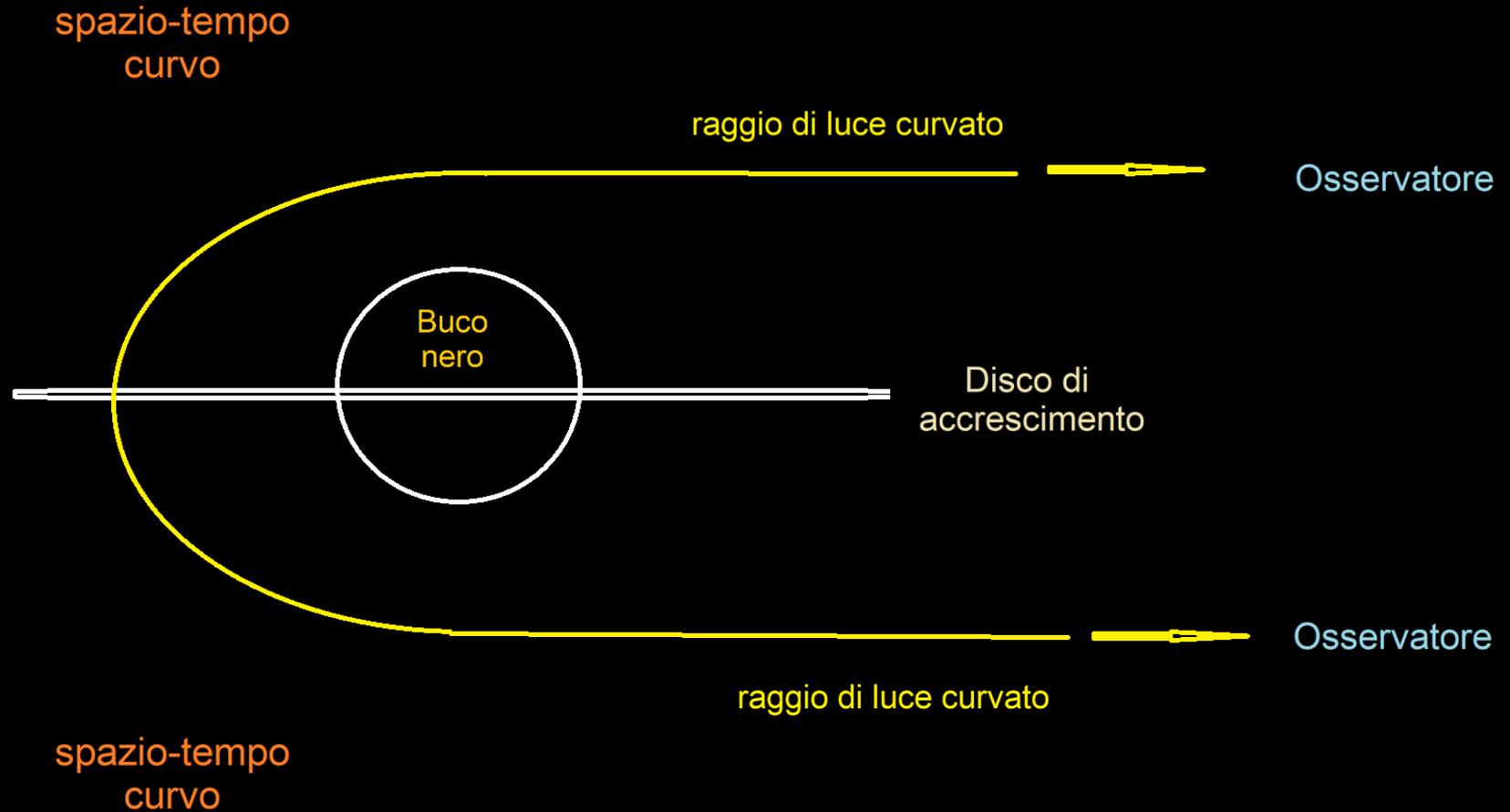
Come apparirebbe un buco nero da «vicino»



immagine rifratta del
disco di accrescimento

immagine rifratta del
disco di accrescimento

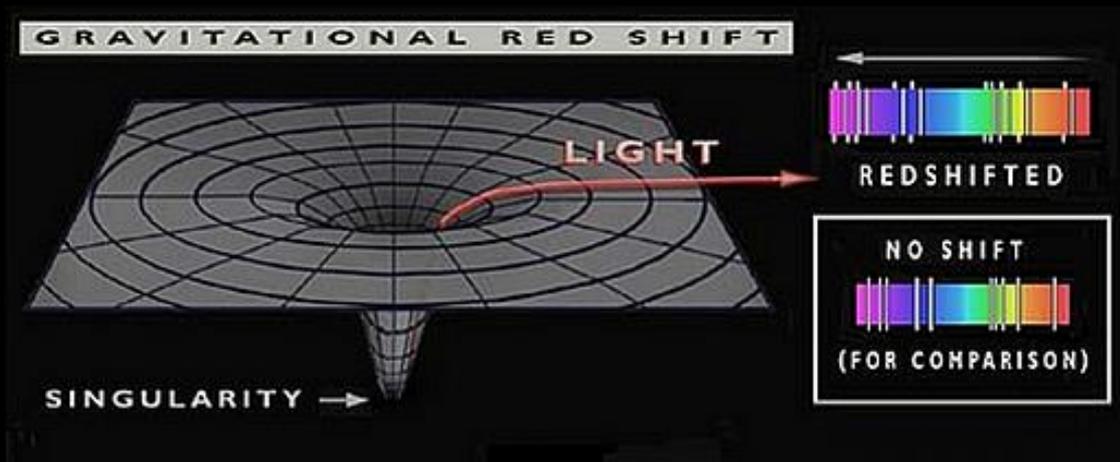
Come apparirebbe un buco nero da «vicino»



Caduta in un buco nero

Visto da un osservatore esterno, il tempo di caduta sull'orizzonte di un buco nero è infinito.

Un osservatore che cade in un buco nero misura invece un tempo finito di caduta nella singolarità.



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...

Massima velocità raggiungibile: la velocità della luce

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

tempo di viaggio:

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

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

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



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

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

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

**Tensore di
curvatura di Ricci**

descrive la curvatura
dello spazio-tempo

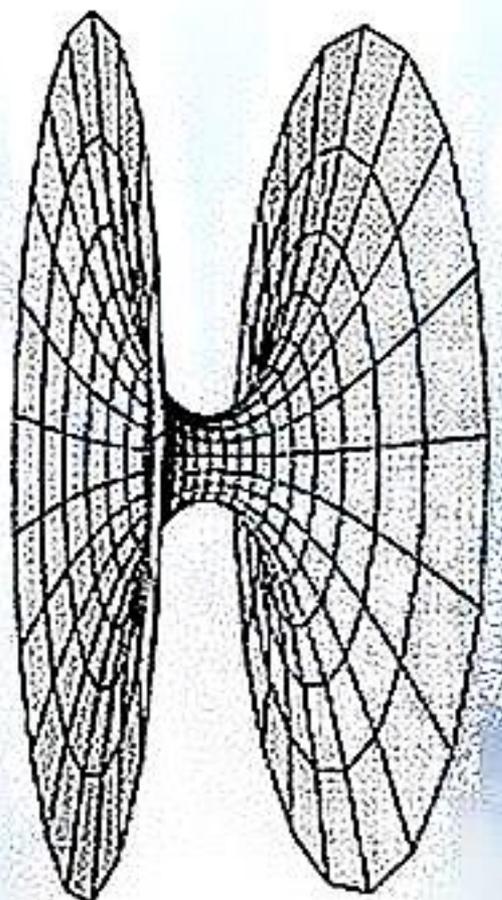
Tensore metrico

descrive la metrica
dello spazio-tempo

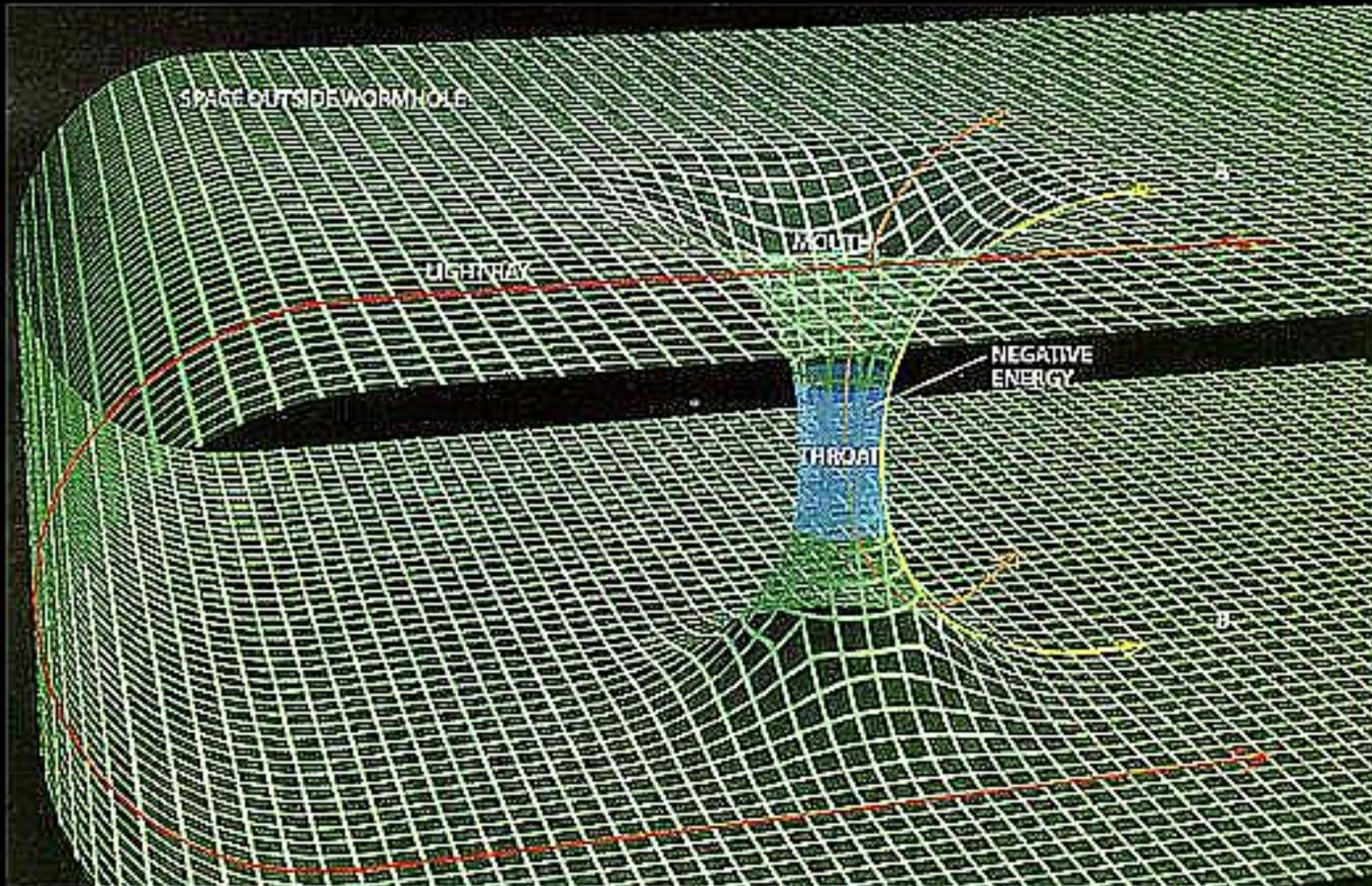
**Tensore
stress-energia**

descrive
la gravità

Wormholes

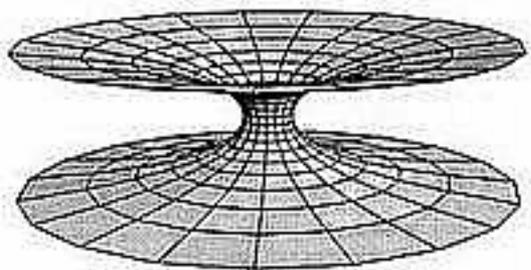


Ponte di Einstein-Rosen (Wormhole)



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

Wormholes

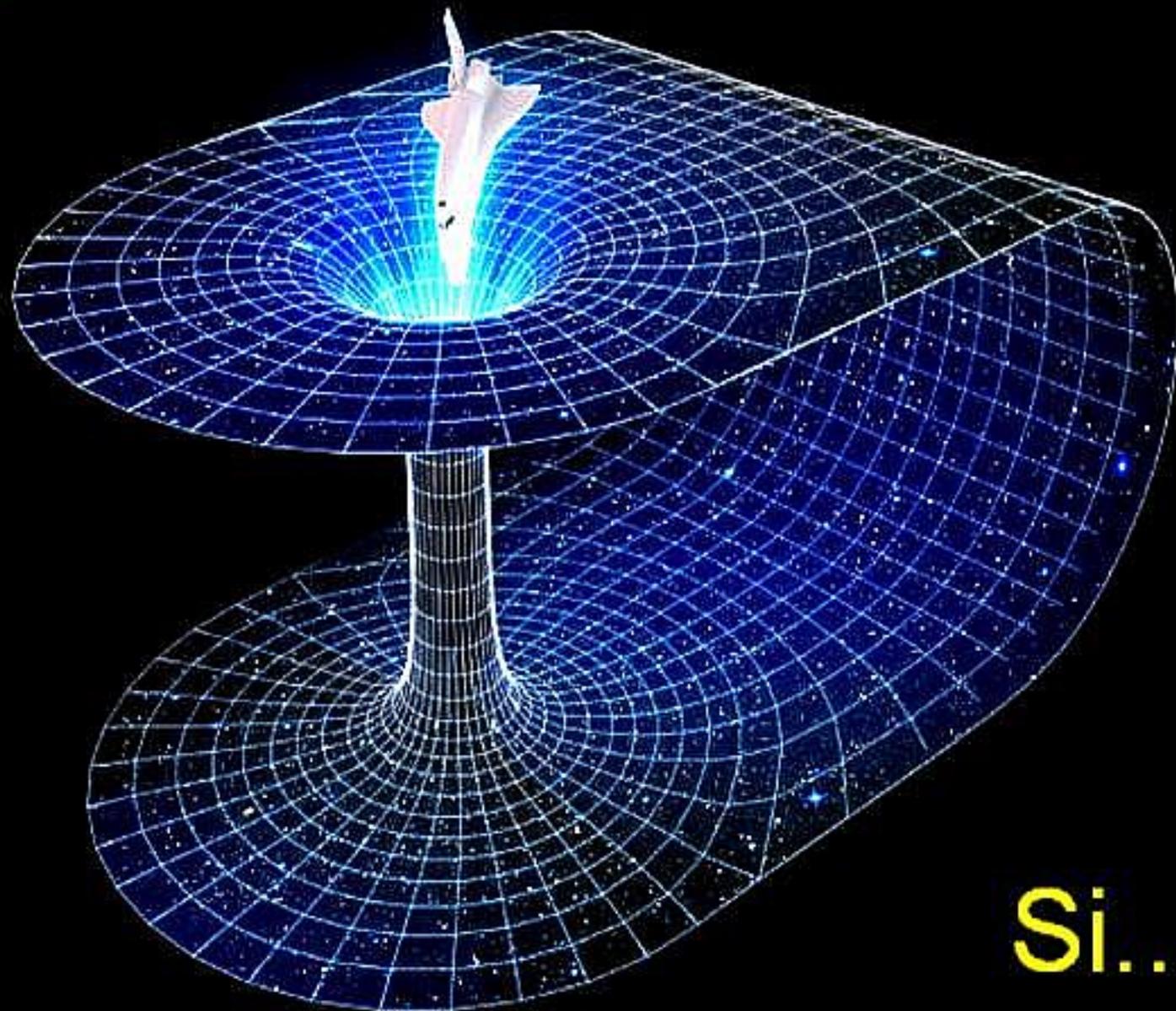


**Una scorciatoia attraverso
lo spazio-tempo**

aspetto di un Wormhole

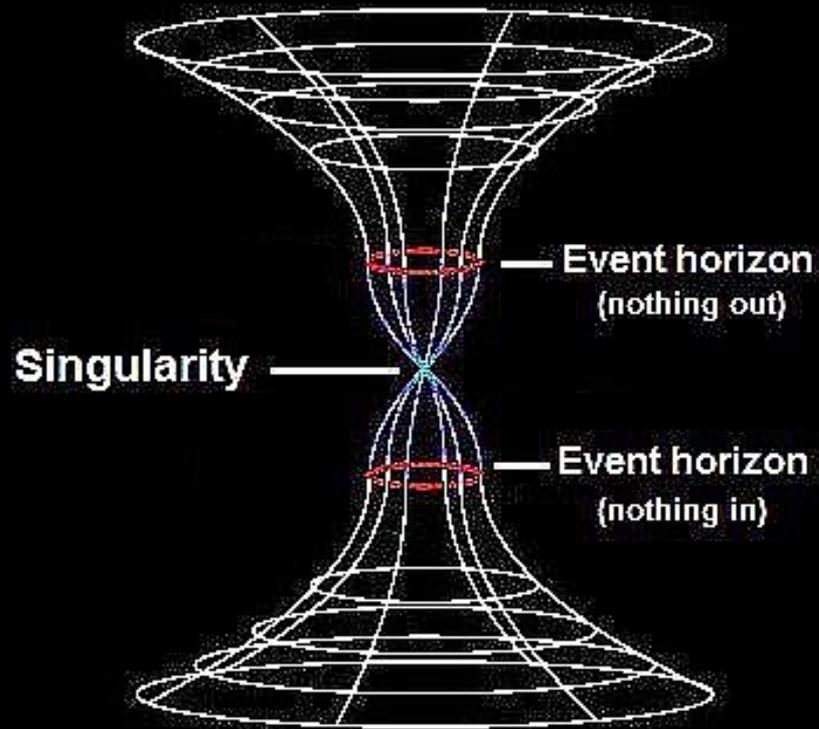


Si può passare attraverso?



Si....

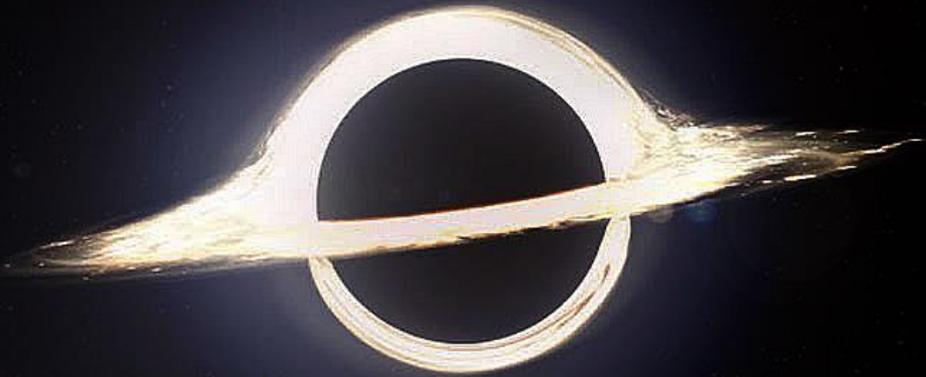
Black Hole



White Hole

BUCO NERO

BUCO BIANCO

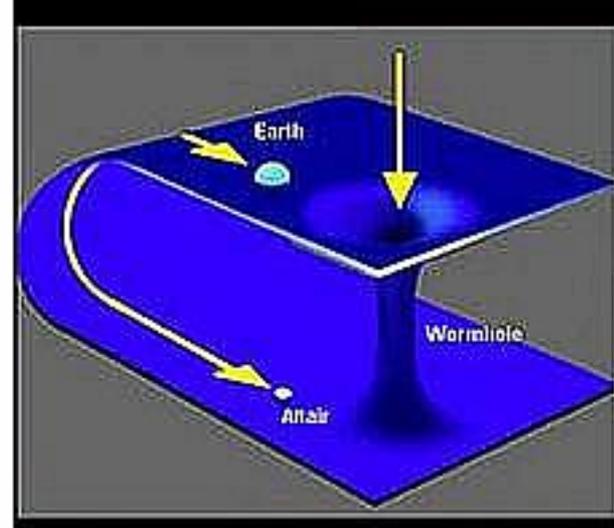




**Viaggi interstellari
e intergalattici possibili**

Esempio

Distanza Terra - Altair: 16,73 Anni Luce



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

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

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

Come tenere aperto un Wormhole?

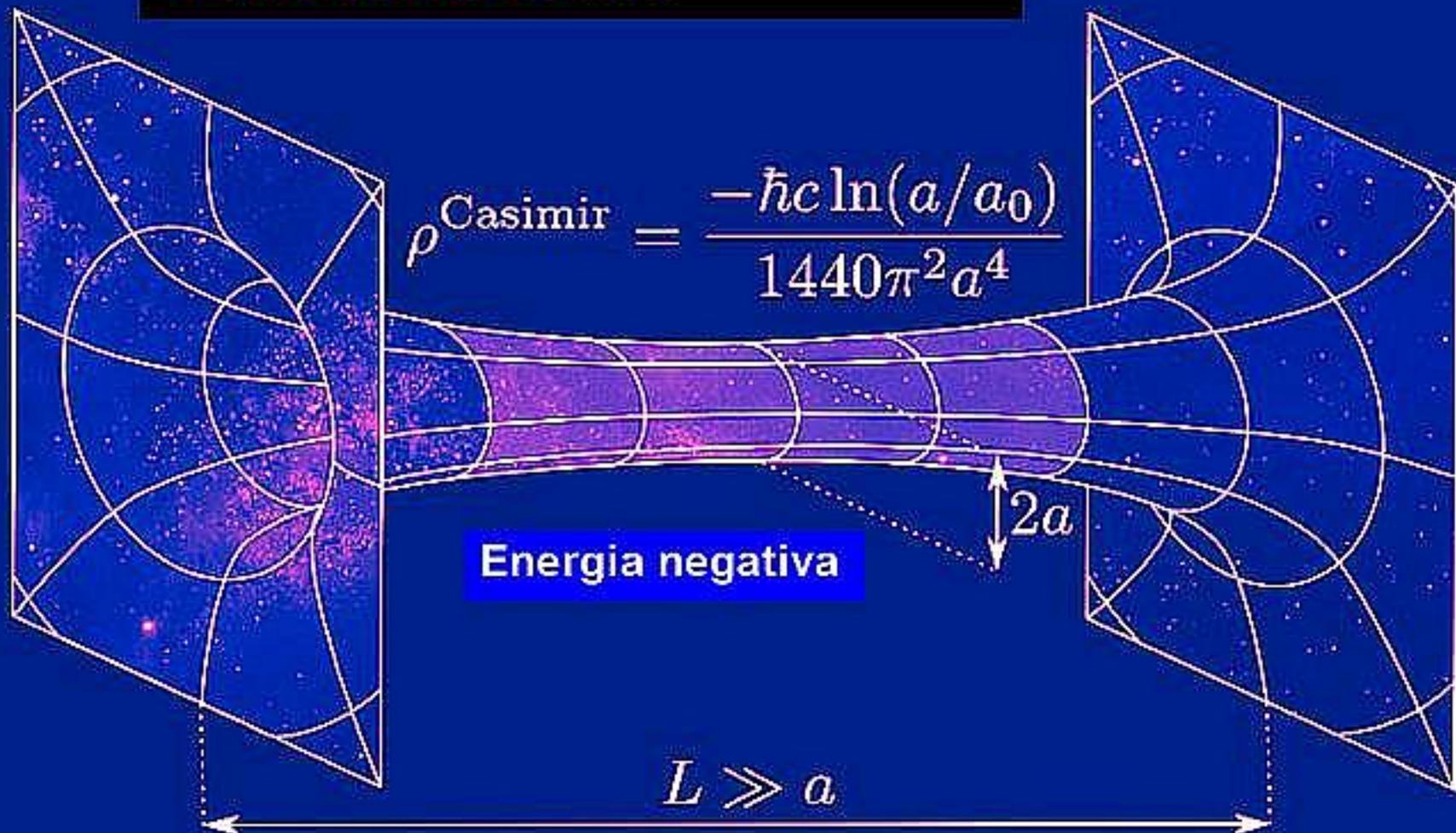
Occorre della massa che curvi lo spazio tempo...

Tale massa deve essere tale da produrre energia oscura (antigravitazionale) e quindi la massa deve essere **negativa**

Esiste....

Lo spazio vuoto fluttua
quantisticamente...

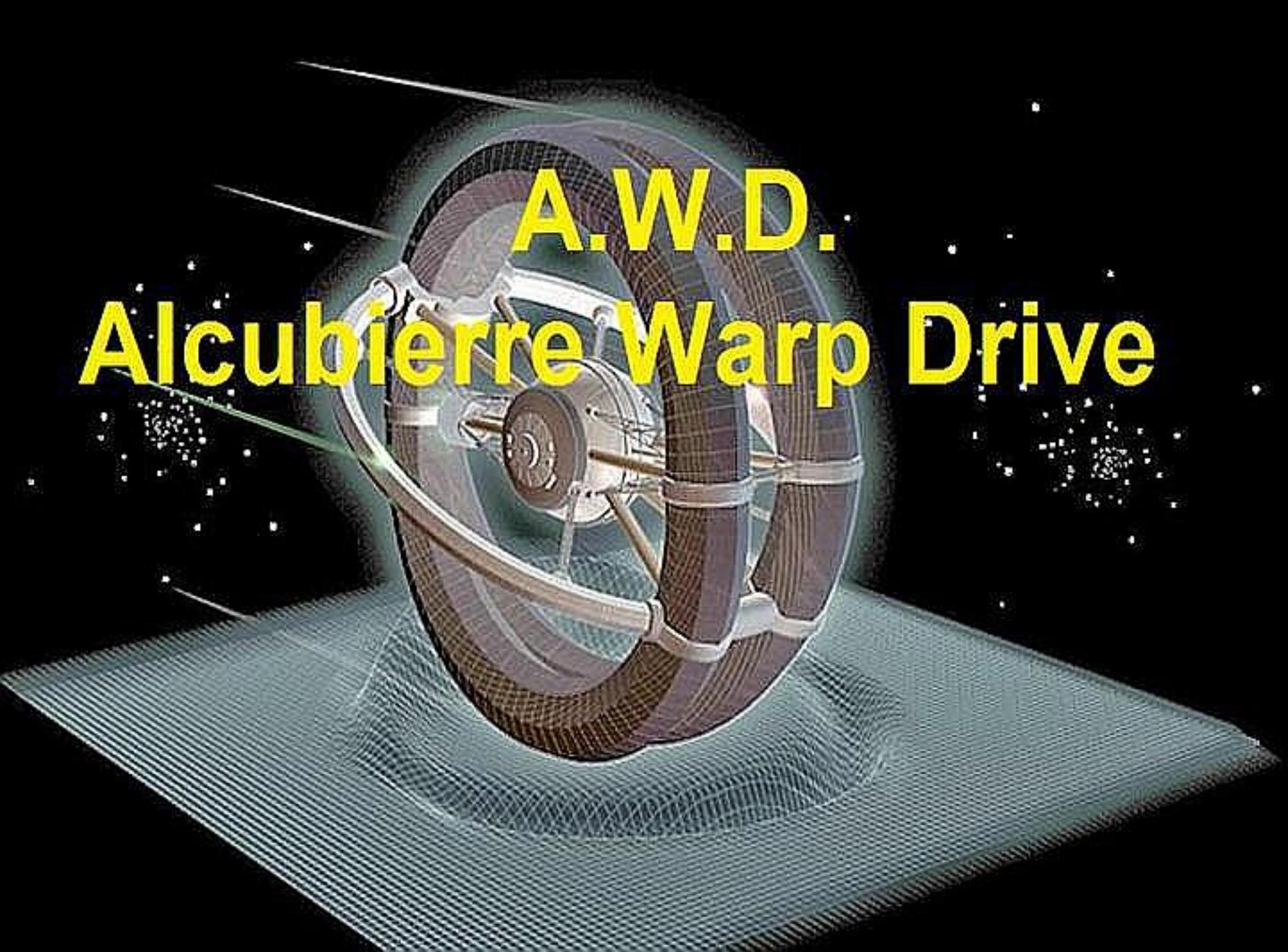
Effetto Casimir



Uno scenario possibile



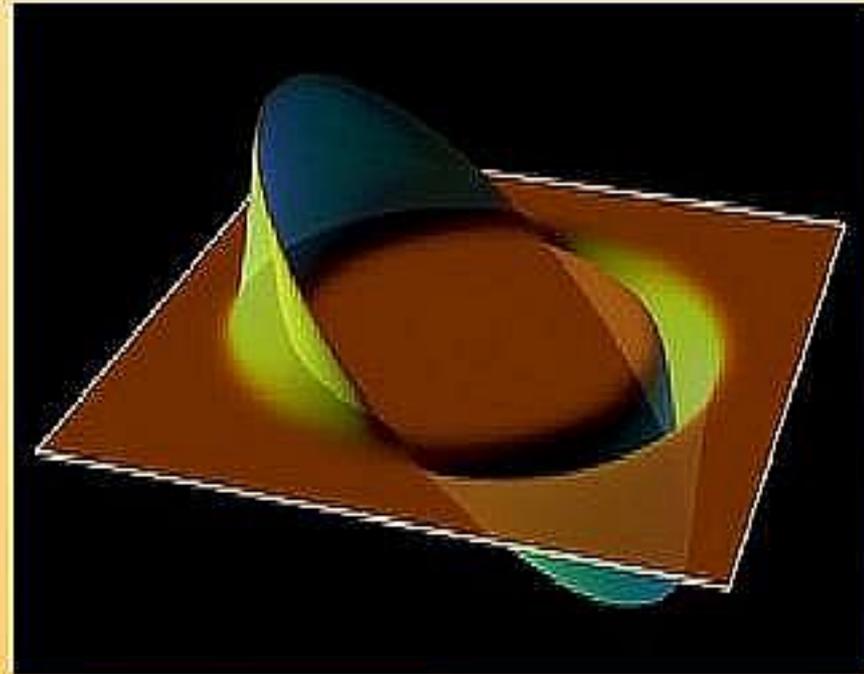
La Galassia di Star Wars
le Ways e le Routes
corrispondono a Wormholes
standard noti

The image depicts a futuristic spacecraft, possibly a probe or a small ship, with a complex internal structure. The ship is positioned in the center, appearing to be in motion or operating. The background is a dark space filled with stars and a grid of lines that represent the curvature of spacetime, characteristic of a warp drive concept. The text 'A.W.D.' and 'Alcubierre Warp Drive' is overlaid in a bright yellow, bold font.

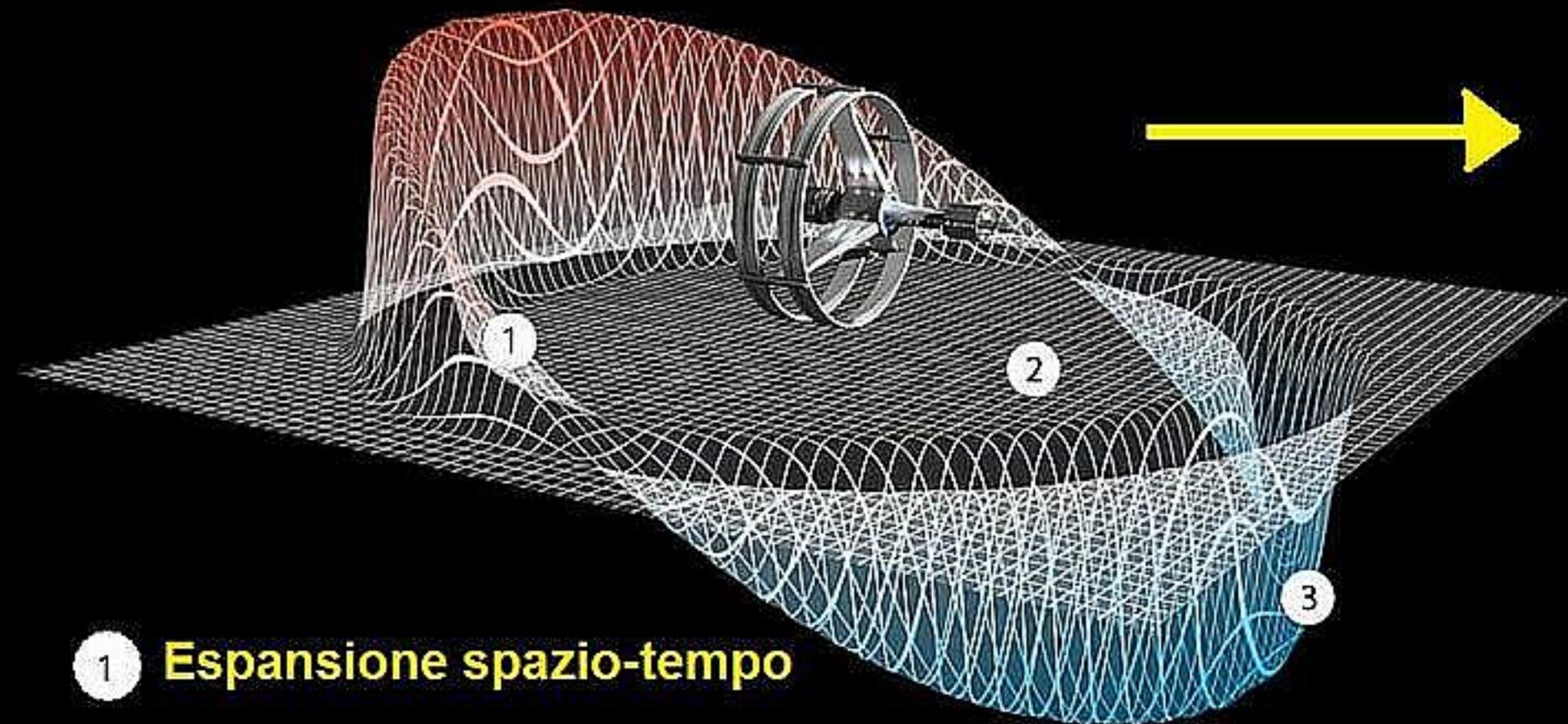
A.W.D.
Alcubierre Warp Drive

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.

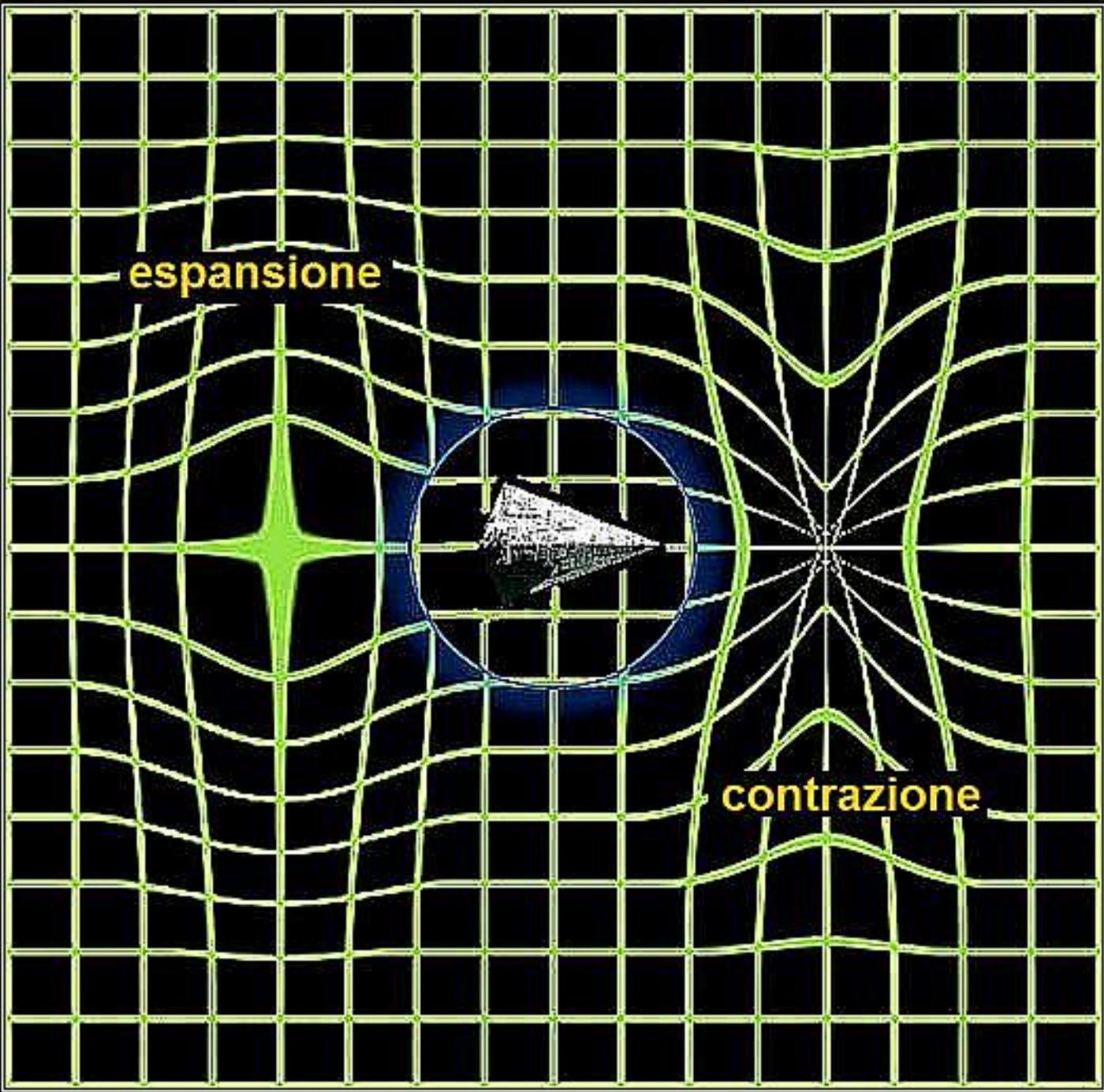


Miguel Alcubierre



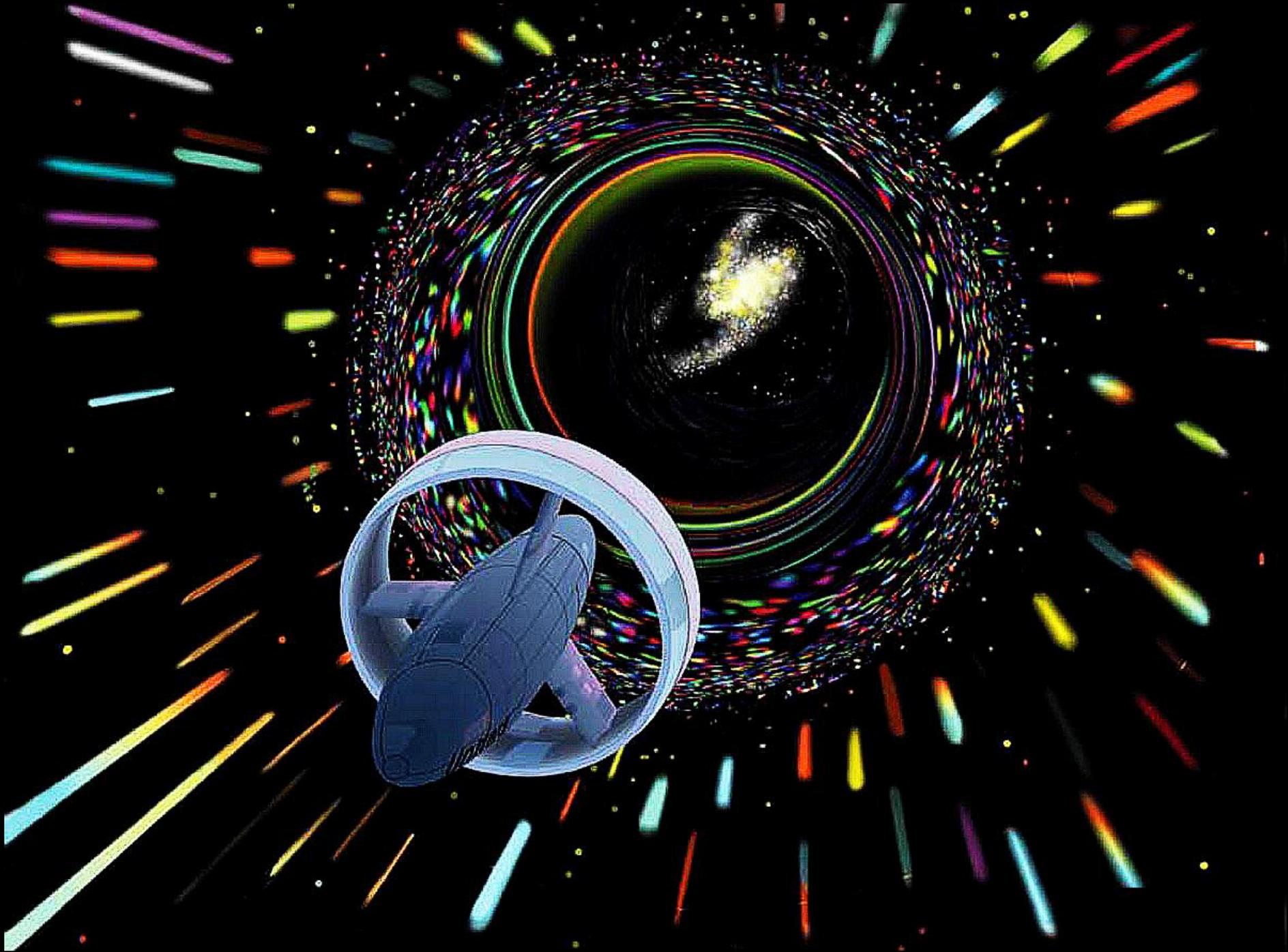
- 1 **Espansione spazio-tempo**
- 2 **Spazio-Tempo stabile**
- 3 **Contrazione spazio-tempo**

Propulsione di Alcubierre

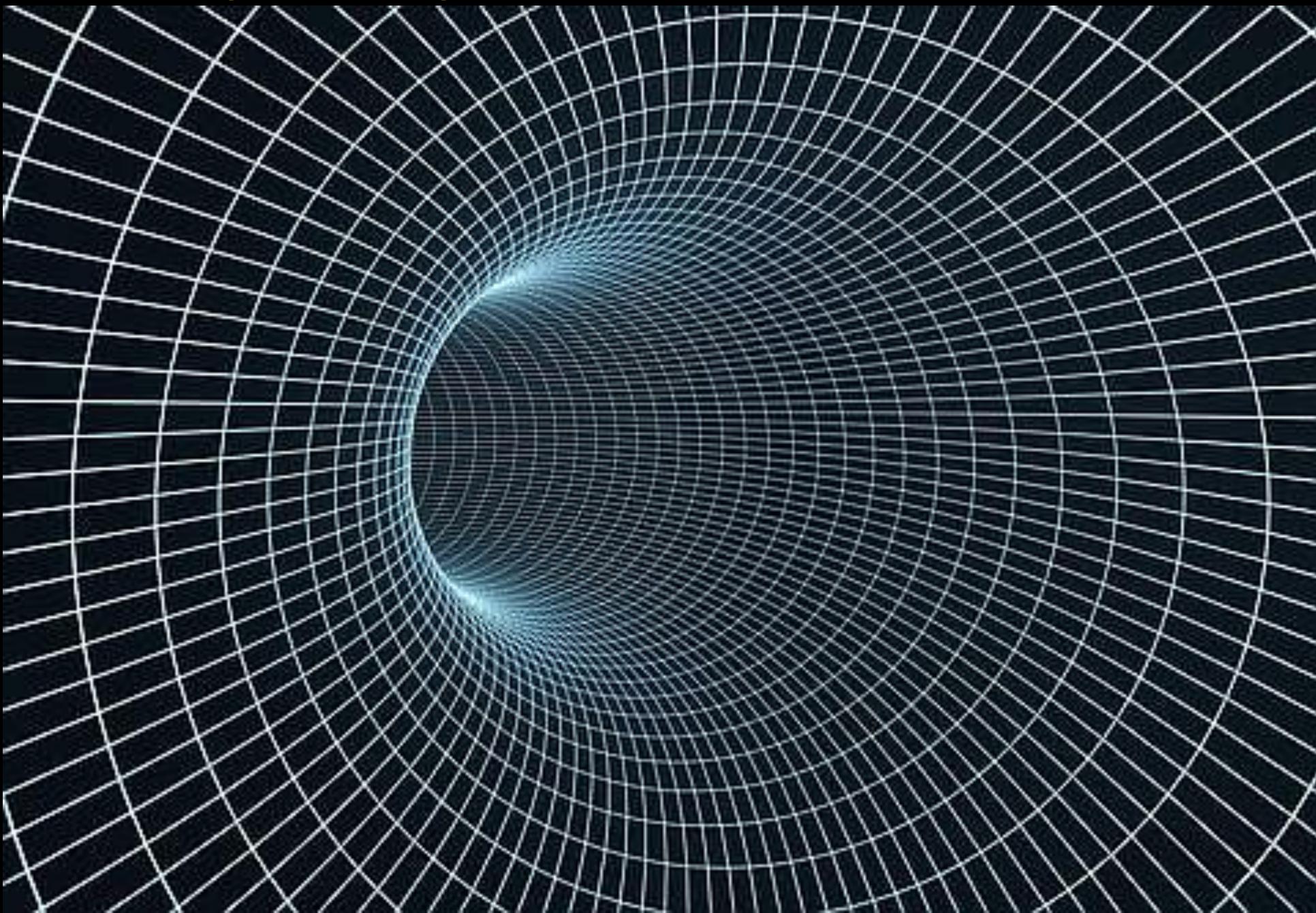


espansione

contrazione



Cunicolo spazio- temporale



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

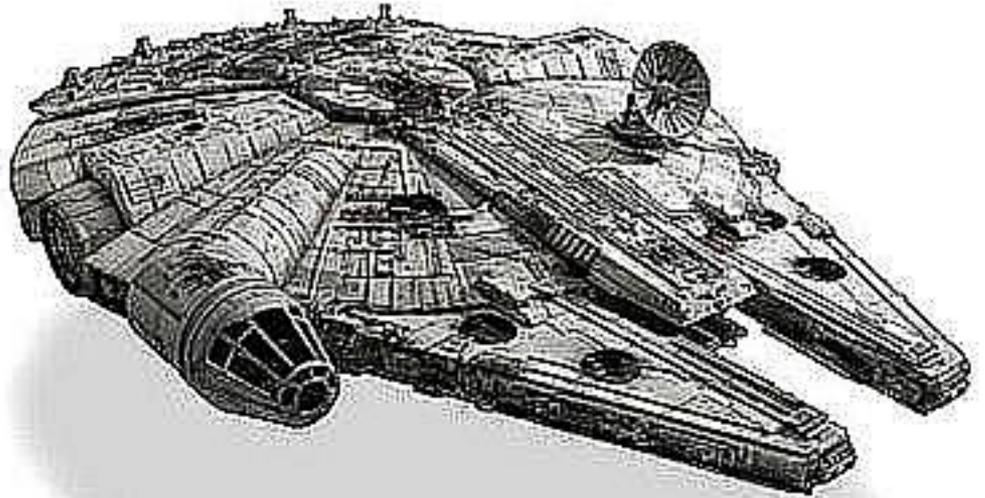
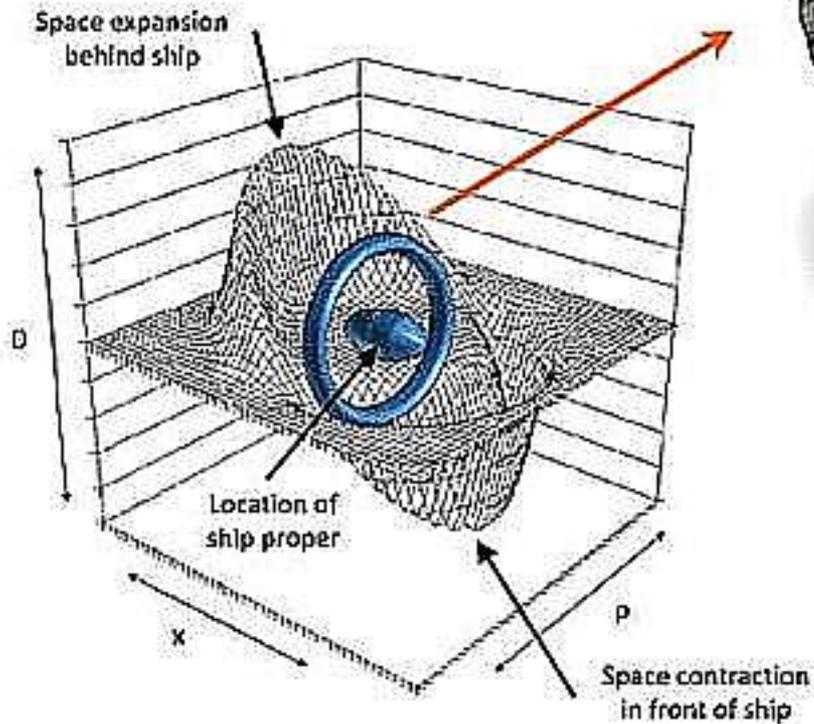
...grande quanto?

Curvatura e gravitazione

Le equazioni di Einstein legano la curvatura dello spazio-tempo alla densità di energia e quantità di moto in ogni punto dello spazio

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

Motore a Curvatura



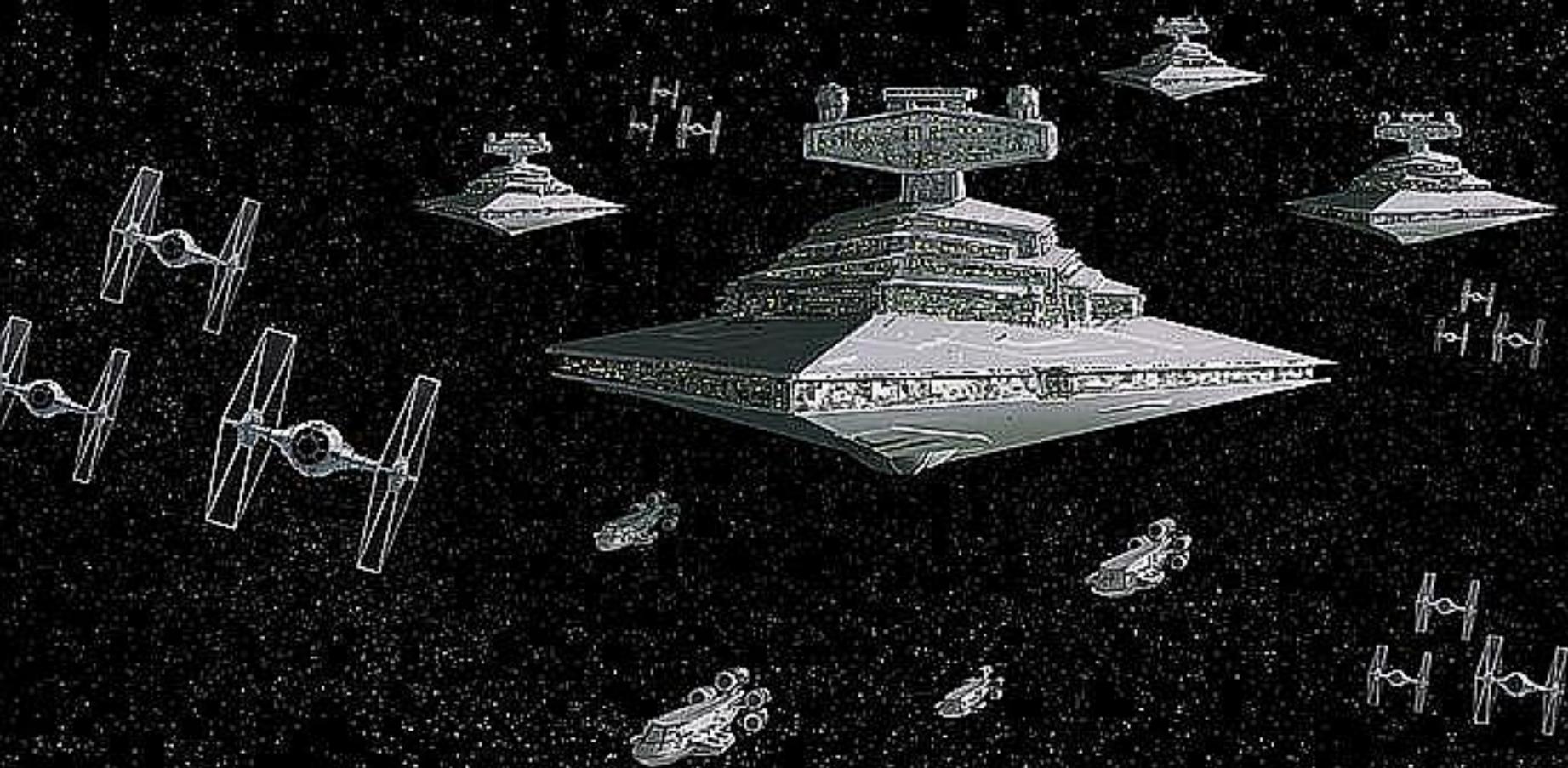
Viaggi Superluminali

- 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...

Uno scenario possibile



Come tornare al passato?

VOLUME 61, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

26 SEPTEMBER 1988

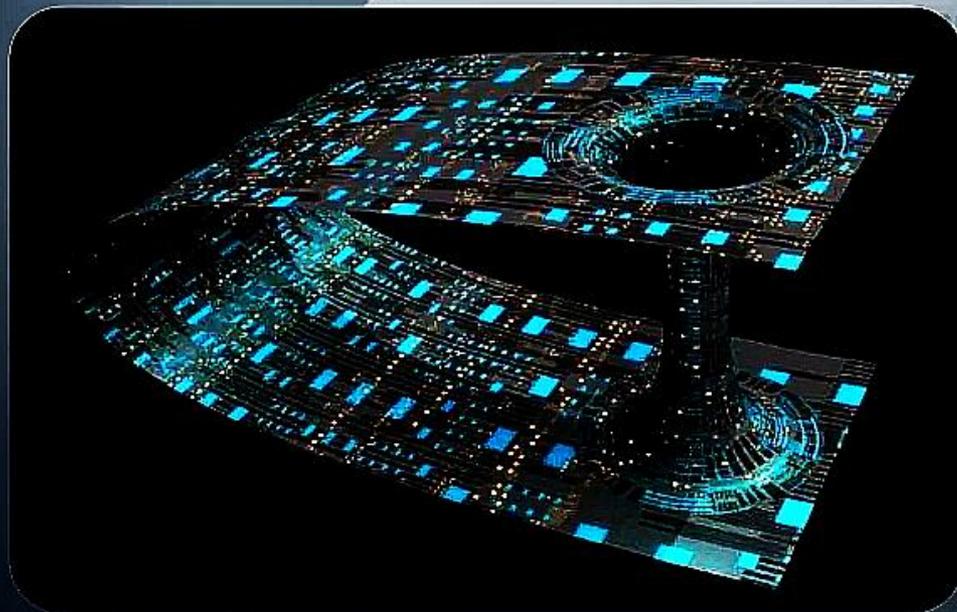
Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition

Michael S. Morris, Kip S. Thorne, and Ulvi Yurtsever

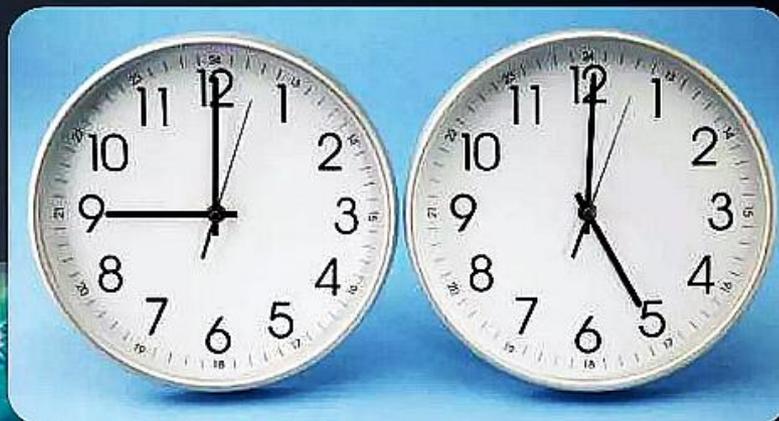
Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

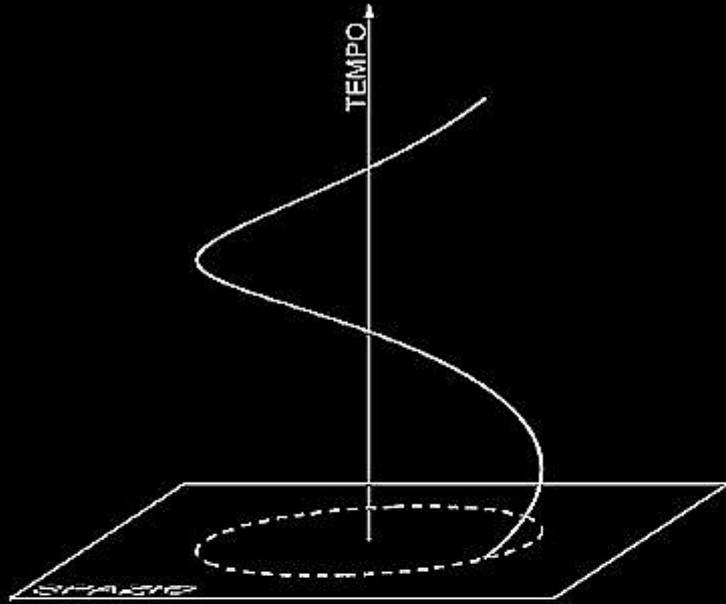
(Received 21 June 1988)

It is argued that, if the laws of physics permit an advanced civilization to create and maintain a wormhole in space for interstellar travel, then that wormhole can be converted into a time machine with which causality might be violatable. Whether wormholes can be created and maintained entails deep, ill-understood issues about cosmic censorship, quantum gravity, and quantum field theory, including the question of whether field theory enforces an averaged version of the weak energy condition.



Wormholes e viaggi nel tempo

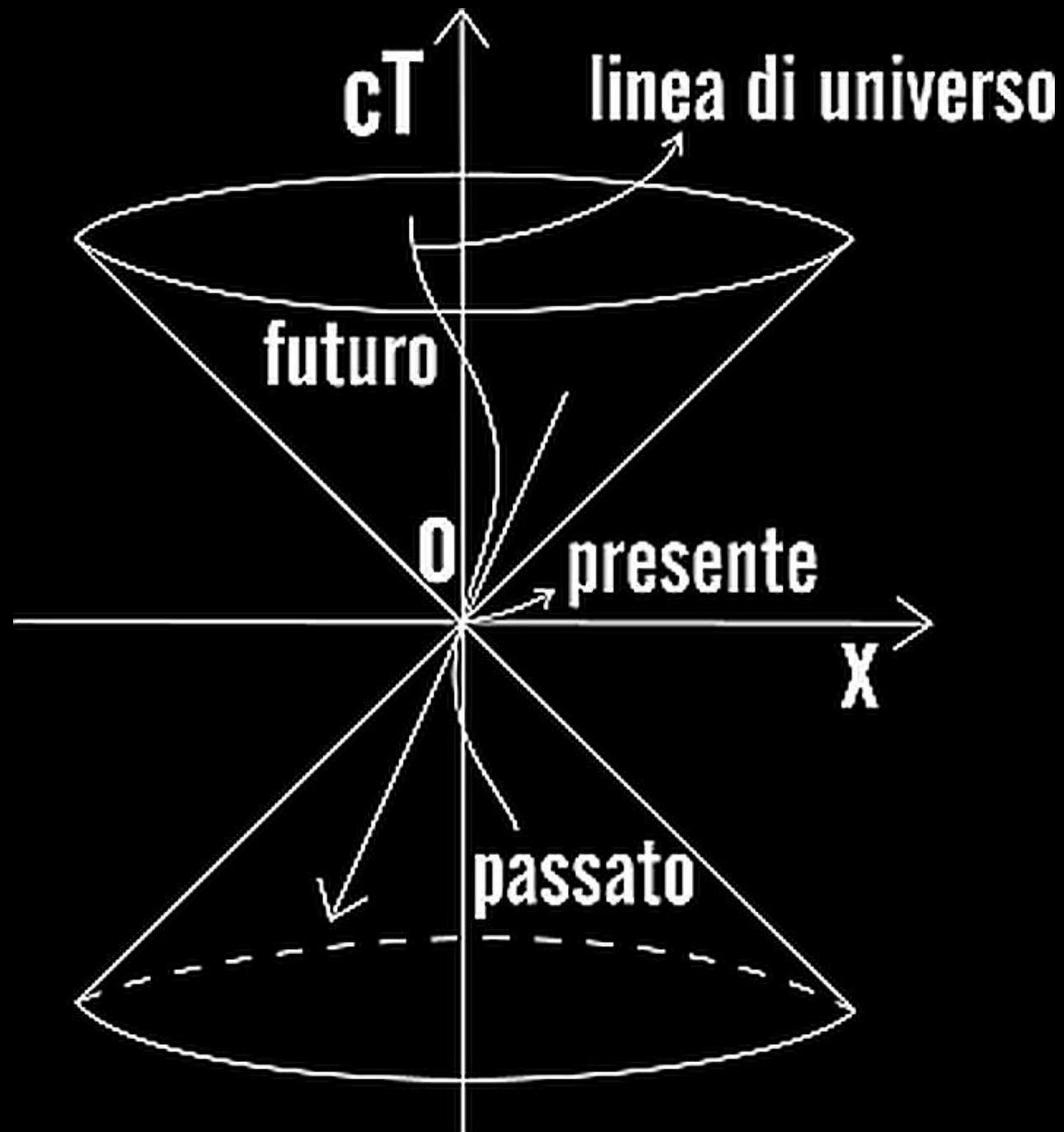


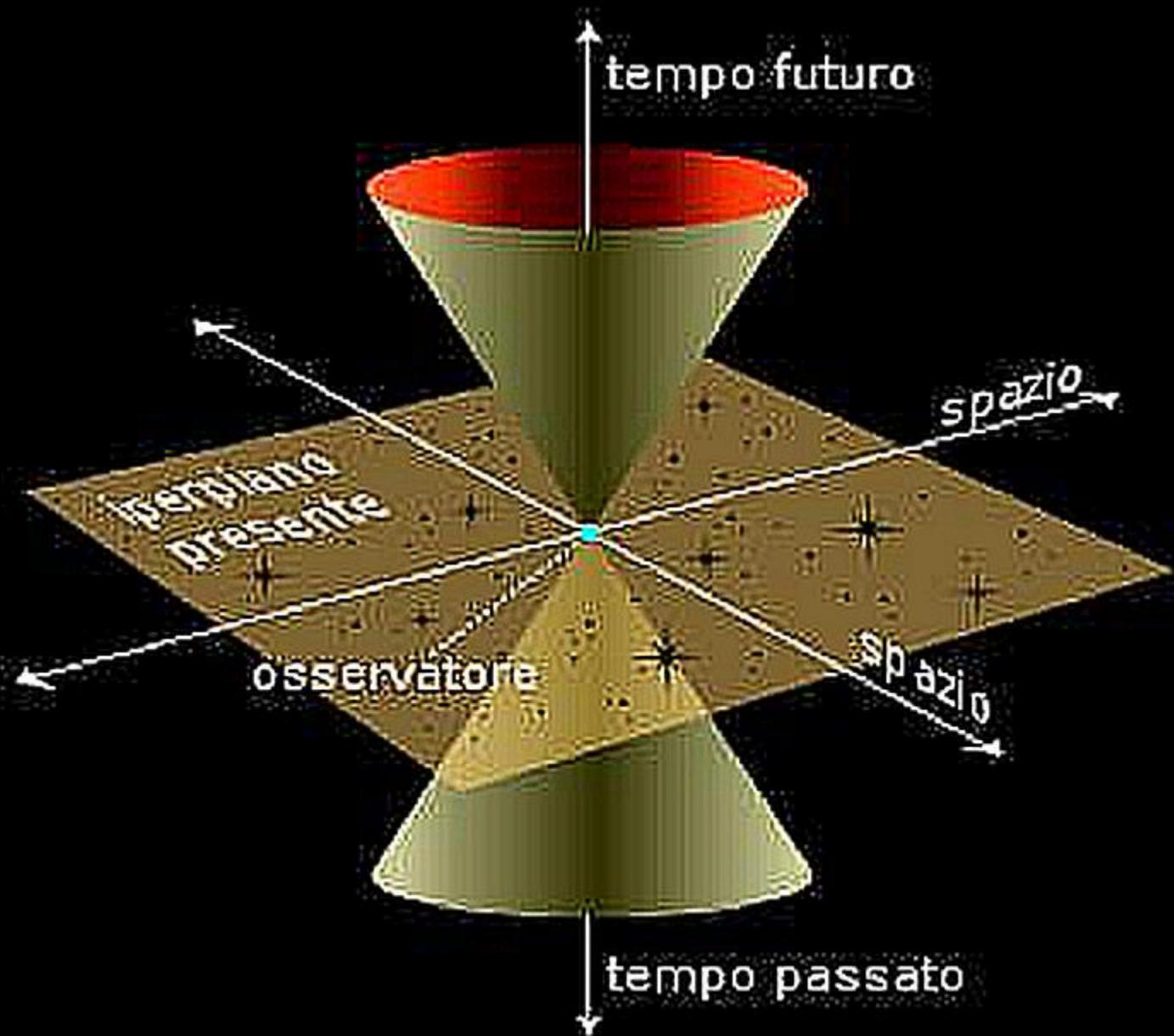


*lo spaziotempo
di
Minkowski*

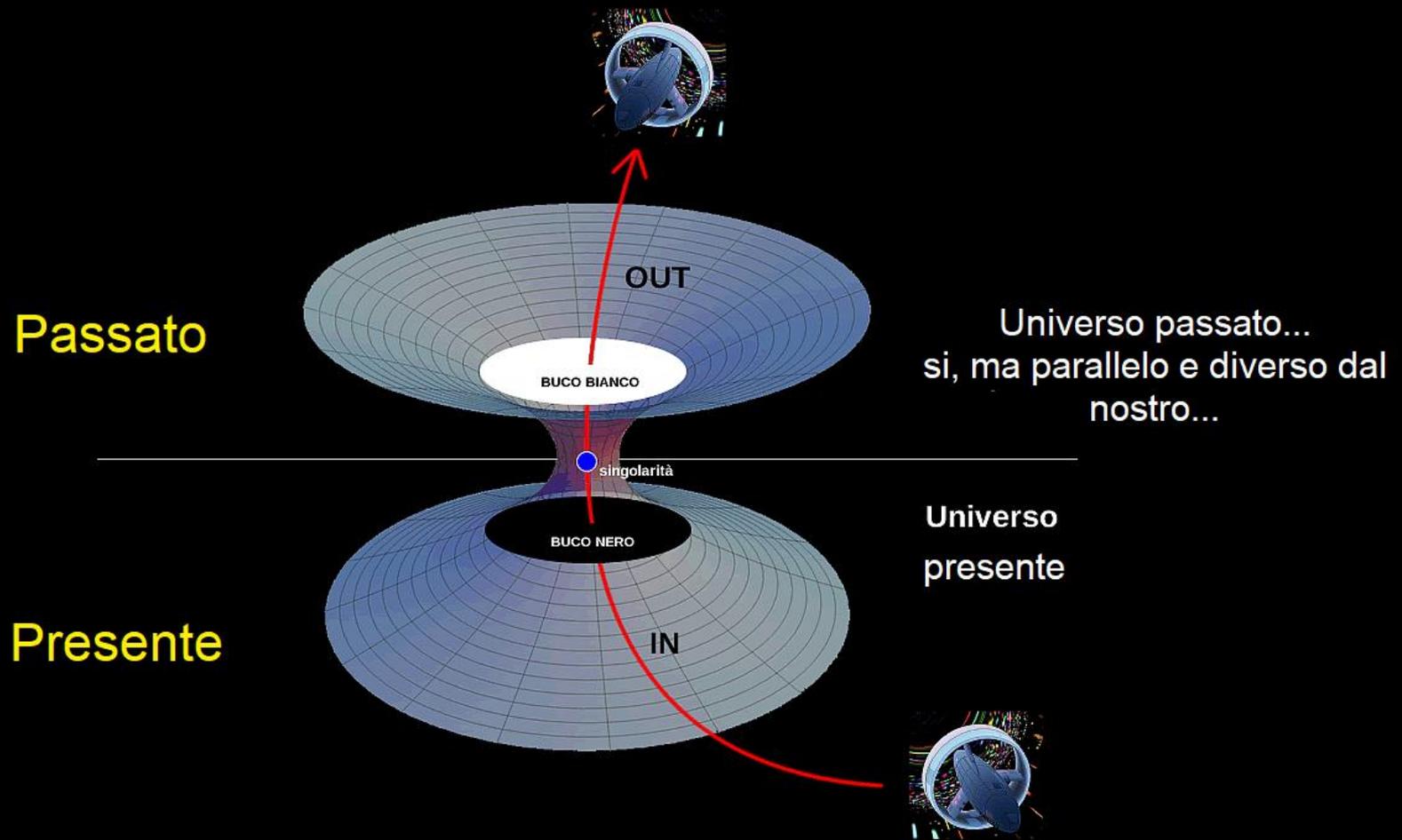
Hermann Minkowski







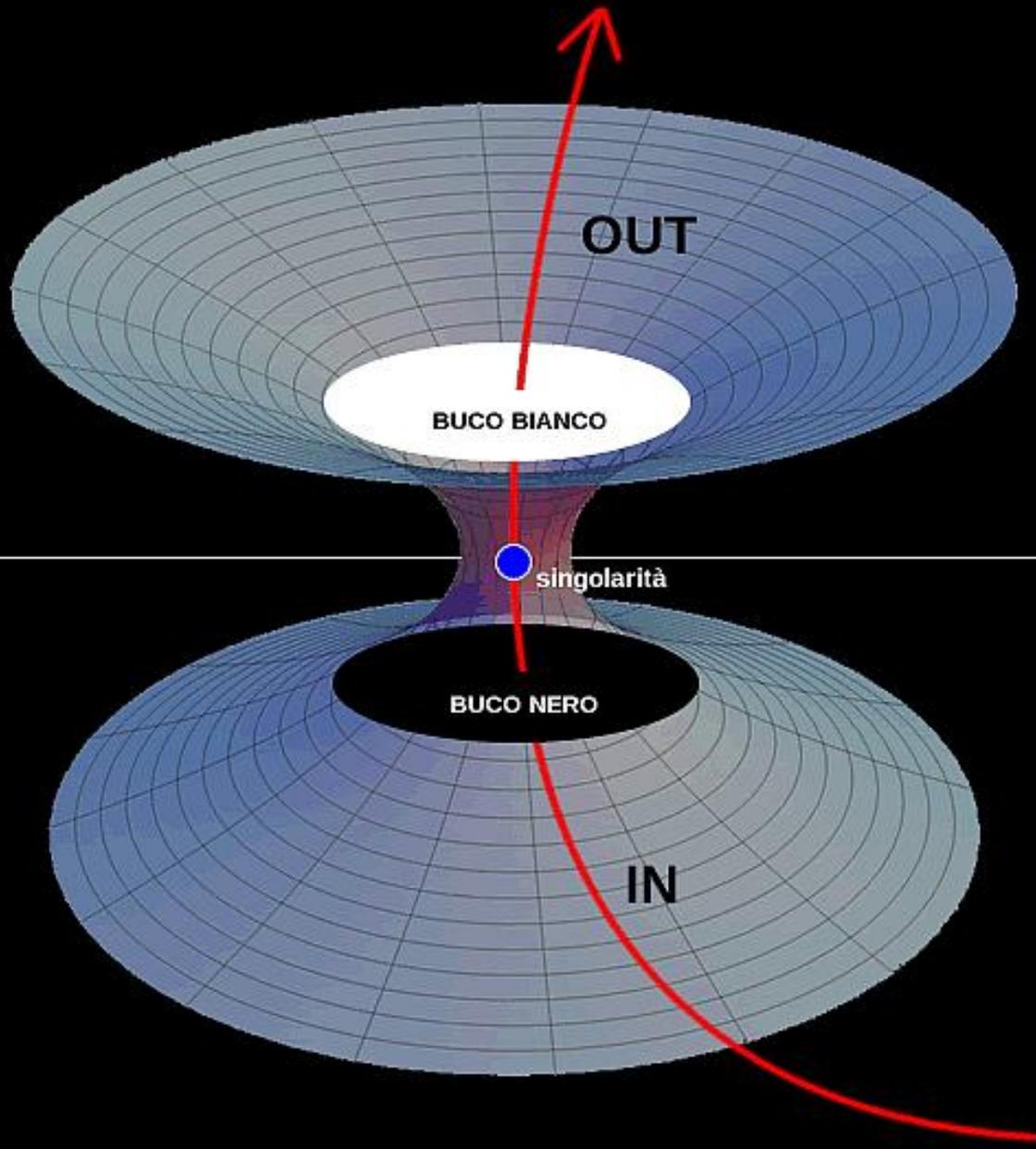
Si può viaggiare nel passato? sì, ma...





Il Tesseract e la Quinta Dimensione

Che cos'è il Bulk



?

Universo

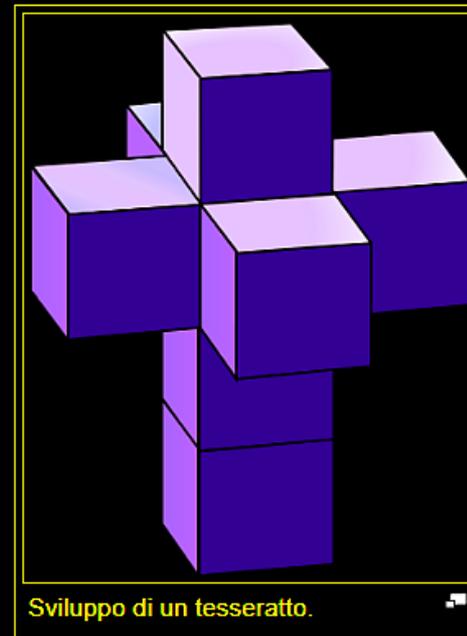
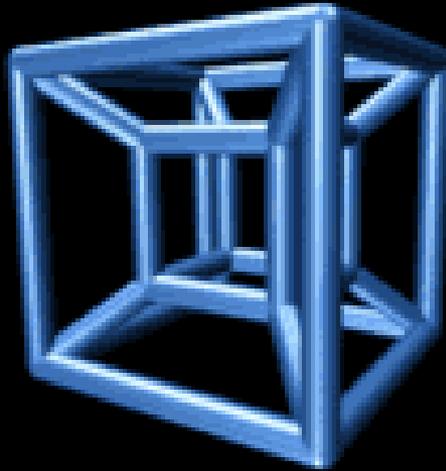
Un Tesseratto (Tesseract) è un Ipercubo quadridimensionale

Evolve in una quinta dimensione temporale

Il tesseratto ha 16 vertici, 32 spigoli, 24 facce quadrate e 8 facce tridimensionali cubiche.

Su ogni vertice incidono 4 spigoli, 6 facce quadrate e 4 facce cubiche.

La sua caratteristica di Eulero è $16-32+24-8=0$.



Ogni ipercubo n -dimensionale è ottenuto "congiungendo" due ipercubi $(n-1)$ -dimensionali paralleli. Infatti:

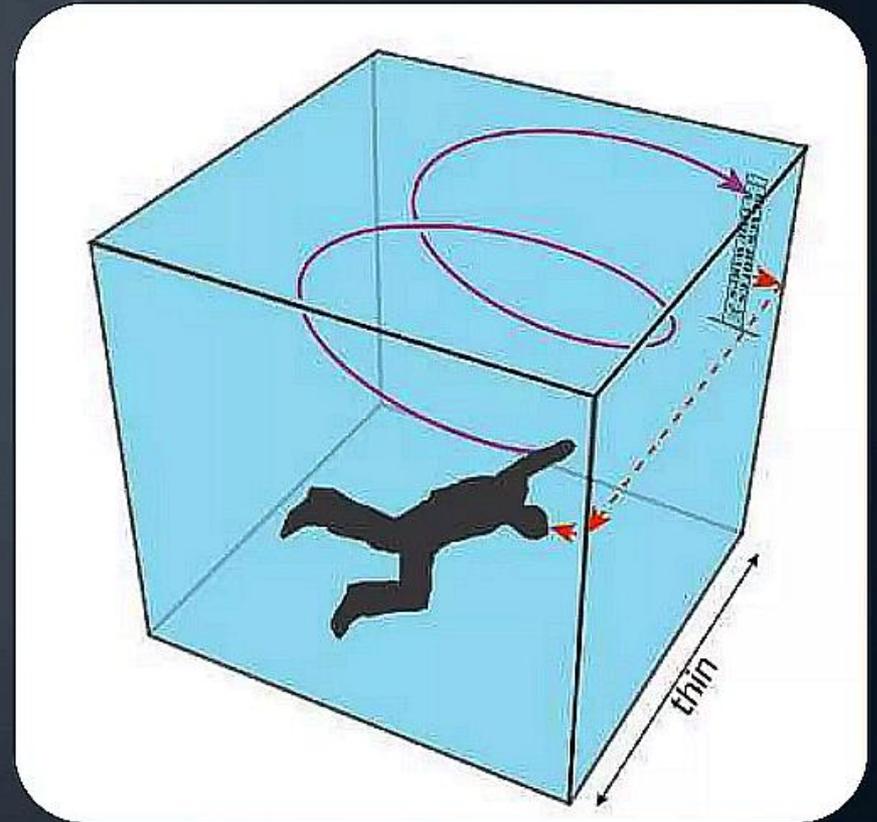
- ipercubo unidimensionale: è un segmento AB, ottenuto congiungendo due punti A e B con una linea,
- bidimensionale: due segmenti paralleli AB e CD possono essere congiunti formando un quadrato, con vertici denominati ABCD
- tridimensionale: due quadrati paralleli ABCD ed EFGH possono essere congiunti formando un cubo, con i vertici denominati ABCDEFGH
- quadridimensionale: due cubi paralleli ABCDEFGH ed IJKLMNOP possono essere congiunti formando un ipercubo, con vertici denominati A

Per questo motivo una proiezione del tesseratto nello spazio tridimensionale è come in figura, realizzata congiungendo due cubi "paralleli".

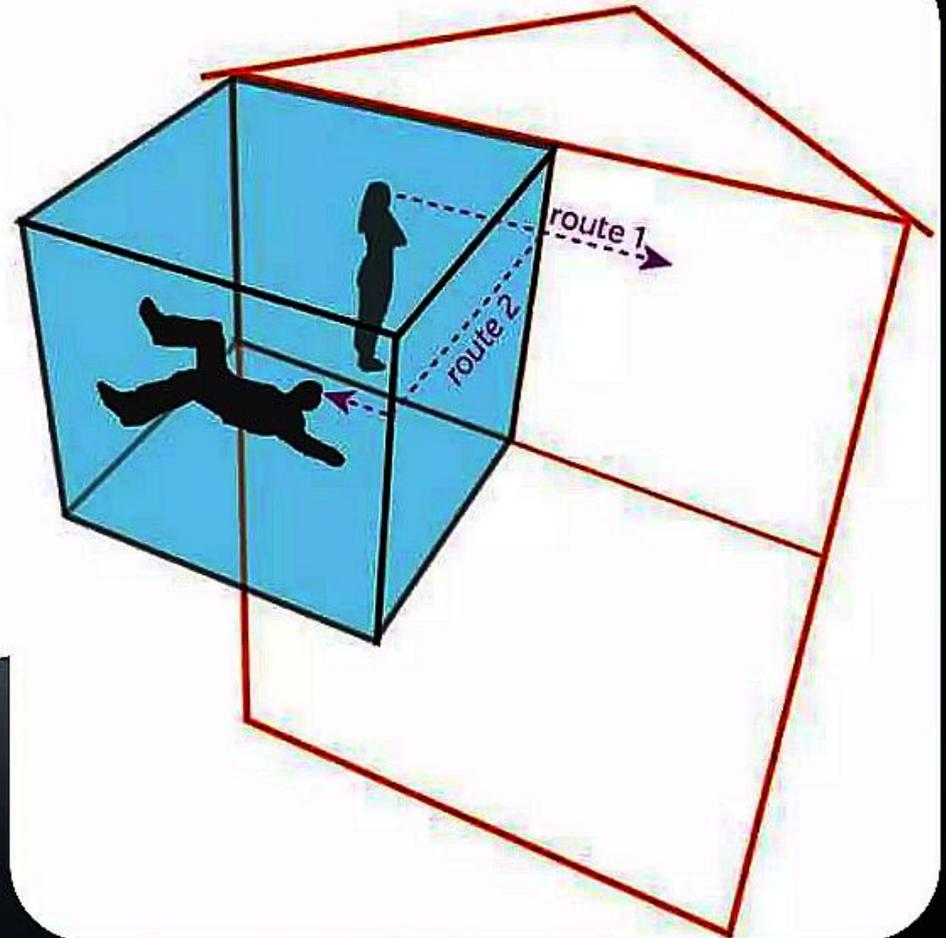
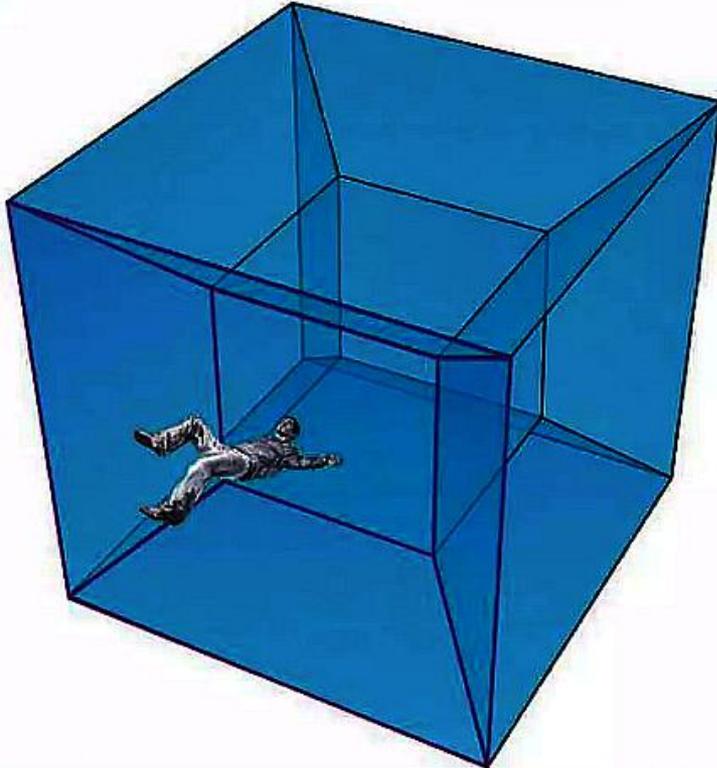
Il tesseratto si può sviluppare in 8 cubi, proprio come un cubo si può sviluppare in 6 quadrati.

Come ogni altro poliedro e politopo, il tesseratto può essere ruotato nello spazio quadri-dimensionale in cui giace. L'effetto di una tale rotazione può essere visto in una proiezione del tesseratto nello spazio o nel piano, come mostrato nelle figure.

II Tesseract

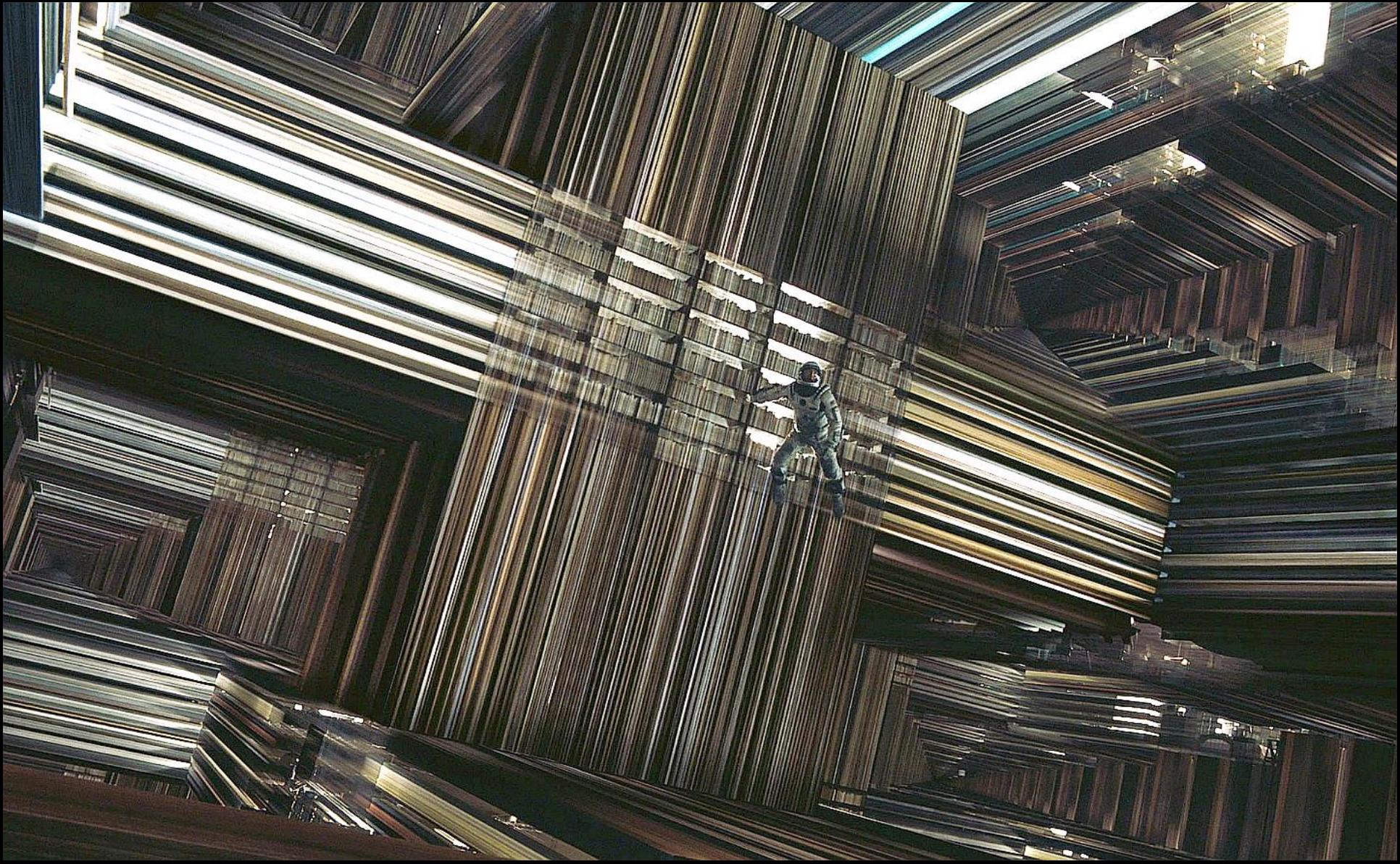


II Tesseract

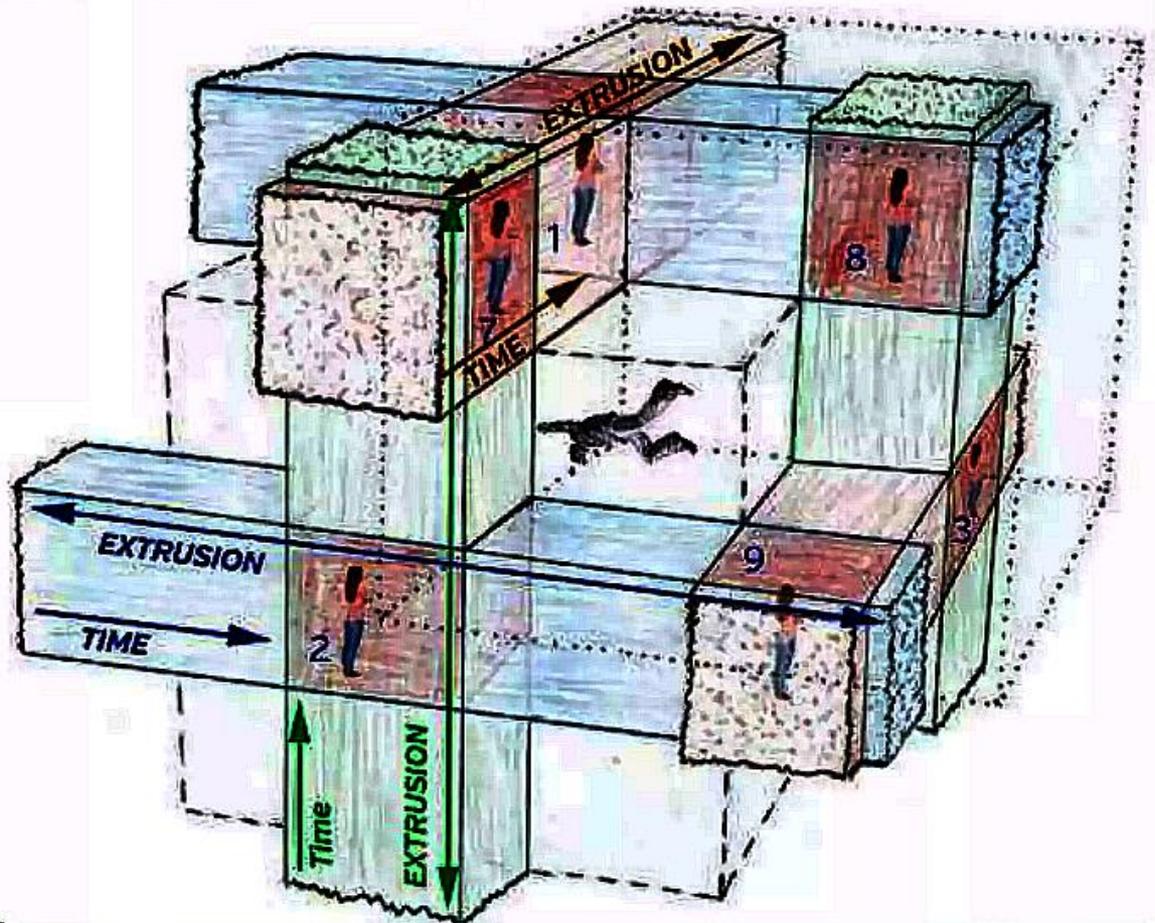
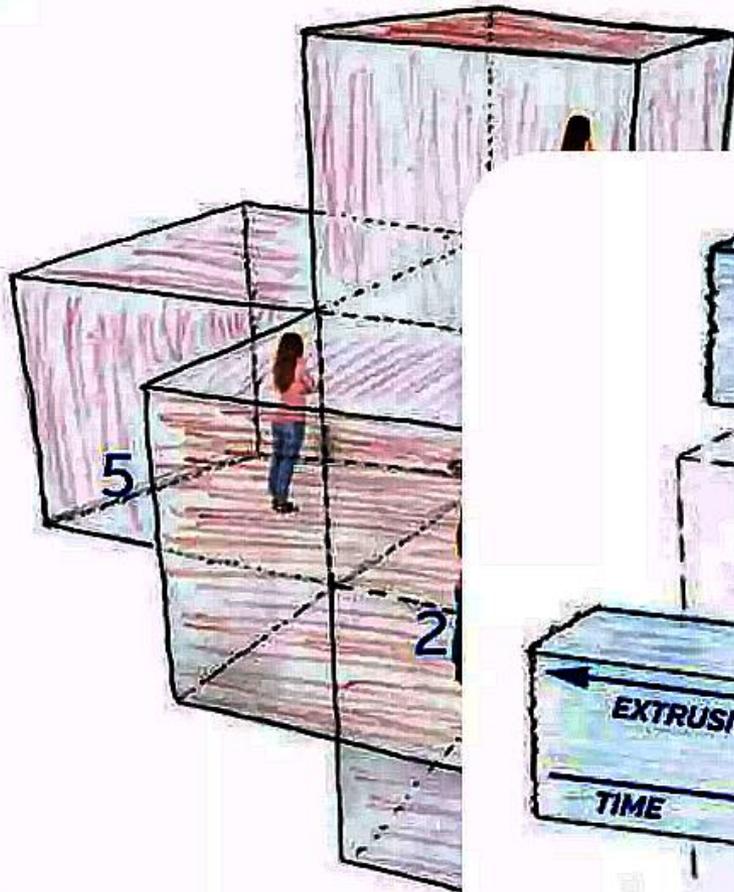


Noi siamo a 3
dimensioni...

Come ci apparirebbe?



II Tesseract



Ringraziamenti...

Ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quante ne sogni la tua filosofia...

William Shakespeare, "Amleto"





**Grazie
per
l'attenzione!!**