



Università della Terza Età "Cardinale Giovanni Colombo" – Milano

A.A. 2023 - 2024

Corso di Astrofisica

Docente : **Adriano Gaspani**

Lezione 8

# Il Multiverso. Esiste Veramente?

**Oggi come 10.000 anni fa,  
l'uomo si pone domande  
sull'universo che lo circonda.**

- ❖ **Come si è formato?**
- ❖ **Qual è la sua struttura?**
- ❖ **Di che cosa è fatto?**

# La cosmologia

---

- ❖ **La scienza che cerca di dare risposte alle domande che da sempre si pone l'uomo è la **COSMOLOGIA.****
- ❖ **Essa studia :**  
**la composizione chimica,**  
**l'origine,**  
**l'evoluzione dell'Universo.**

# Un po' di storia

---

- ❖ Nella storia del pensiero scientifico occidentale **la cosmologia** ha avuto un ruolo importante e legato alla filosofia e alla religione (Aristotele, Tolomeo, la Bibbia). "Teoria geocentrica"
- ❖ Con Copernico, Galileo e Keplero si passa dal geocentrismo all'eliocentrismo "Teoria eliocentrica".
- ❖ Sempre, però, si tratta di teorie che considerano un Universo assai limitato e che comprendeva, al più, il nostro Sistema Solare.

# Le competenze

- ❖ Una volta il problema era di competenza dei filosofi ( Aristotele, Galileo, Kant ).
- ❖ Oggi rispondere a queste domande è privilegio degli astronomi.
- ❖ Questi con gli osservatori più potenti ed i rivelatori più sensibili sondano le profondità del cielo.

# **Gli Strumenti**

- ❖ **Telescopi ottici;**
- ❖ **Radiotelescopi;**
- ❖ **Interferometri;**
- ❖ **Telescopi Spaziali.**

# OGGI

---

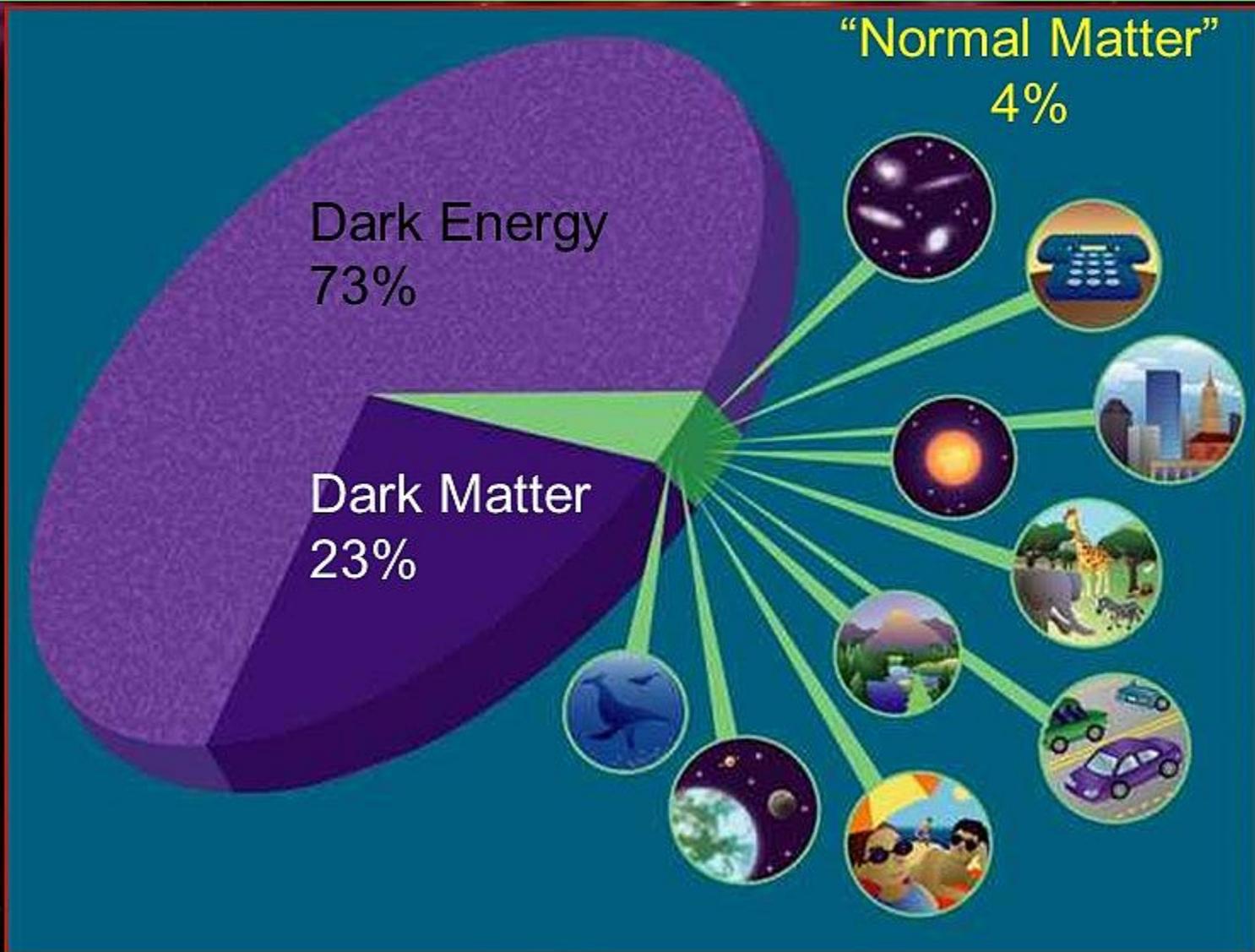
- ❖ Oggi noi sappiamo che la Terra fa parte di un sistema planetario che a sua volta è parte della Via Lattea che è la nostra Galassia e che non è altro che una delle moltissime galassie dell'Universo.
- ❖ Fu l'astronomo **Edwin Hubble** che, soltanto negli anni '20, scoprì che alcune stelle facevano parte di altre galassie lontanissime dalla nostra.

# Di cosa è fatto l'Universo?

---

- L'elemento chimico più abbondante dell'Universo è L'idrogeno.
- L'H insieme agli altri elementi ( He, Li, C, etc.) si trovano in uno stato di "Plasma".
- questo materiale si trova organizzato in strutture via via sempre più complesse:
- Soprattutto stelle, e Galassie

# Materia ed energia

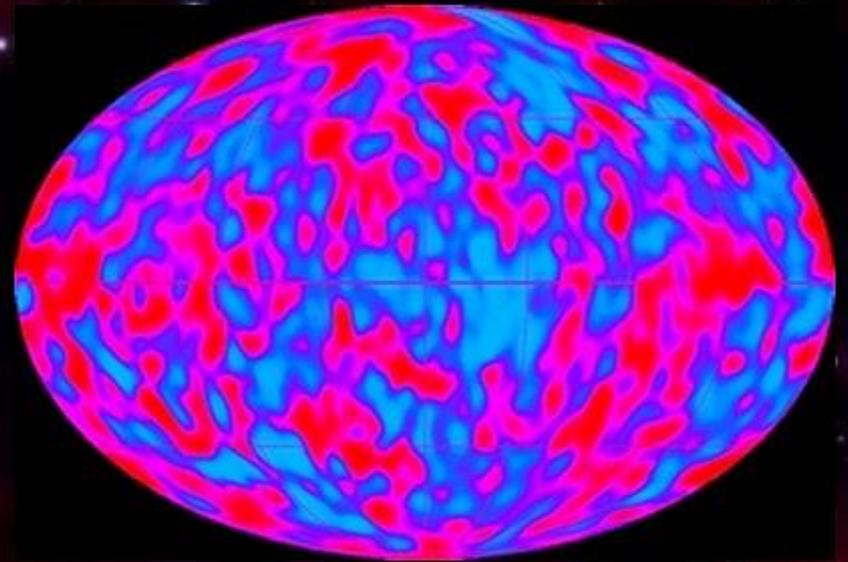


# Come si è formato l'Universo?

- Il primo a proporre lo scenario dell'esplosione fu l'abate **Lemaitre** nel '27,
- **Hubble**, nel '29, scoprì, analizzando la radiazione emessa dalle galassie (red shift), che esse si stavano allontanando reciprocamente,
- Negli anni '40 il fisico **Gamow** ipotizzò che gli atomi più leggeri si siano formati nei primi istanti di vita dell'Universo,
- Nel '65 la scoperta della radiazione di fondo cosmica.

# La radiazione di fondo

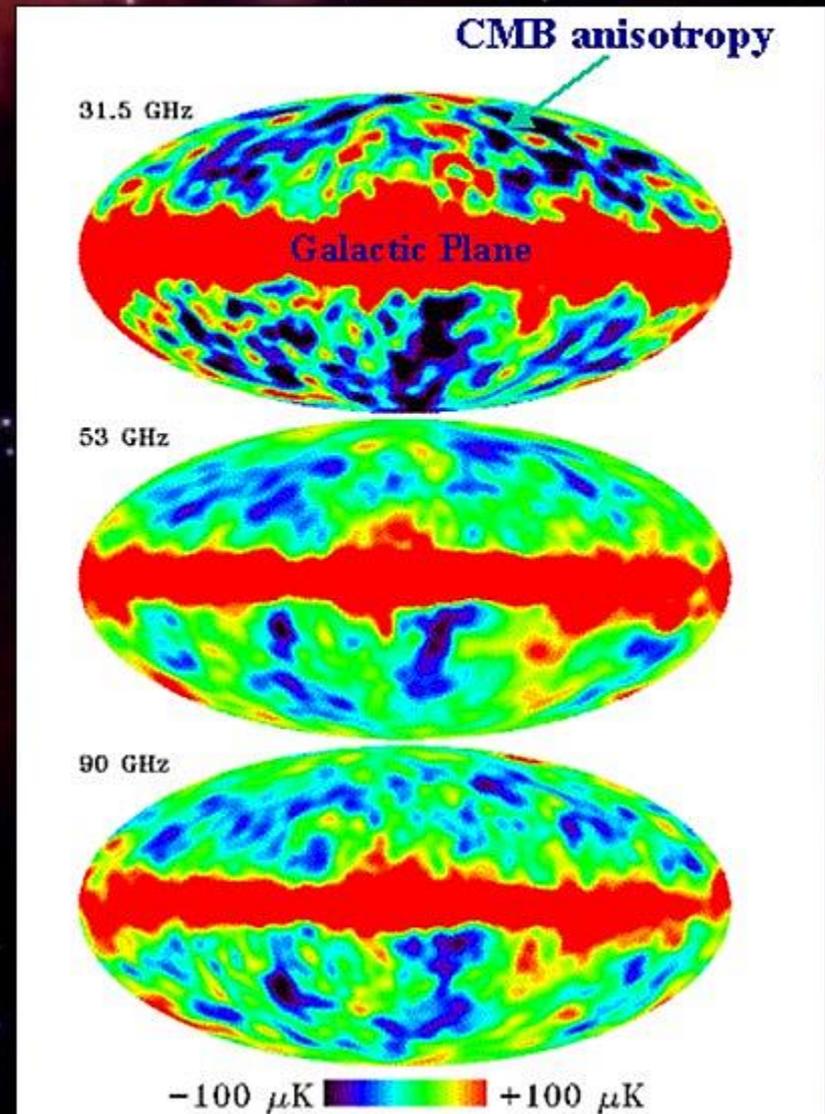
La scoperta del 1964 delle emissioni di fondo dell'universo fu una grande vittoria per i sostenitori della teoria del Big Bang.



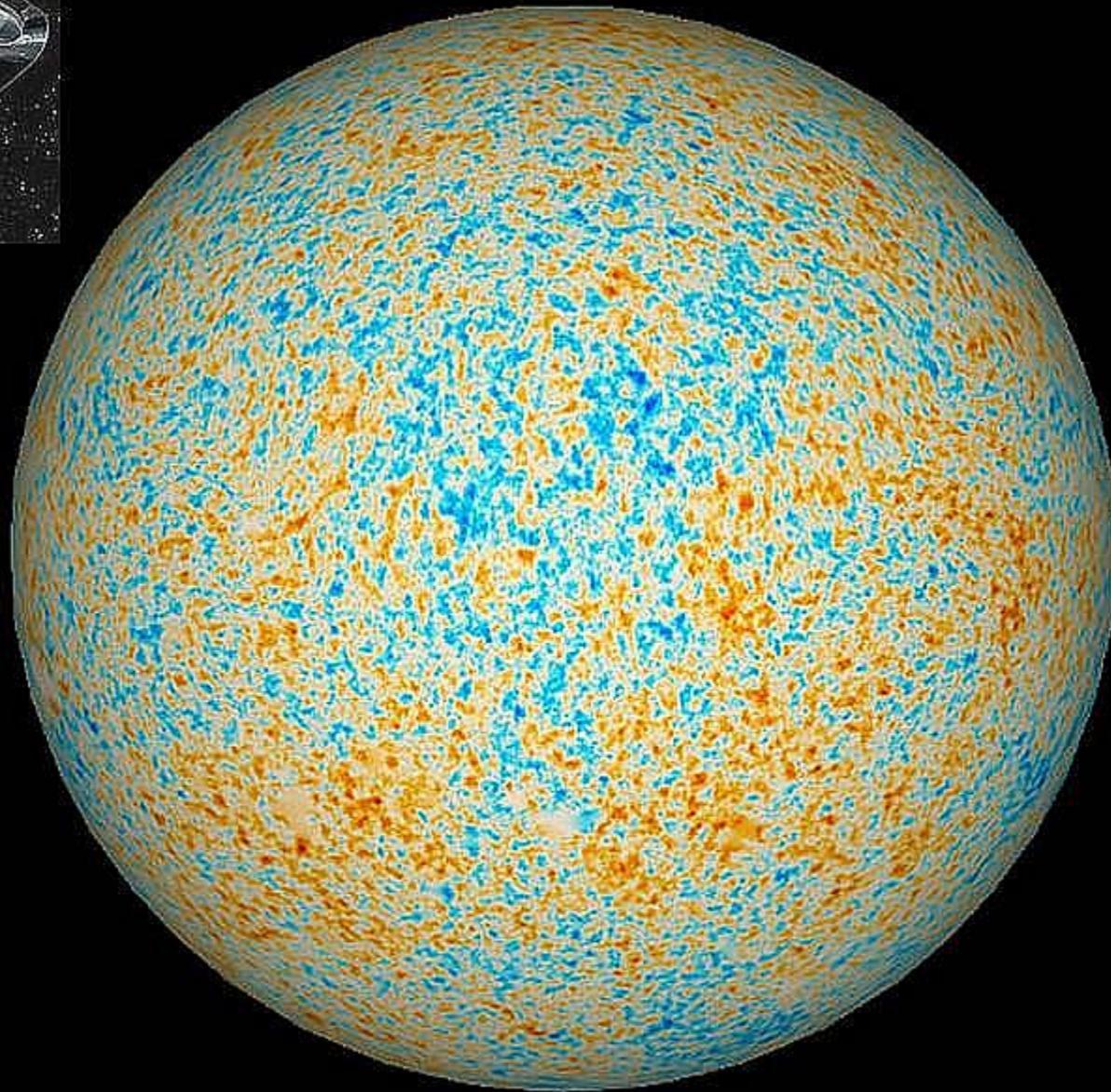
*Mapa della radiazione di fondo cosmico a microonde osservata dal satellite COBE*

# L'universo raffreddatosi dopo il Big Bang conserva traccia dell'esplosione

Una radiazione elettromagnetica omogenea ed isotropa a  $3^{\circ}\text{K}$  che permea l'intero universo



Planck  
2018



CMB flux (Cosmic Microwaves Background)  
anisotropia termica

# La teoria evolutiva del "Big Bang",

---

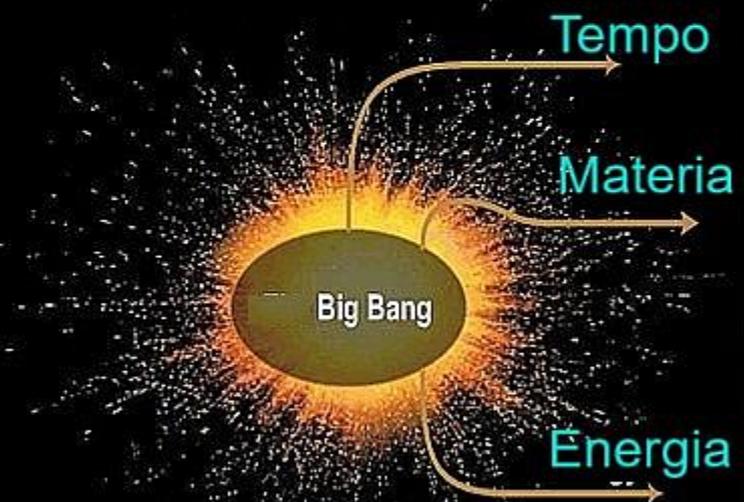
- La constatazione che l'Universo si espande ha condotto alla teoria evolutiva del "Big Bang", cioè di un'enorme esplosione iniziale, per spiegare la sua nascita.
- La teoria del "Big Bang" è oggi la più accreditata perché ci consente di spiegare numerose osservazioni e, anche se presenta qualche problema ancora non risolto, non ha alternative valide.

# Il "Tempo di Planck"

- Secondo gli astrofisici l'Universo non cominciò all'istante "Zero", ma ad un istante detto "Tempo di Planck"  $10^{-43}$  secondi dopo il Big Bang.
- Prima tutta la materia e l'energia erano concentrati in una "Singolarità": uno stato estremo dove non esistono i concetti di spazio e tempo.
- Al tempo di Planck l'Universo era caldissimo e piccolissimo.
- Successivamente si formarono i quark dai quali nacquero protoni e neutroni con le relative antiparticelle

# L'universo inflazionario

- Nel 1981 l'americano Alan Guth del Massachusetts Institute of Technology e il giapponese Kazuhiro Sato presentarono, indipendentemente l'uno dall'altro, la teoria dell'"universo inflazionario"



# L'universo inflazionario

- Si tratta di una teoria secondo la quale il super-microuniverso si sarebbe espanso, alla nascita, in una maniera vertiginosa:
- in un solo decimo di milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo ( $10^{-34}$  secondi) avrebbe aumentato il suo volume di dieci miliardi di volte (1 con 100 zeri)
- Per spiegare questa improvvisa espansione dell'universo appena nato, i due fisici hanno ipotizzato che il vuoto stesso, cioè la condizione dell'universo prima del Big Bang, fosse un "vuoto ad alta energia".

## **Da $10^{-23}$ a $10^{-6}$ secondi**

- **l'Universo era delle dimensioni di un protone.**
- **Protoni ed antiprotoni si annichilarono trasformando le loro masse in energia elettromagnetica.**
- **Successivamente annichilarono anche gli elettroni e gli antielettroni.**
- **Queste annichilazioni produssero grandi quantità di energia elettromagnetica. ("era radiativa").**

# Tra 1 secondo e 300.000 anni

- Si formarono i primi nuclei di Deuterio e, successivamente, quelli di Elio e Litio;
- La **T.** scese sotto i 10 miliardi di gradi;
- Si ebbero le prime reazioni di fusione nucleare;
- Materia ed energia erano molto accoppiate e si trasformavano l'una nell'altra continuamente;
- A 300 000 anni la **T.** scese ancora, materia ed energia si disaccoppiarono e **l'Universo divenne trasparente.**

# Dopo 100 milioni di anni

---

- La **T.** scese sotto i **4000°** ;
- Gli elettroni si unirono ai nuclei e la materia divenne neutra (atomi);
- Radiazione e materia interagirono sempre meno.

## Nel miliardo di anni successivo

---

- La materia poté cominciare ad aggregarsi per formare le **protogalassie**;
- Gigantesche nubi di gas freddissimo ( $-220^{\circ}\text{C}$ ), per collasso gravitazionale, dettero origine alle **galassie**.

**Dopo circa  
2/3 miliardi  
di anni**

■ **Le galassie si  
unirono in  
ammassi.**

**Dopo 4 miliardi  
di anni**

■ **Si formarono  
le prime  
Stelle.**

# **15 miliardi di anni**

---

- **L'Universo nel frattempo si era espanso e rarefatto;**
- **La radiazione era diventata molto meno energetica;**
- **Aveva cominciato ad assumere l'aspetto che oggi conosciamo.**

# Il Big Bang è solo una teoria?

---

- Il "Redshift" (spostamento verso il rosso)
- La CMBR (radiazione di fondo cosmico a microonde)

**sono le prove che l'Universo si è formato in seguito ad una grande e rapidissima espansione**

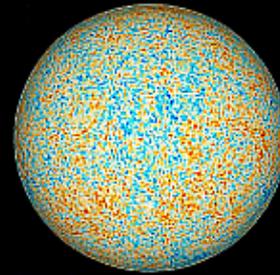
**...non un'esplosione!**

# Qual è la struttura dell'Universo?

---

- **Molti modelli sono stati proposti, in questi ultimi anni, da autorevoli astrofisici.**

# Storia dell'Universo



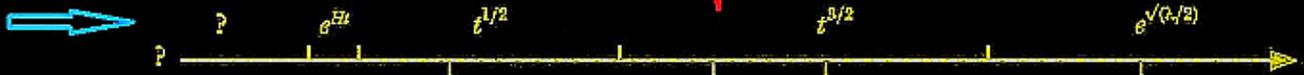
CMB flux (Cosmic Microwaves Background)  
anisotropia termica

C.M.B

Componente che  
domina la dinamica  
dell'Universo



Fattore di scala  $a(t)$



Età  
dell'Universo

Tempo e transizioni



Eventi

Big bang o  
Big bounce

Formazione  
dei nuclei

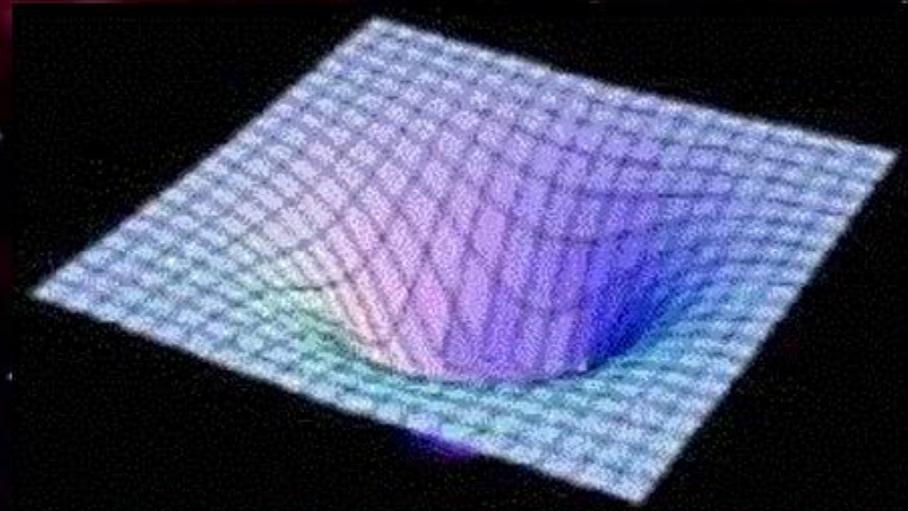
Formazione  
di atomi  
e fondo  
diffuso

Formazione  
delle galassie

Presente

# Qual'è la forma dell'Universo ?

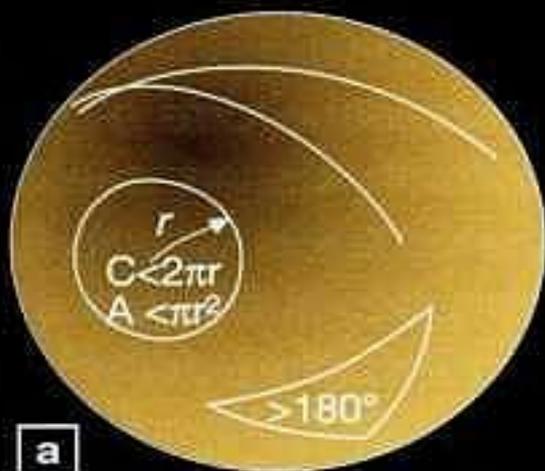
- Una delle intuizioni più profonde della Relatività Generale è stata la conclusione che la massa causa la curvatura dello spazio, e i corpi che viaggiano nello spazio curvo vengono deviati nella loro traiettoria come se una forza agisse su di loro.



# L'Universo è aperto o chiuso?



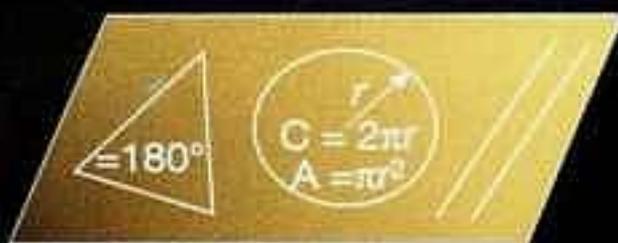
- Se lo spazio stesso è curvo, ci sono tre possibili geometrie per l'Universo. Ognuna di esse è legata alla quantità totale di massa dell'Universo (e quindi all'intensità totale della forza gravitazionale), e ciascuna implica un diverso passato e un diverso futuro per l'Universo.



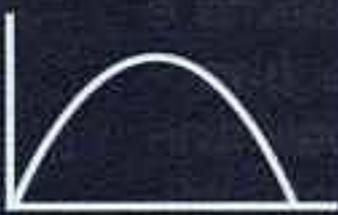
**a**



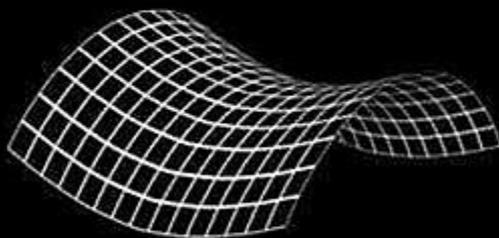
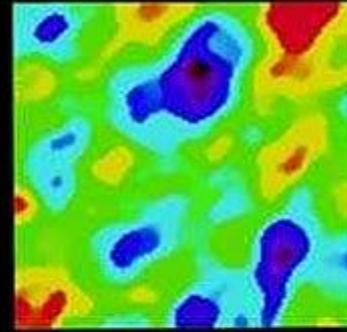
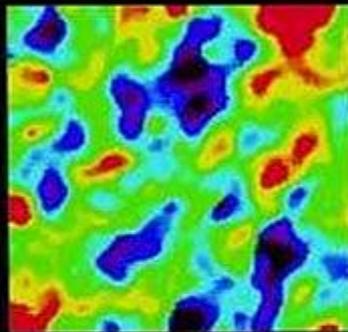
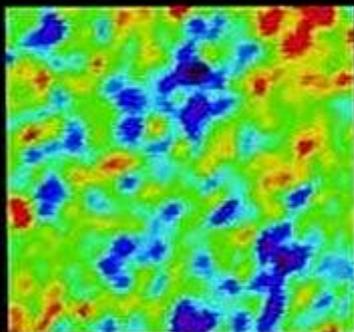
**b**



**c**

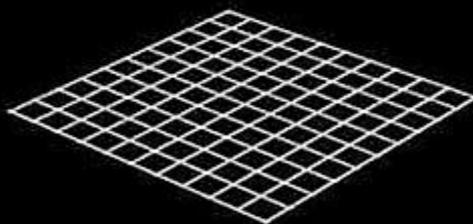
Caratteristiche	chiuso	aperto	piatto
Parametro di densità $\Omega$ $\frac{\text{densità effettiva}}{\text{densità critica}}$	$\Omega > 1$	$\Omega < 1$	$\Omega = 1$
Parametro decelerazione $q_0$ $\frac{\text{distanza}}{(\text{velocità})^2}$	$q_0 > 1/2$	$q_0 < 1/2$	$q_0 = 1/2$
Futuro dell'universo	Collasso finale 	Espansione perpetua 	Espansione tendente a zero 

# GEOMETRY OF THE UNIVERSE



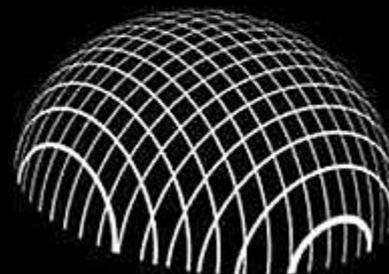
**OPEN**

Fluctuations largest on half-degree scale



**FLAT**

Fluctuations largest on  
1-degree scale



**CLOSED**

Fluctuations largest on  
greater than 1-degree scale

# Un Universo frattale ?

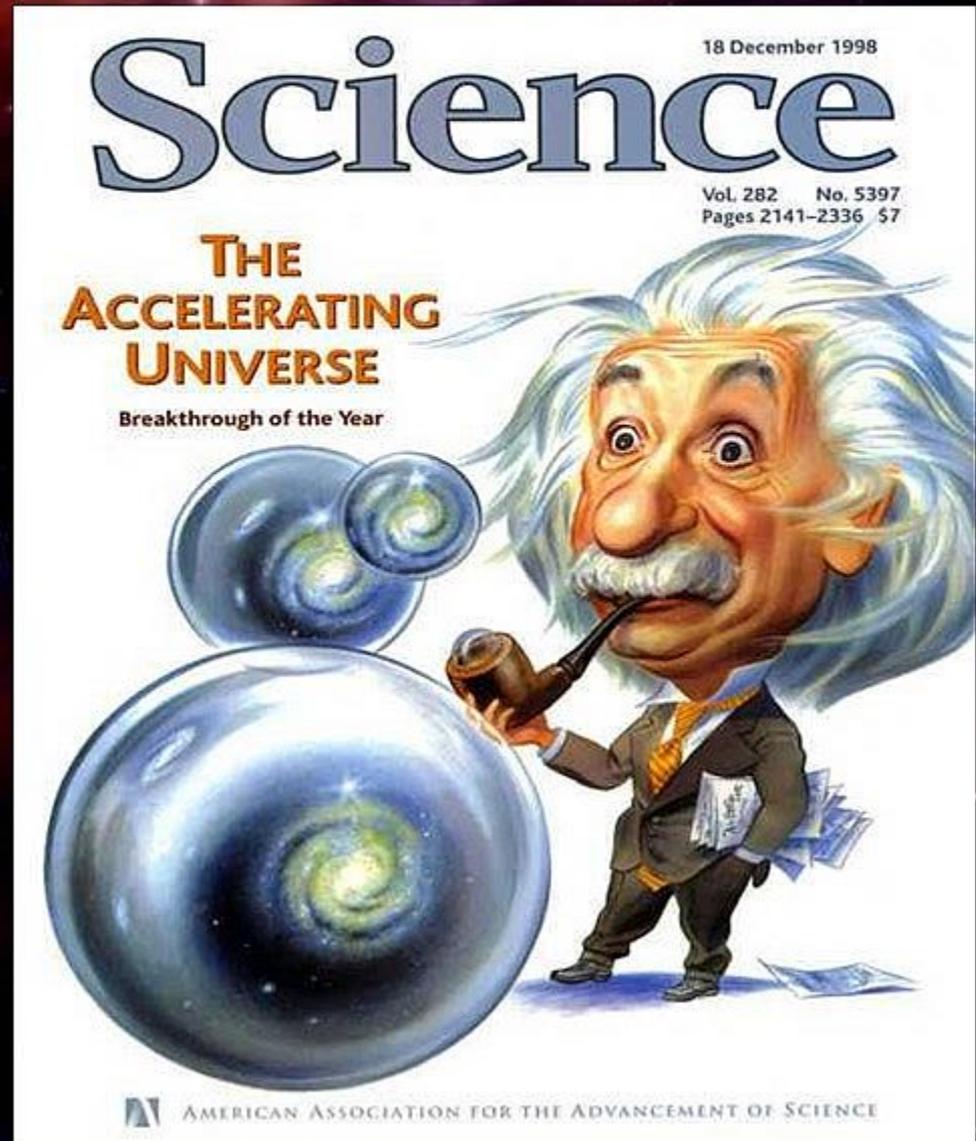


- L'osservazione della presenza di strutture di galassie molto estese e di grandi spazi vuoti, ossia di grandi irregolarità nell'Universo a vasta scala, ha portato alcuni astronomi a proporre per l'Universo una struttura frattale,
- I frattali sono strutture molto irregolari: alberi, nuvole, montagne, fulmini.

**No!!**

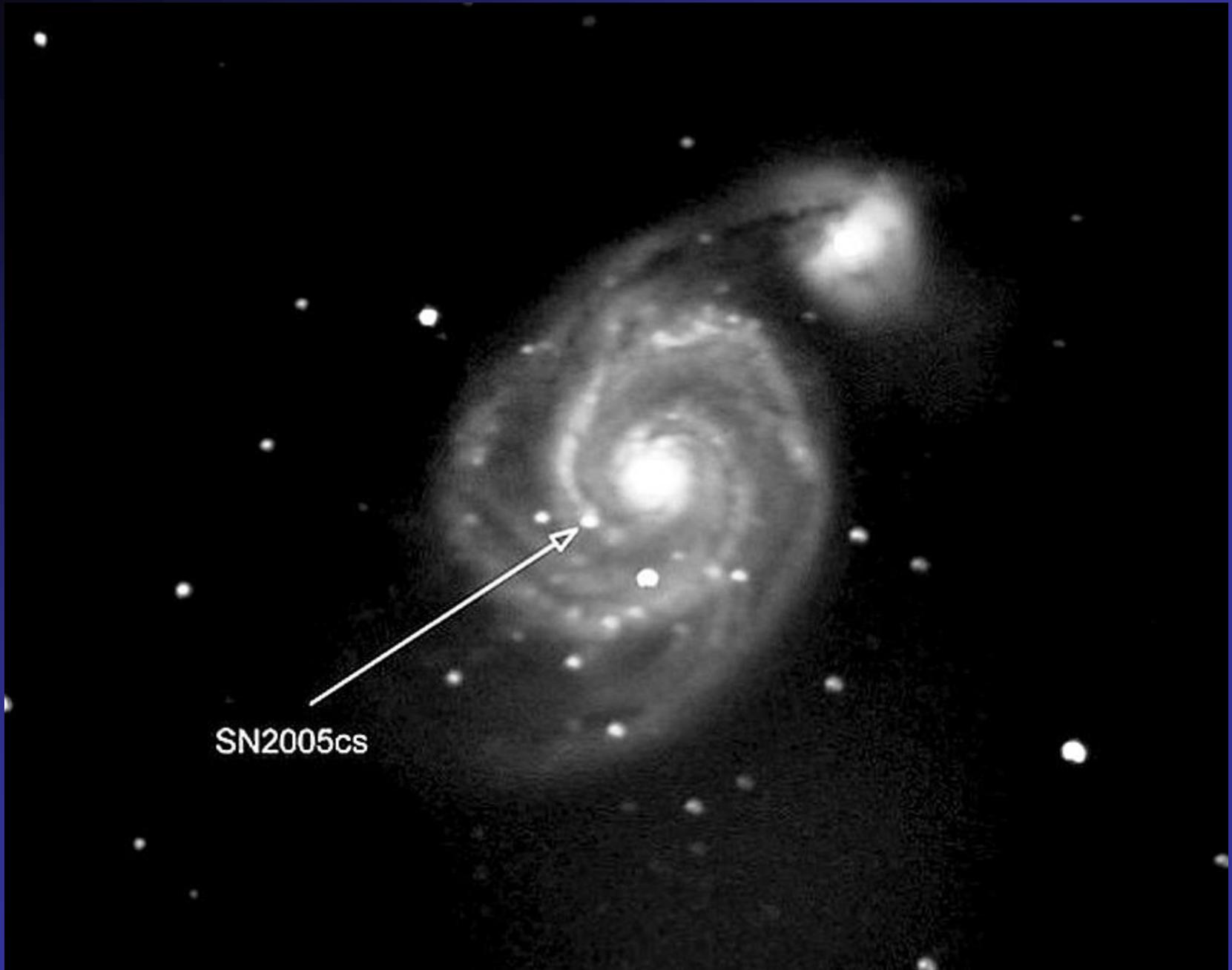
# L'espansione accelera?

- Gli studi portati avanti indipendentemente da due gruppi distinti, l' "High-z Supernova Search Team" ed il "Supernova Cosmology project" hanno portato ad una scoperta inaspettata.



# Supernovae di tipo Ia

Le supernovae di tipo Ia (SN Ia) sono sistemi stellari binari che contengono una nana bianca e una gigante rossa. La nana bianca è stabile finché la sua massa rimane inferiore alle  $1.4 M_{\odot}$ . La nana bianca sottrae materia alla gigante rossa e aumenta progressivamente la sua massa. Quando viene superato il Limite di Chandrasekar pari a  $1.4 M_{\odot}$  la nana bianca esplose (supernova) emettendo una grande quantità di energia. Siccome le nane bianche si somigliano tutte, quando esplodono producono la stessa quantità di energia.



SN2005cs

Siccome l'esplosione avviene in condizioni molto simili per tutte le SN Ia, l'energia radiante emessa è dell'ordine di  $10^{44}$  joules per tutte. Quindi presenteranno la medesima magnitudine assoluta  $M$ , ma verranno osservate con una magnitudine apparente  $m$  che dipende dalla distanza  $d$ . La distanza  $d$  quindi sarà quella della galassia che le contiene.

# Modulo di distanza

$$m - M = 5 \log_{10}(d) - 5 = 5 \log_{10} \left( \frac{d}{10 \text{ pc}} \right).$$

**m** = *magnitudine apparente*

**M** = *magnitudine assoluta*

Le SN Ia si dispongono più in alto rispetto alla legge di Hubble accettata dal modello cosmologico con espansione lineare uniforme:

$$v = H_0 \cdot d \quad \text{--- } \Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.0$$

ma indicano che a grande distanza da noi si ha:

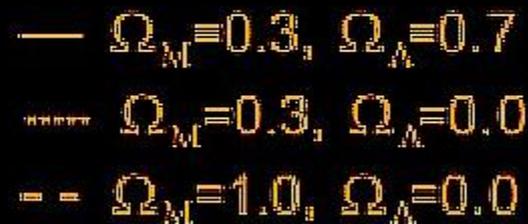
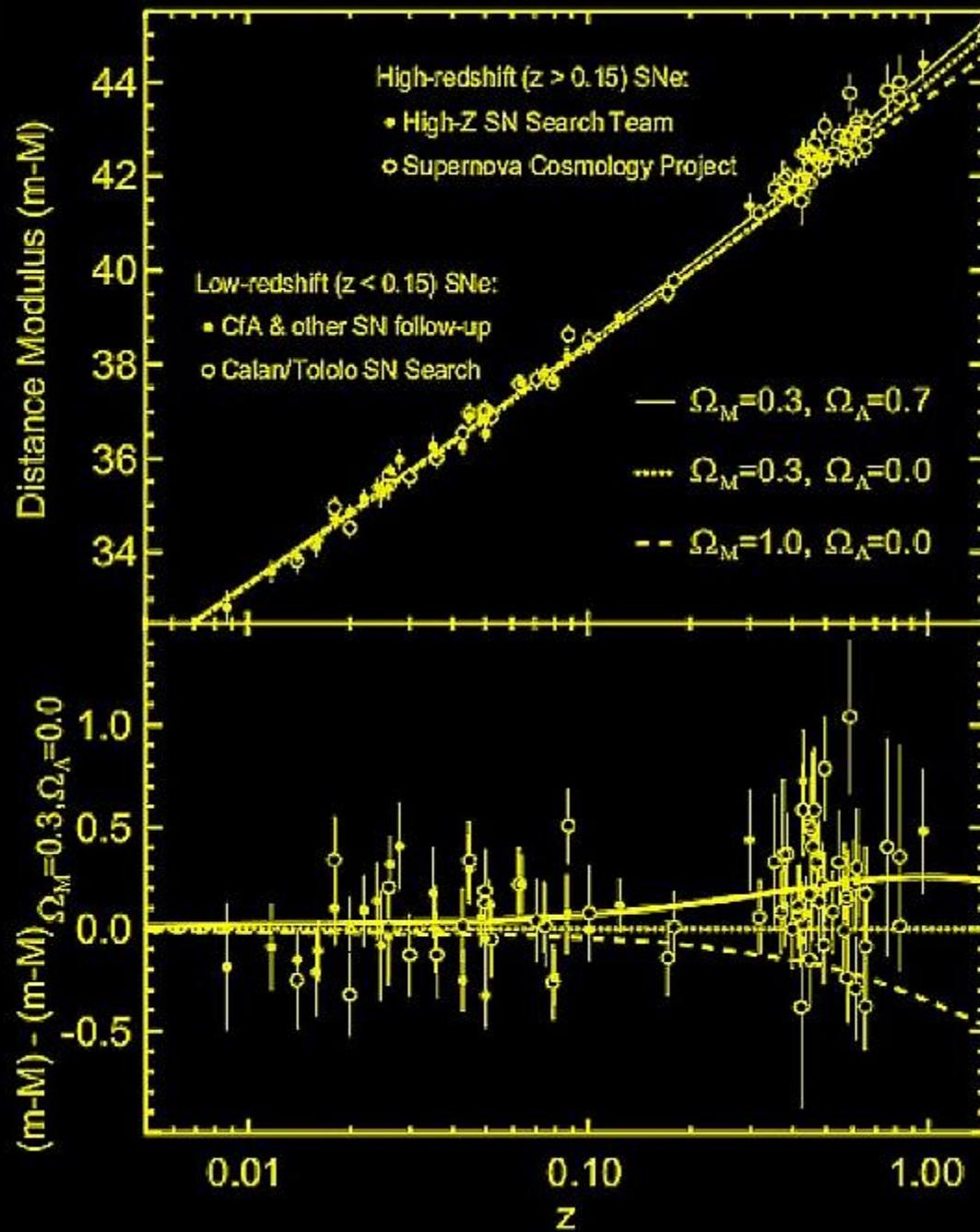
$$v = H_0 \cdot d + H_1 \cdot d^2 + \dots \quad \text{--- } \Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$$

L'Universo sta accelerando la sua espansione...

In più la luce emessa sarà spostata verso il rosso (Redshift) a seconda della velocità radiale di allontanamento. A questo punto abbiamo la velocità  $v$  e la distanza  $d$  e quindi sarà possibile calcolare la costante di Hubble per ciascuna supernova:

$$H = v / d$$

E inserire ciascuna supernova nel diagramma di Hubble

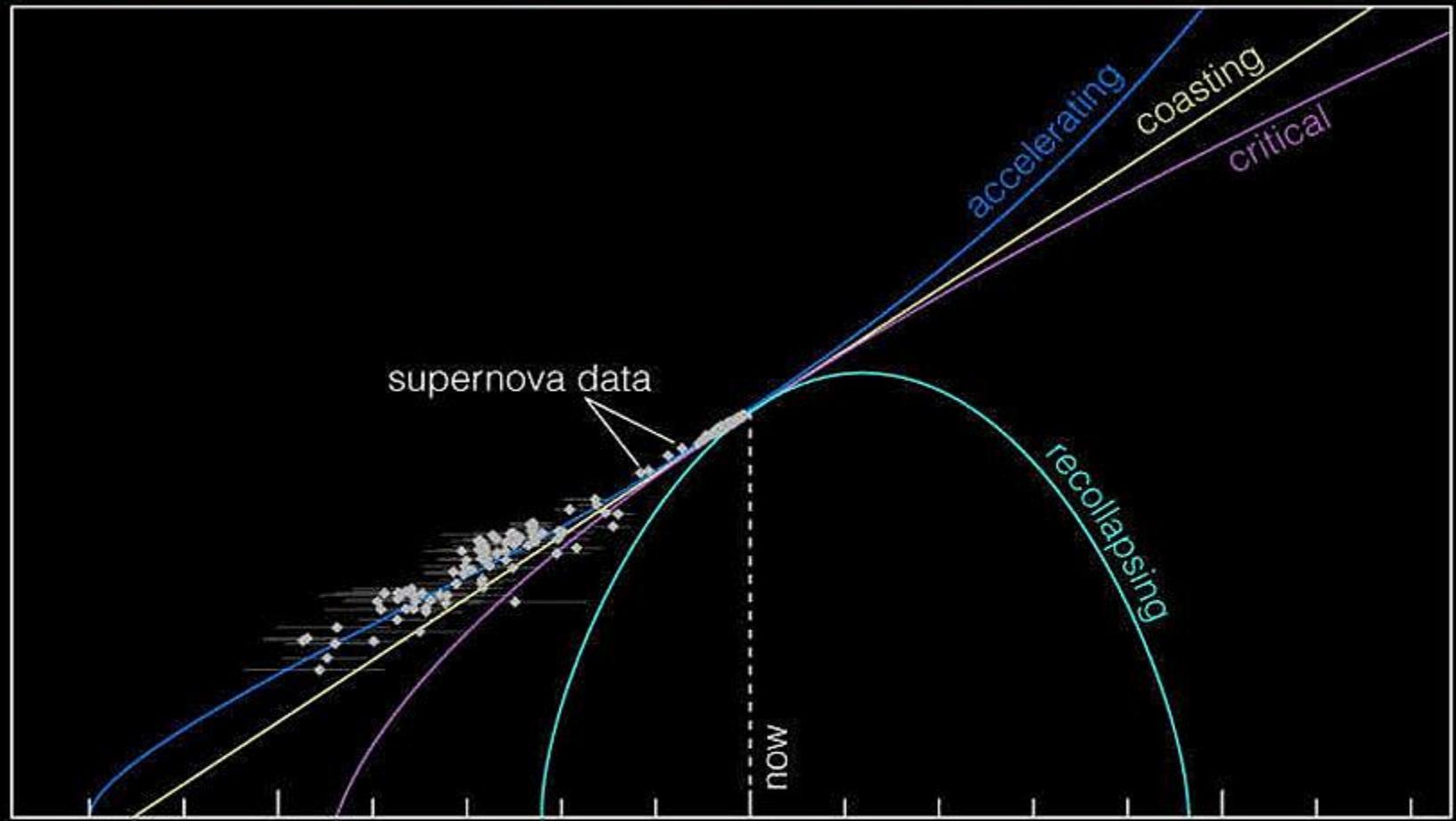


# L'espansione accelera?

- Questi due gruppi di scienziati, studiando nella banda radio innumerevoli ammassi galattici e galassie che emettono getti di plasma, nonché studiando le curve di luce di diverse supernovae vicine, hanno dimostrato che:

l'espansione dell'Universo non sta rallentando, bensì accelerando.

average distance between galaxies  
(based on redshift)



supernova data

now

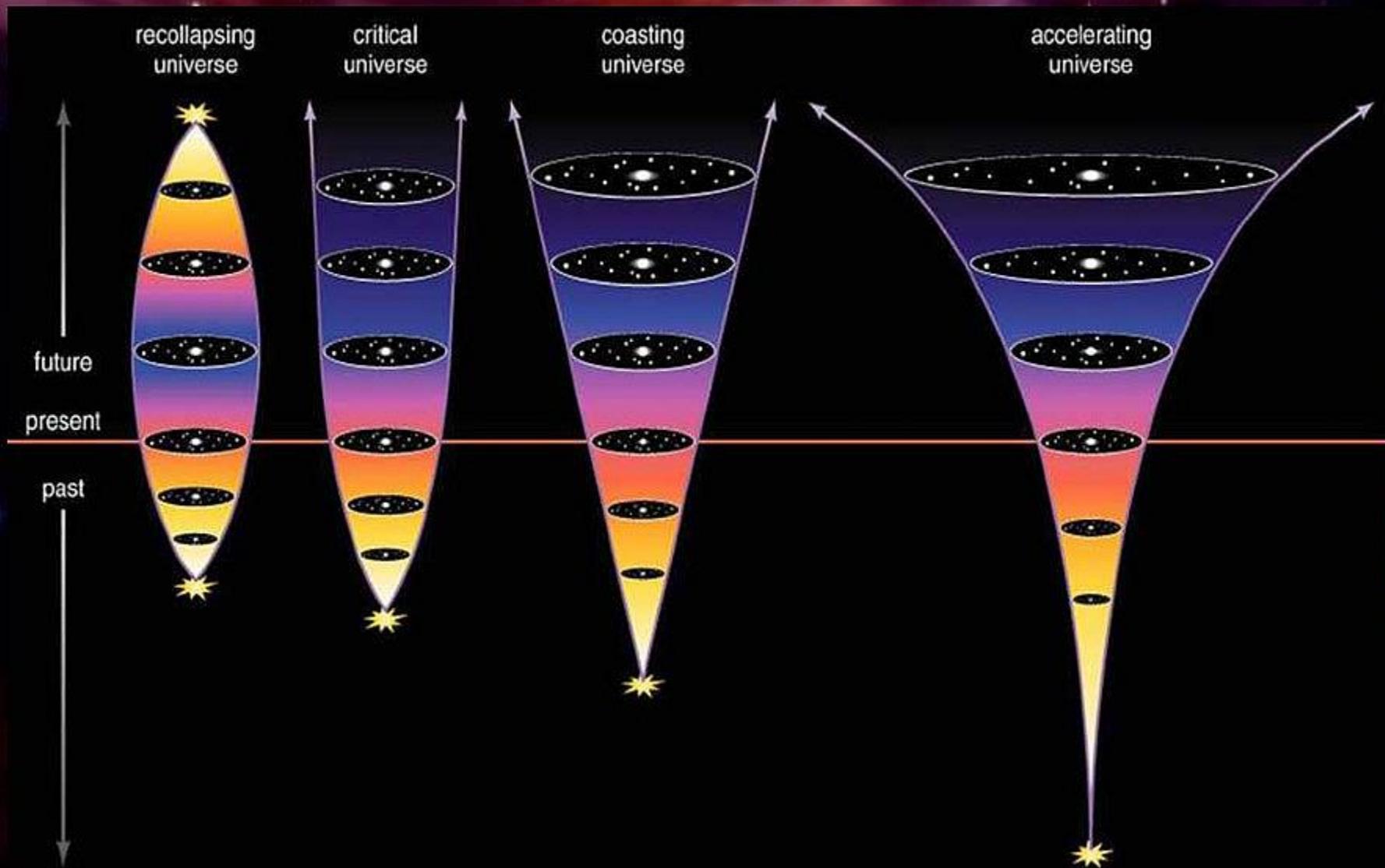
past ← → future

time in billions of years  
(lookback times for supernovae  
based on apparent brightness)

Questi esperimenti **misurano**  $\Lambda$  , ci dicono quanto vale ! ...  
Ora la misura ci dice che  $\Lambda$  è piccolissima se confrontata  
col **valore pazzesco dell'energia del vuoto** che, secondo  
Zeldovich e non solo, dovrebbe appunto dare contributo a  $\Lambda$  .

Se invece confrontiamo il **valore misurato di Energia Oscura**  
col budget di Materia ed Energia dell'Universo, scopriamo che  
**L'Energia Oscura costituisce una frazione molto grande**  
**dell'intero budget energetico dell'Universo :**

# I modelli Cosmologici



# La visione attuale

Le recenti osservazioni astronomiche forniscono il seguente quadro dell'universo:

- Piano ed infinito
- In espansione accelerata (71 km/sec per mega parsec)
- Età dell'universo 13,7 miliardi di anni
- Temperatura media del fondo cosmico 2,735 gradi assoluti

# La fine dell'universo

1. Recollapsing Universe: l'espansione si ferma e l'universo collassa
2. Critical Universe: non collassa, si espande più lentamente
3. Coasting Universe: si espande all'infinito con velocità costante
4. Accelerating Universe\*: l'espansione è sempre più accelerata con il tempo  
\*teoria attualmente più accreditata

# La struttura dell'Universo.

- Omogeneo su larghissima scala;
- Non uniforme distribuzione di galassie;
- Queste formano giganteschi fogli o filamenti;
- Gli ammassi sono separati da regioni vuote dette "voids".
- L' Universo è, quindi, una sorta di "spugna".
- Ammassi di G. sono in movimento verso altri enormi ammassi di G dette "attrattori."

# Universi paralleli.

$U_1$

$t = \text{costante}$

■ Le equazioni della relatività einsteiniana ammettono soluzioni compatibili con l'esistenza di universi paralleli, tra i quali l'informazione fluisce attraverso cunicoli spazio-temporali.

$U_2$

$t = \text{costante}$

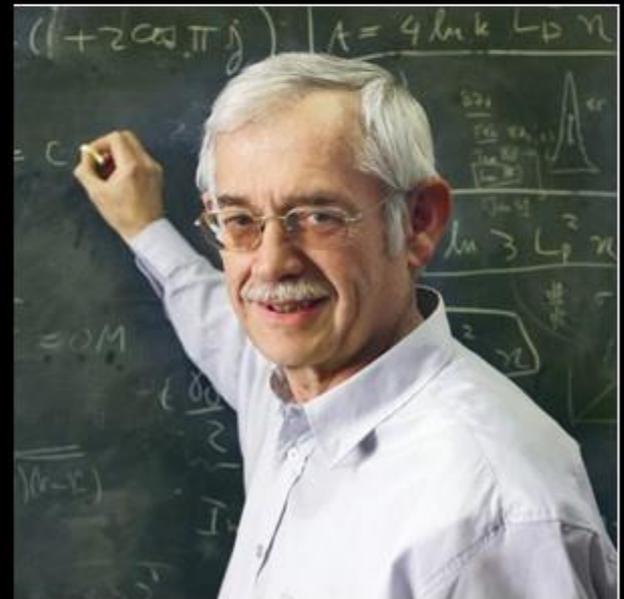
# Multiverso



# Entropia di Beckenstein

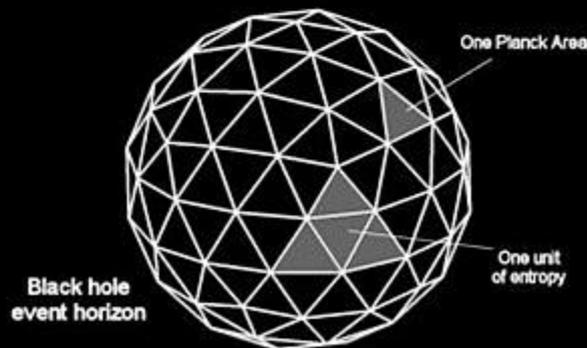
Jacob Beckenstein nel 1973 scoprì che l'entropia di un sistema isolato dipende dall'area  $A$  dell'inviluppo che lo racchiude e non dal suo volume

Questo è dovuto alla deformazione relativistica dello Spazio-Tempo (Gravità)



L'Entropia di Beckenstein  
espressa in unità di Plank  
diventa semplicemente:

$$S_{BH} = \frac{A}{4}$$



## Unità di Planck: unità fondamentali

Dimensione	Formula	Valore nel Sistema Internazionale
Lunghezza di Planck	Lunghezza (L) $l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1,616\ 252(81) \times 10^{-35}$ m
Massa di Planck	Massa (M) $m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2,176\ 44(11) \times 10^{-8}$ kg
Tempo di Planck	Tempo (T) $t_p = \frac{l_p}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5,391\ 24(27) \times 10^{-44}$ s
Temperatura di Planck	Temperatura (Θ) $T_p = \frac{m_p c^2}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}}$	$1,416\ 785(71) \times 10^{32}$ K
Carica di Planck	Carica elettrica (Q) $q_p = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$	$1,875\ 545\ 870 \times 10^{-18}$ C

Le tre costanti della fisica sono espresse in questo modo semplicemente, mediante l'uso delle unità fondamentali di Planck:

$$c = \frac{l_p}{t_p}$$

$$\hbar = \frac{m_p l_p^2}{t_p}$$

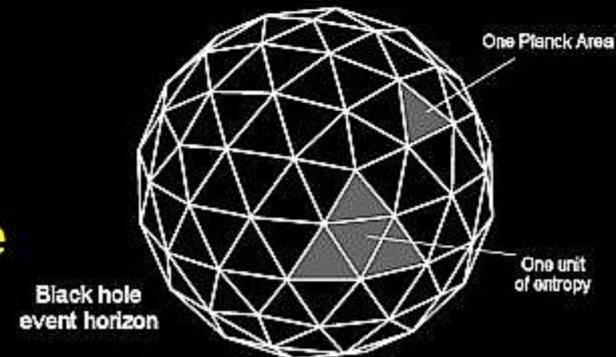
$$G = \frac{l_p^3}{m_p t_p^2}$$

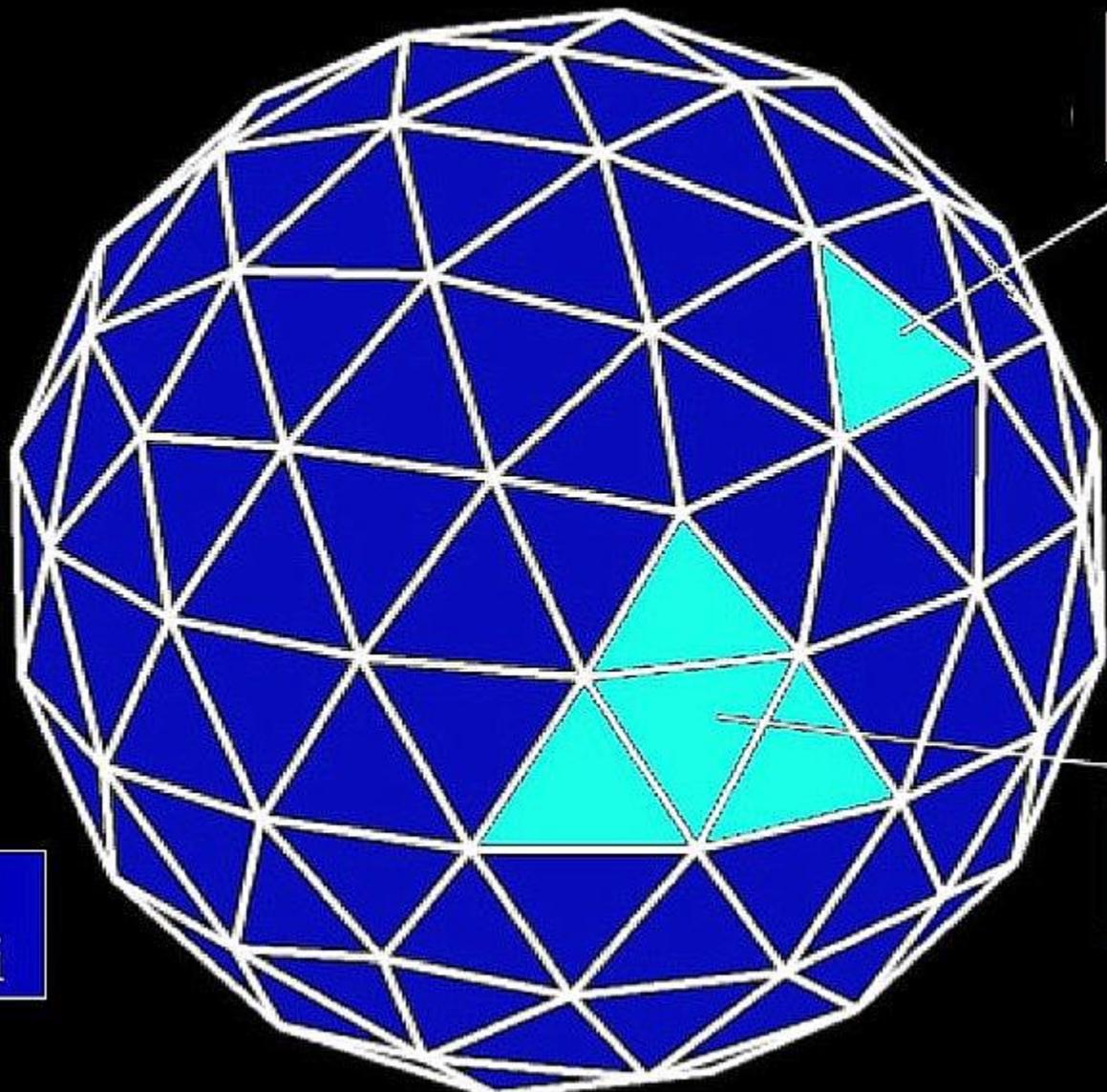
# Entropia di Beckenstein - Hawking

$$S = \frac{\pi A k c^3}{2 h G}$$



**A** = area dell'orizzonte degli eventi  
**c** = velocità della luce nel vuoto  
**h** = costante di Planck (non ridotta)  
**G** = costante di Gravitazione Universale  
**k** = costante di Boltzmann



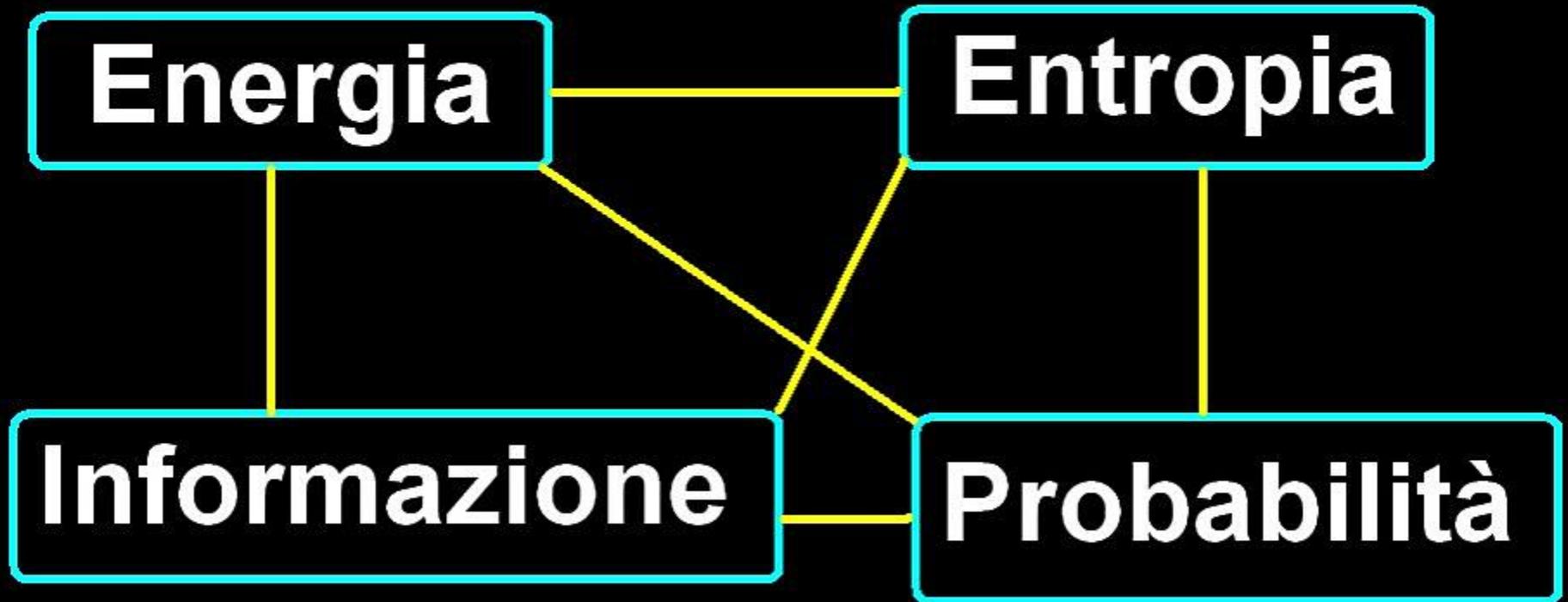


Orizzonte degli eventi

Una unità di Planck

Una unità di entropia

# Corrispondenze



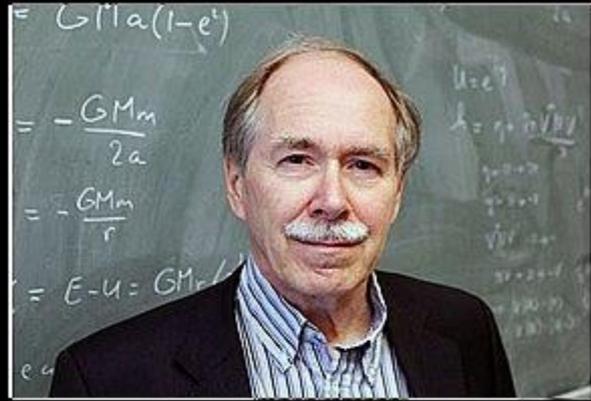
**L'Entropia descrive  
l'Informazione contenuta  
in un sistema:**

$$I_{BH} = e^{\frac{S_{BH}}{k}}$$

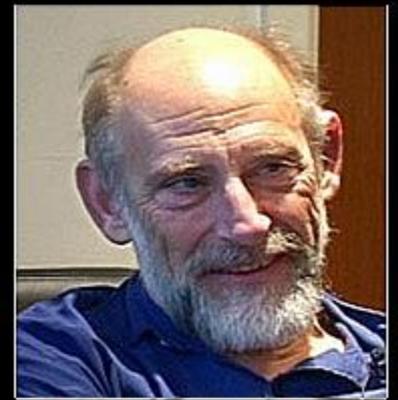
$I_{BH}$  = informazione

$S_{BH}$  = Entropia

$k$  = costante di Boltzmann



Gerardus (Gerard) 't Hooft



Leonard Susskind

**Nel 1993 Gerard 't Hooft e Leonard Susskind proposero il**

## **"Principio Olografico"**

**secondo il quale tutta l'informazione presente nell'Universo è immagazzinata nell'involuppo che lo racchiude (orizzonte cosmologico)**

# Il Principio Olografico

"L'informazione totalmente contenuta nell'Universo osservabile è un numero finito ed è data dalla superficie cosmologica divisa per la costante di Planck"

$$A(t) = 4 \cdot \pi \cdot R(t)^2$$



$$I = 10^{122} \text{ bits}$$

valore massimo

$$\dot{R} \Rightarrow c$$

Universo  $\Rightarrow$  BH

$$R(t) = 13,7 \text{ Miliardi di anni luce}$$

**Lloyd (2002) cercò di rispondere alla seguente domanda:**

**"Quanta informazione è stata elaborata dall'Universo dalla sua formazione (Big Bang) fino ad ora?"**

**Età attuale dell'Universo: 13,7 Miliardi di anni**

**E' possibile applicare la  
definizione di Entropia di  
Beckenstein - Hawking  
all'intero Universo.**

**Essa sarà proporzionale all'area  
del suo inviluppo (orizzonte  
cosmologico) al tempo  $t$**

**Siccome l'età dell'Universo è finita (13,7 miliardi di anni), l'informazione elaborata fino ad ora non può essere infinita.**

**Questo è dovuto alle limitazioni imposte dalla Meccanica Quantistica, dalle leggi della Termodinamica e dal fatto che la velocità della luce è finita ( $c=300000$  km/sec).**

Il risultato è:

$$I \leq 10^{122} \text{ bits}$$

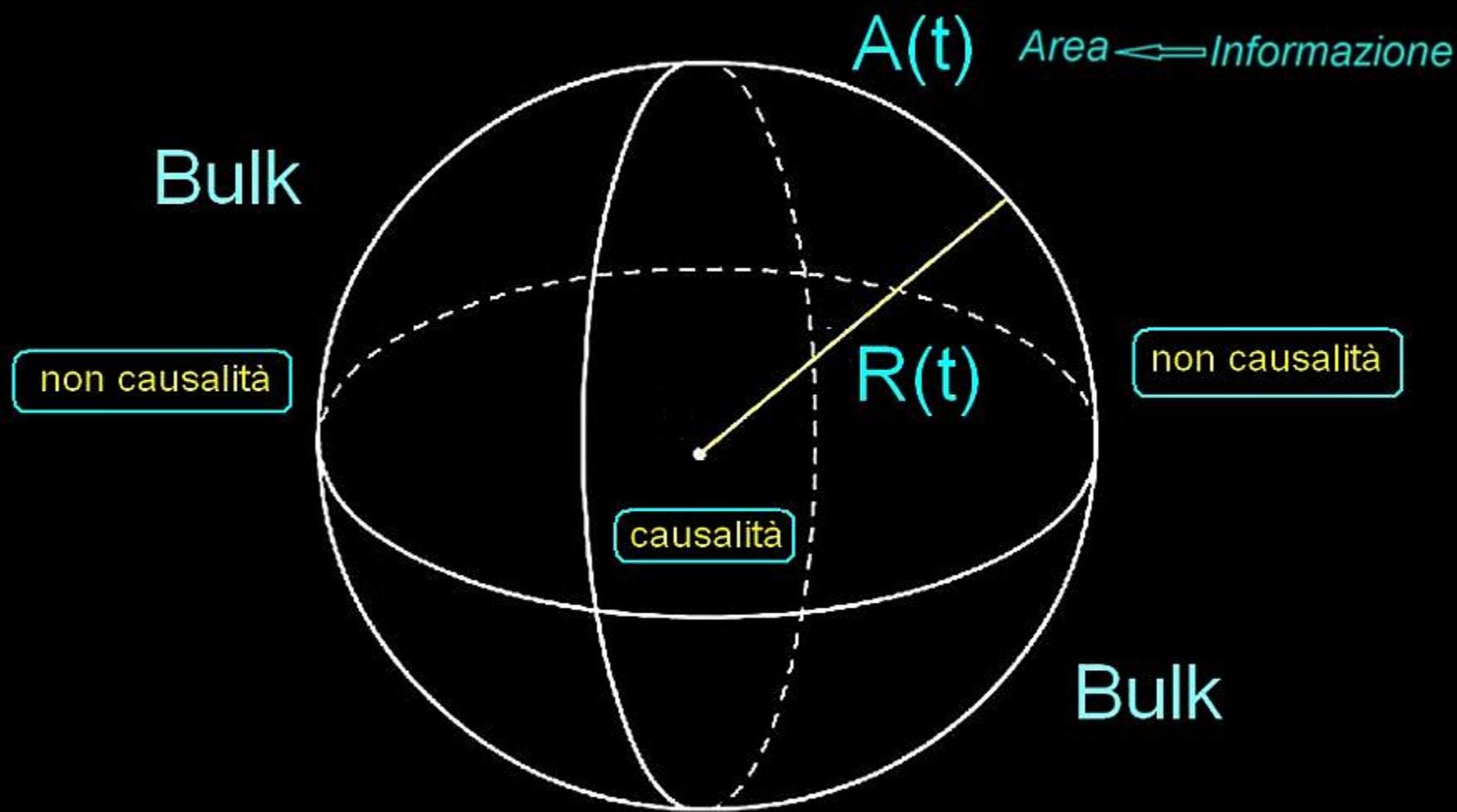
**Il fatto che la velocità della luce sia finita  
( $c=300000$  km/sec) crea un orizzonte  
cosmologico al tempo  $t$  di età dell'Universo.**

**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.**

**Universo Visibile**

# Universo ( $k=1$ )



$$R(t) = 13,7 \text{ miliardi di AL}$$

**In passato, l'Informazione era minore in quanto l'Universo è in espansione.**

**In futuro sarà maggiore fino a raggiungere un valore limite massimo quando la velocità di espansione sarà uguale alla velocità della luce**

**Nell'Universo primordiale l'Informazione variava proporzionalmente a  $t^2$**

## 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 ( $c=300.000$  Km/sec)

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

## Densità dell'Energia Oscura

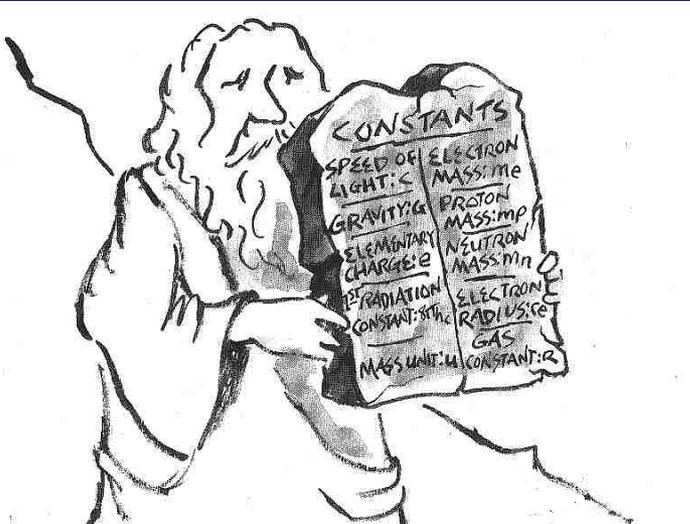
# Conseguenze

- 1) L'energia oscura responsabile dell'espansione dell'Universo può essere trattata come energia ordinaria.
- 2) Se il contenuto di informazione  $I(t)$  è finito e limitato allora le leggi fisiche che descrivono l'Universo non possono essere sempre le stesse, nel tempo.

**Le costanti potrebbero variare lentamente nel tempo**

# Le costanti fondamentali della Fisica

- Le costanti che regolano la “forza” delle interazioni forti e debole. Piccolissime variazioni renderebbero impossibile costruire gli atomi e degli elementi chimici.
- Stessa cosa per altre costanti fondamentali della fisica, la carica elettrica elementare, la costante di Planck, la velocità della luce, ecc. Piccole variazioni e non solo avremmo un universo estremamente diverso, ma non avremmo in alcun modo le condizioni per avere vita intelligente.



...sono "*numeri magici*" fissi che regolano la descrizione fisica dei fenomeni dell'Universo

# Le costanti fondamentali della Fisica

Archimedes' constant		$\pi$	3.1415926535897932385...
natural logarithmic base		e	2.718281828...
golden ratio		$\Phi$	1.618033989...
Ramanujan-Soldner constant	$\mu$		1.4513692349...
speed of light in a vacuum		c	$2.99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
gravitational constant		G	$6.67259... \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$
universal gas constant		R	8.314510... Jmol <sup>-1</sup> K
Avogadro constant	$N_A$		$6.0221367... \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann constant	k		$1.380658... \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Stefan-Boltzmann constant		$\sigma$	$5.67051... \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^4$
molar volume of ideal gas at STP		$V_m$	$2.241409... \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
permittivity constant	$\epsilon_0$		$8.85418781762 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
permeability constant		$\mu_0$	$1.25663706143 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$
elementary charge	e		$1.60217733... \times 10^{-19} \text{ C}$
Plank constant		h	$6.6260755... \times 10^{-34} \text{ Js}$
electron mass		$m_e$	$9.1093897... \times 10^{-31} \text{ kg}$
proton mass		$m_p$	$1.6726231... \times 10^{-27} \text{ kg}$

...e molte altre...

# La Costante di Struttura Fine

La Costante di Struttura Fine ha una grande importanza nella teoria filosofico-scientifica del principio antropico; difatti questo parametro adimensionale ha una influenza fondamentale sull'Universo.

$$\alpha_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137,035\,999\,084}$$

La costante di struttura fine è la costante di accoppiamento dell'interazione elettromagnetica, di cui esprime l'intensità relativamente alla carica elementare.

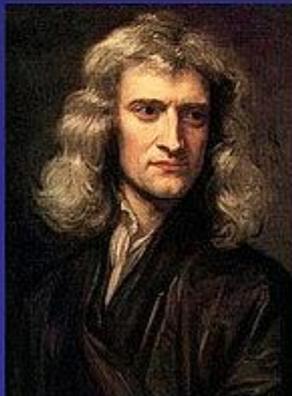
Se il suo valore fosse diverso anche di poco (circa il 10-20%) dal valore noto, l'Universo sarebbe diverso da come lo vediamo, e le leggi fisiche non sarebbero come le conosciamo.

Per esempio i rapporti tra le forze attrattive e repulsive tra le particelle elementari sarebbero diversi, con conseguenze sulla costituzione della materia e l'attività delle stelle.

In un universo con una costante di Struttura Fine differente noi stessi potremmo non esistere.

# ...a proposito della Forza di Gravità e del numero di dimensioni dell'Universo

- I fenomeni gravitazionali sono guidati nella loro intensità da alcuni parametri, ad esempio la costante di gravitazione universale.
- Se la gravità fosse più o meno intensa (una parte su  $10^{40}$ ) avremmo estremi in cui l'universo si chiuderebbe in un tempo ridottissimo (nessuna evoluzione) o le stelle non si formerebbero neppure (nessuna fonte di energia).

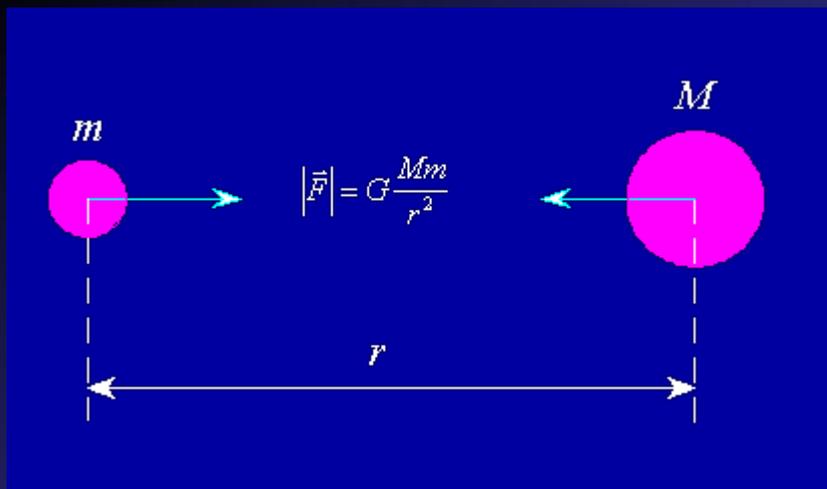


Isaac Newton (1642 – 1727)



$$F_G = G_0 \frac{M m}{r^2}$$

se l'Universo ha 3 dimensioni...



...in 3 dimensioni

In un Universo a  $D$  dimensioni:

$$F_G = G_0 \frac{M m}{r^{D-1}}$$

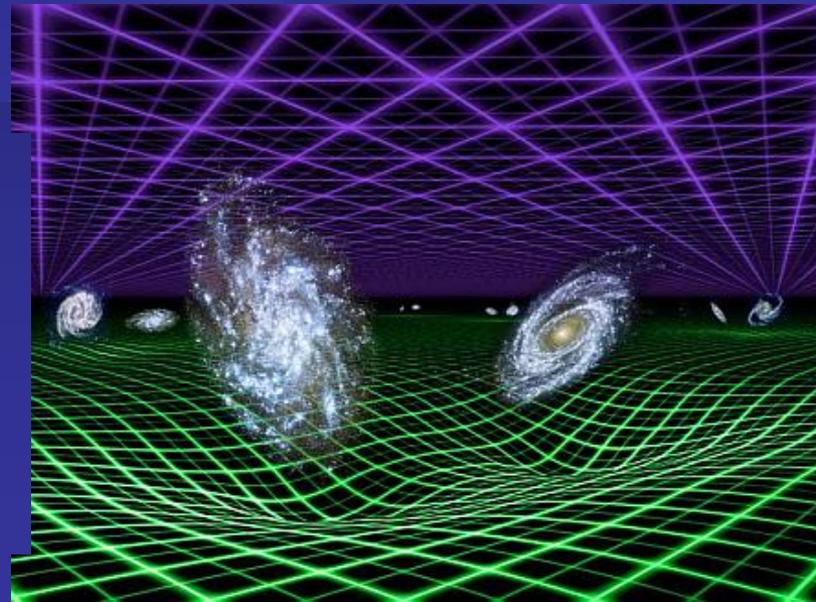
$D$  = numero di dimensioni dell'Universo

se  $D=3$  allora la proporzionalità è  $1/r^2$

Per un numero di dimensioni maggiore di 3 l'Universo diventa sfavorevole allo sviluppo della vita.

Se  $D > 3$  la gravità diminuisce troppo rapidamente, la curvatura dello Spazio-Tempo è minore, le stelle non possono più rimanere in equilibrio e non possono più esistere orbite planetarie stabili su lunghi periodi.

Se fosse  $D=2$  ?  
Teoria dell'Universo  
Olografico



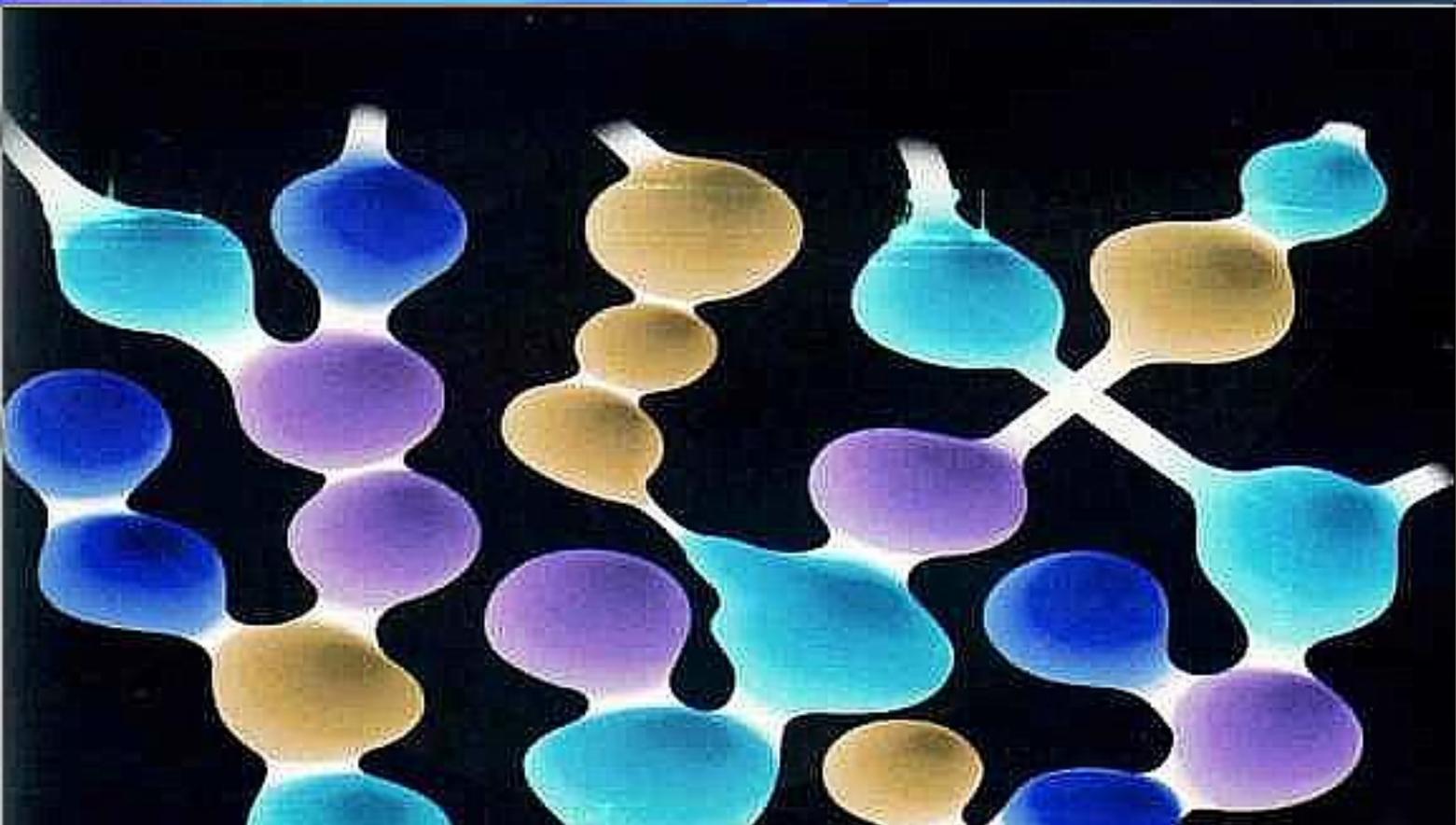
Ma non è detto che  
sia così per ogni  
Universo...

# Universi a bolle

- Alcuni scienziati ritengono che sia plausibile pensare che il nostro universo sia solo uno dei tanti creatisi come Nel nostro U. le condizioni si sono rivelate favorevoli alla vita.

# Un Universo a bolle capace di autoriprodursi

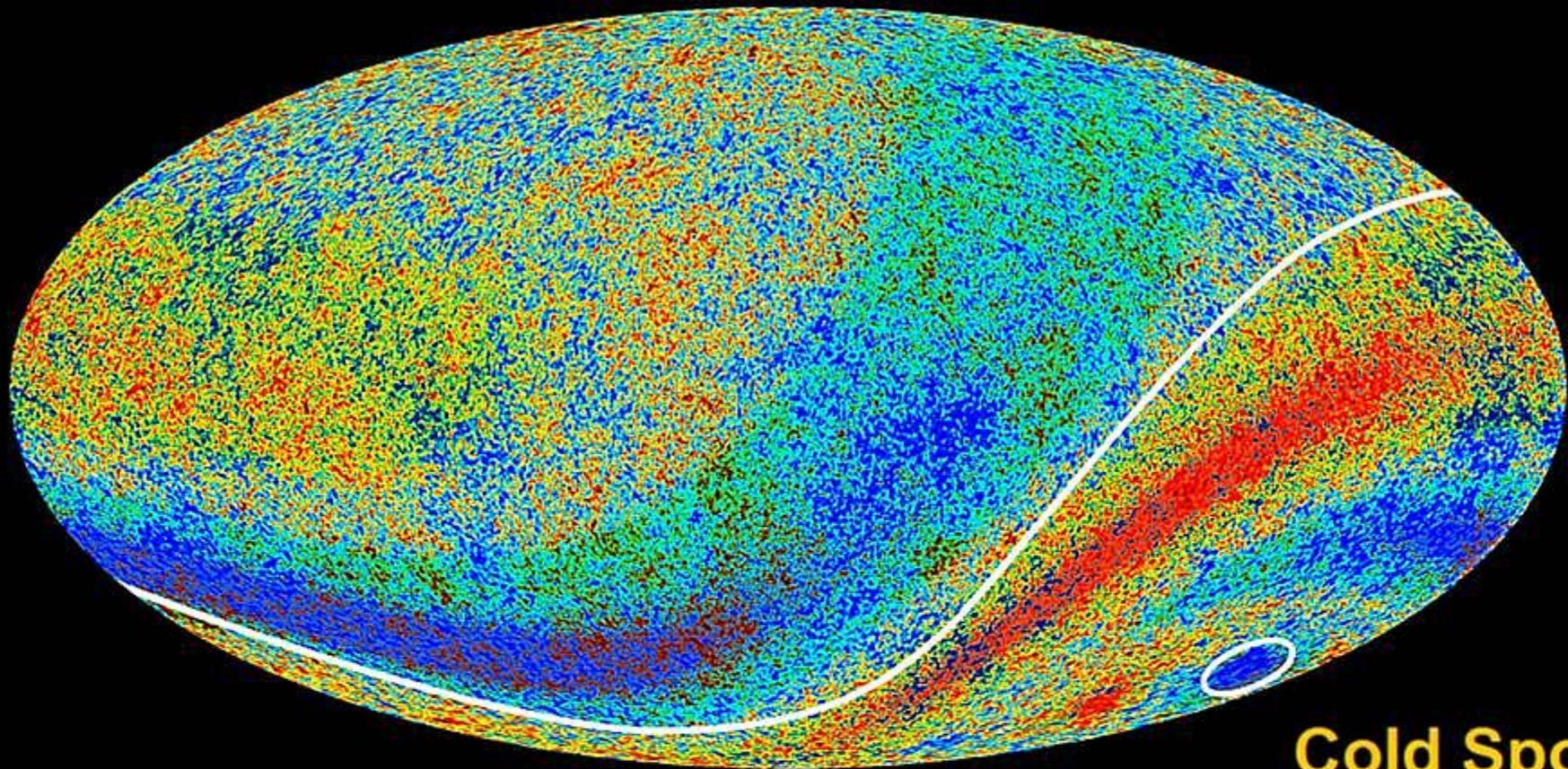
---



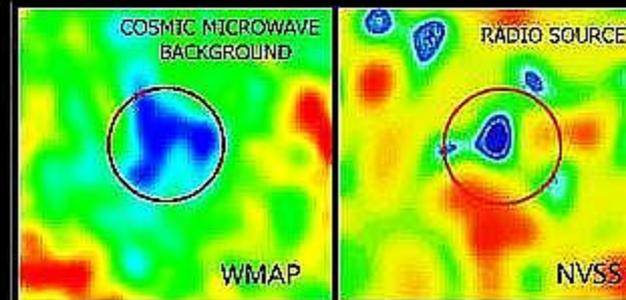
Potrebbe esistere un  
universo madre del  
nostro?

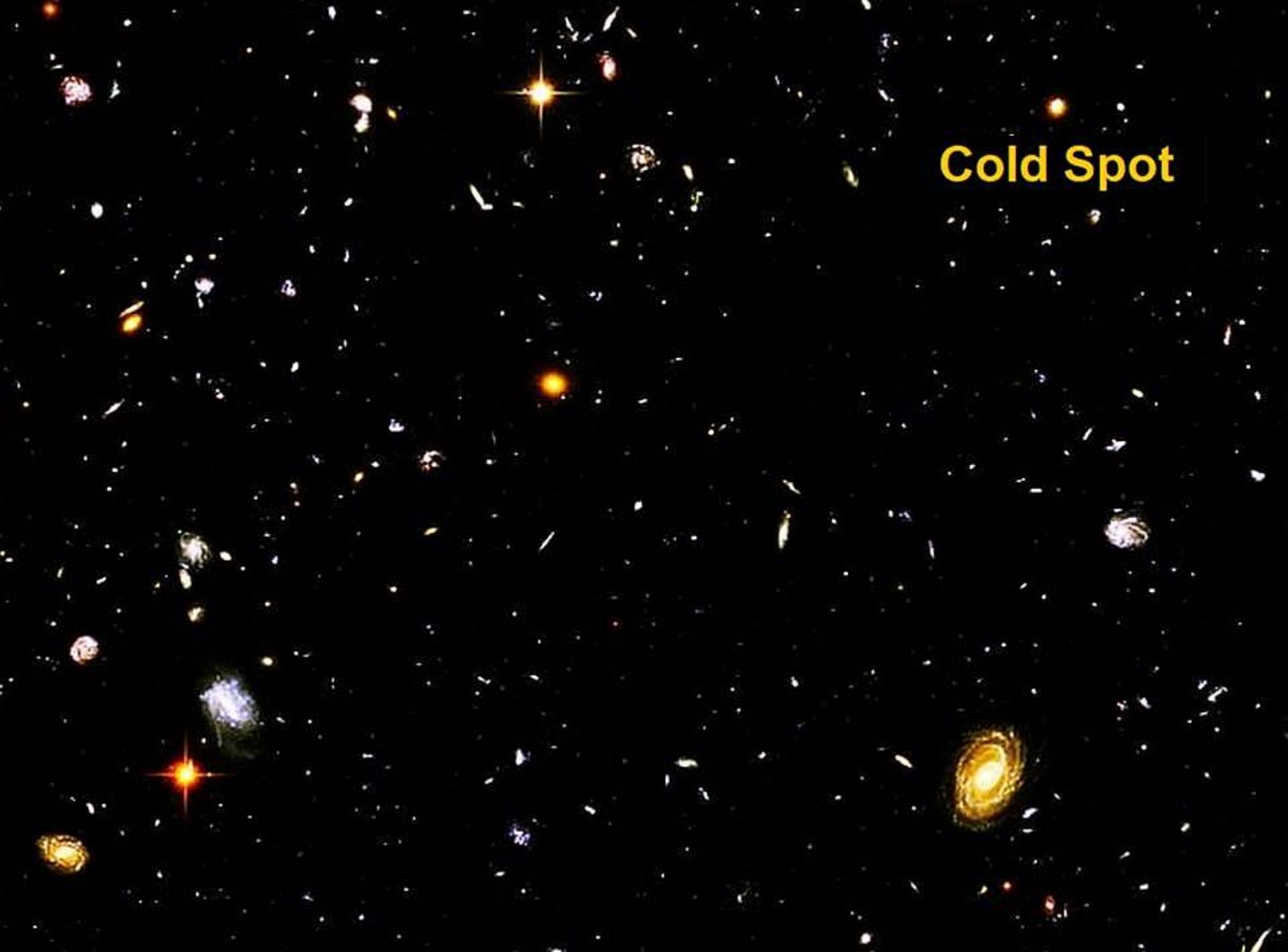
Pare proprio di sì...

# CMB flux (Cosmic Microwaves Background)



**Cold Spot**



A deep-field astronomical image showing a vast field of galaxies. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing as bright, distinct objects and others as faint, diffuse clouds. The colors of the galaxies vary, including yellow, orange, blue, and purple. In the upper right quadrant, a specific region is highlighted with a yellow border and labeled "Cold Spot". The background is a dark, starry field.

**Cold Spot**

L'Universo non è stato fatto apposta  
per noi...

Noi semplicemente viviamo in un  
Universo, tra i tantissimi che esistono,  
dove i parametri (le costanti fisiche)  
sono tali da favorire lo sviluppo della  
vita intelligente e duratura.

La combinazione favorevole dei  
parametri si è generata casualmente...

Un Universo con costanti fisiche diverse  
dalle nostre e quindi leggi della Fisica  
differenti...

Ecco, appunto...  
Le leggi della Fisica...

# Concezione delle leggi della Fisica

## Concezione Platonica

*"Le Leggi della Fisica sono perfette forme matematiche idealizzate, che realmente esistono, ma sono confinate in un dominio astratto che trascende l'Universo fisico"*

...allora le leggi della Fisica esistono indipendentemente dall'esistenza dell'Universo, quindi le possiamo usare per studiare altri universi...



Le leggi della Fisica descrivono l'Universo, ma l'Universo non condiziona le leggi della Fisica

## Conseguenza del principio olografico



**Le leggi della Fisica possono spiegare la Natura fino ad un livello massimo di informazione ( $10^{122}$  bits) cioè la massima informazione possibile contenuta nell'Universo.**

# Universo Olografico



Le leggi della Fisica descrivono il limitato contenuto di informazione insita nei fenomeni fisici.

Il mistero di Wigner (1960):

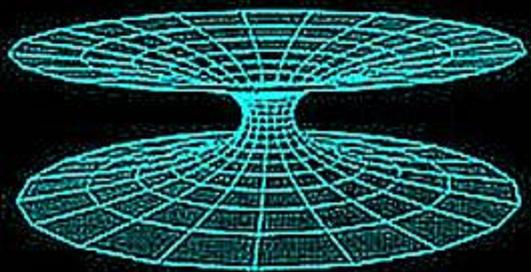
*"The unreasonable effectiveness of Mathematics in the Physical Sciences"*

...diversi Universi, diverse leggi Fisiche

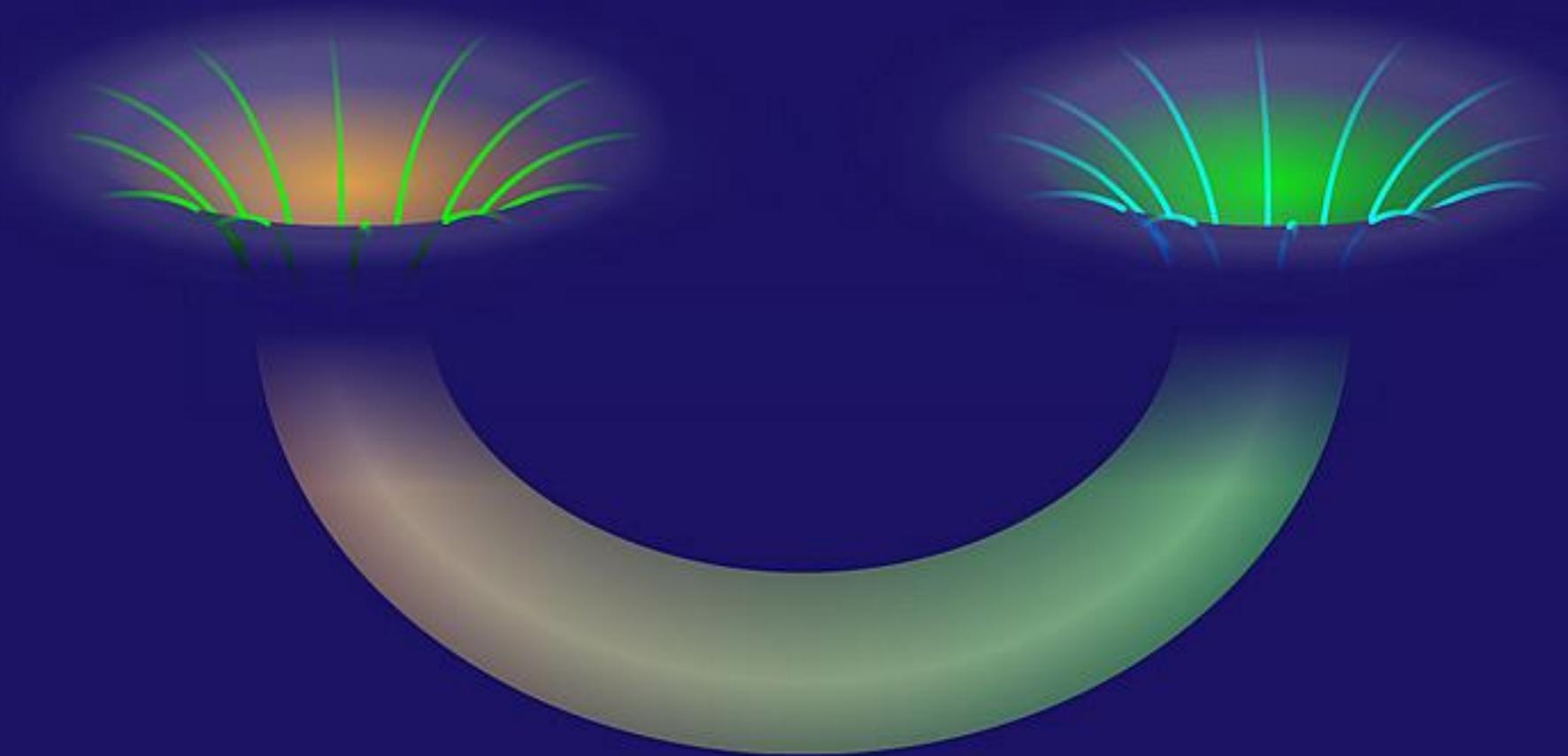
**Il Principio Olografico implica che le leggi fisiche non possono esistere in termini di perfette forme matematiche, ma sono soggette a variazioni dipendenti dal contenuto di Informazione dell'Universo.**

**...quindi:  $G$  e  $c$  potrebbero variare su tempi scala cosmologici**

# Wormholes

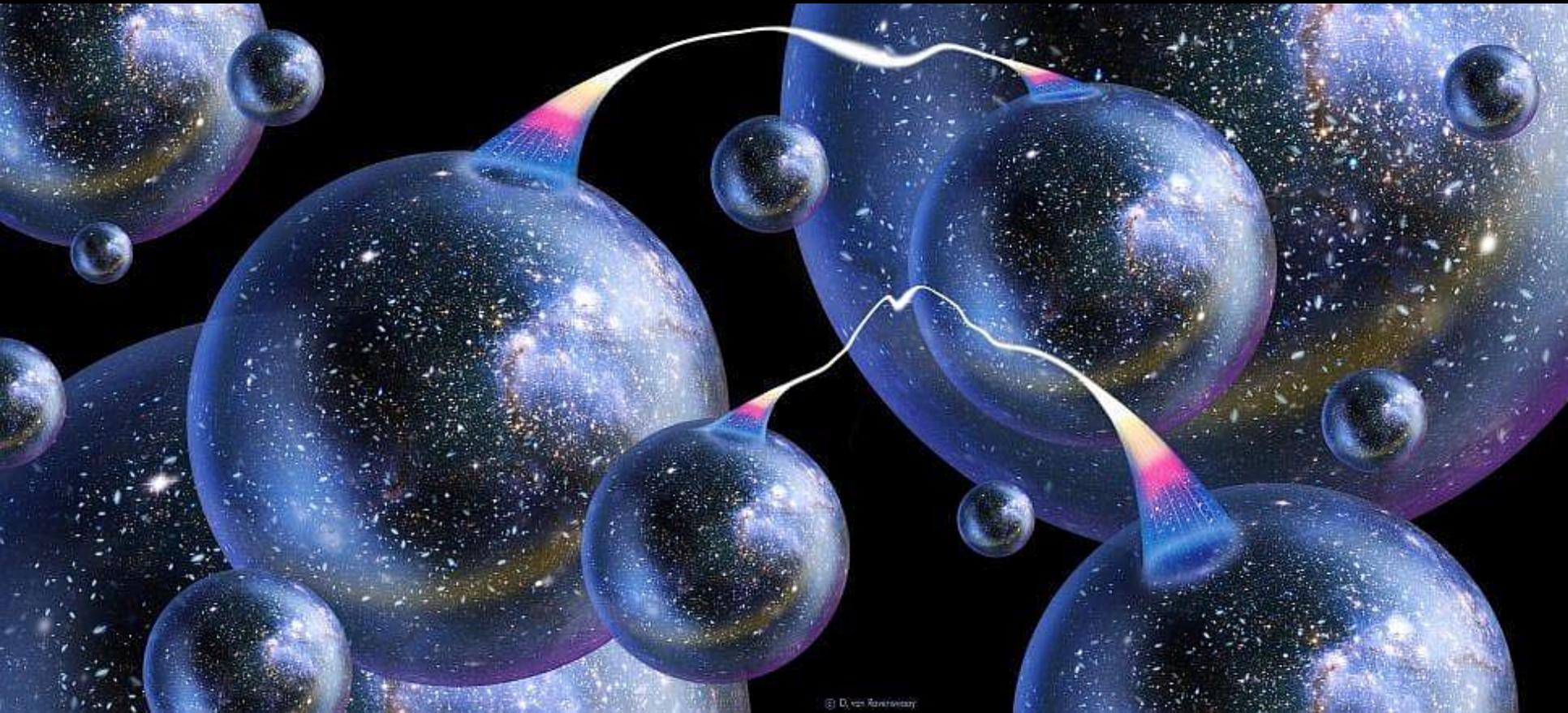


**Una scorciatoia attraverso  
lo spazio-tempo**

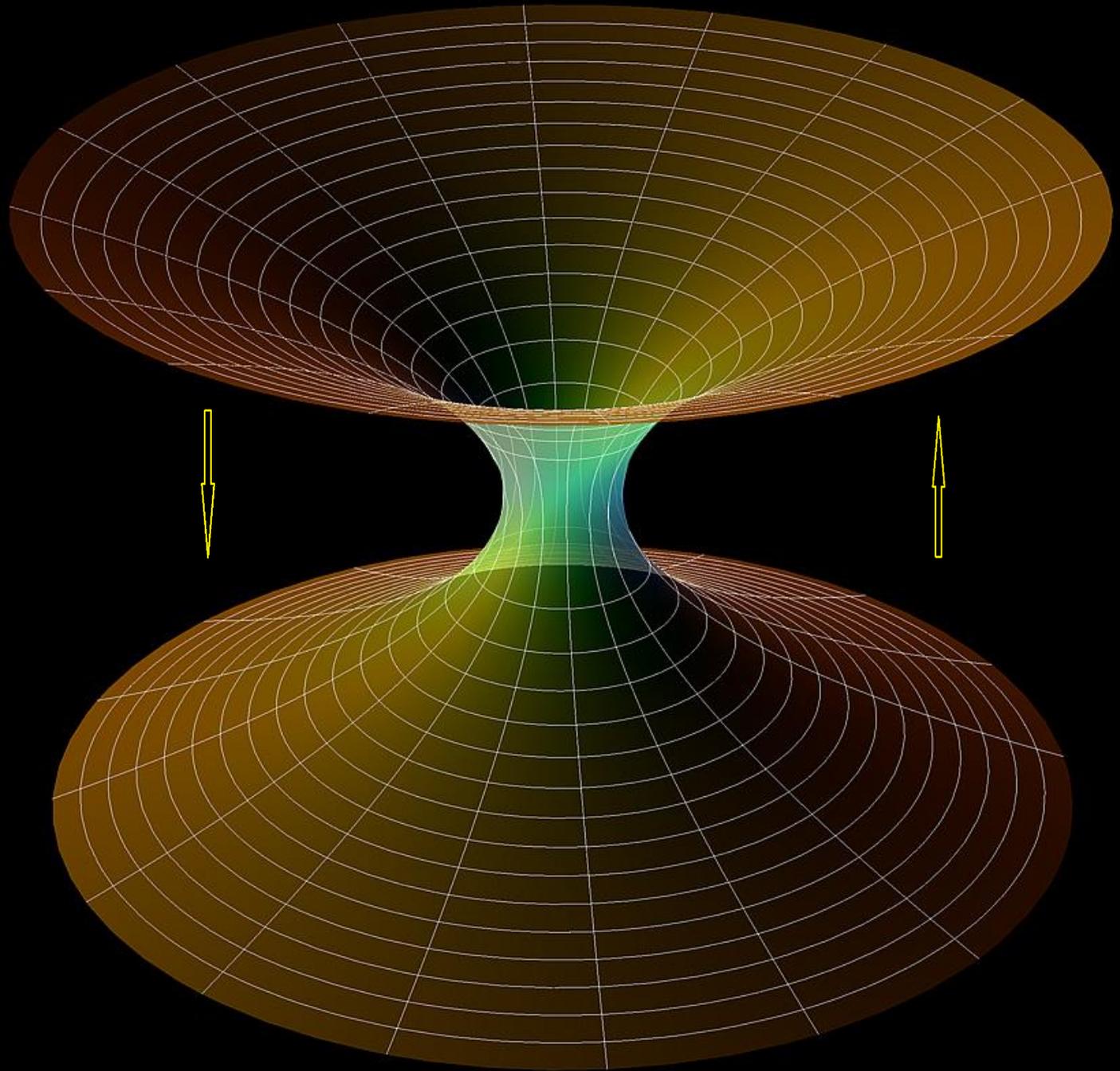


o con due punti  
distanti nello stesso  
universo

# Gli Wormholes consentirebbero di comunicare con differenti universi



Universo 1  
Tempo 1



Universo 2  
Tempo 2

Il nome *wormhole* venne coniato dal fisico americano **John Wheeler**, nel 1957. L'analogia con il "buco di verme" prevede che l'universo sia una mela e che un verme si muova sulla sua superficie. Se il verme inizia a scavare un foro, la distanza che deve percorrere per raggiungere un determinato punto dalla parte opposta della mela, diminuisce. Ecco che quel foro rappresenta l'ingresso di questo tunnel spazio-temporale.

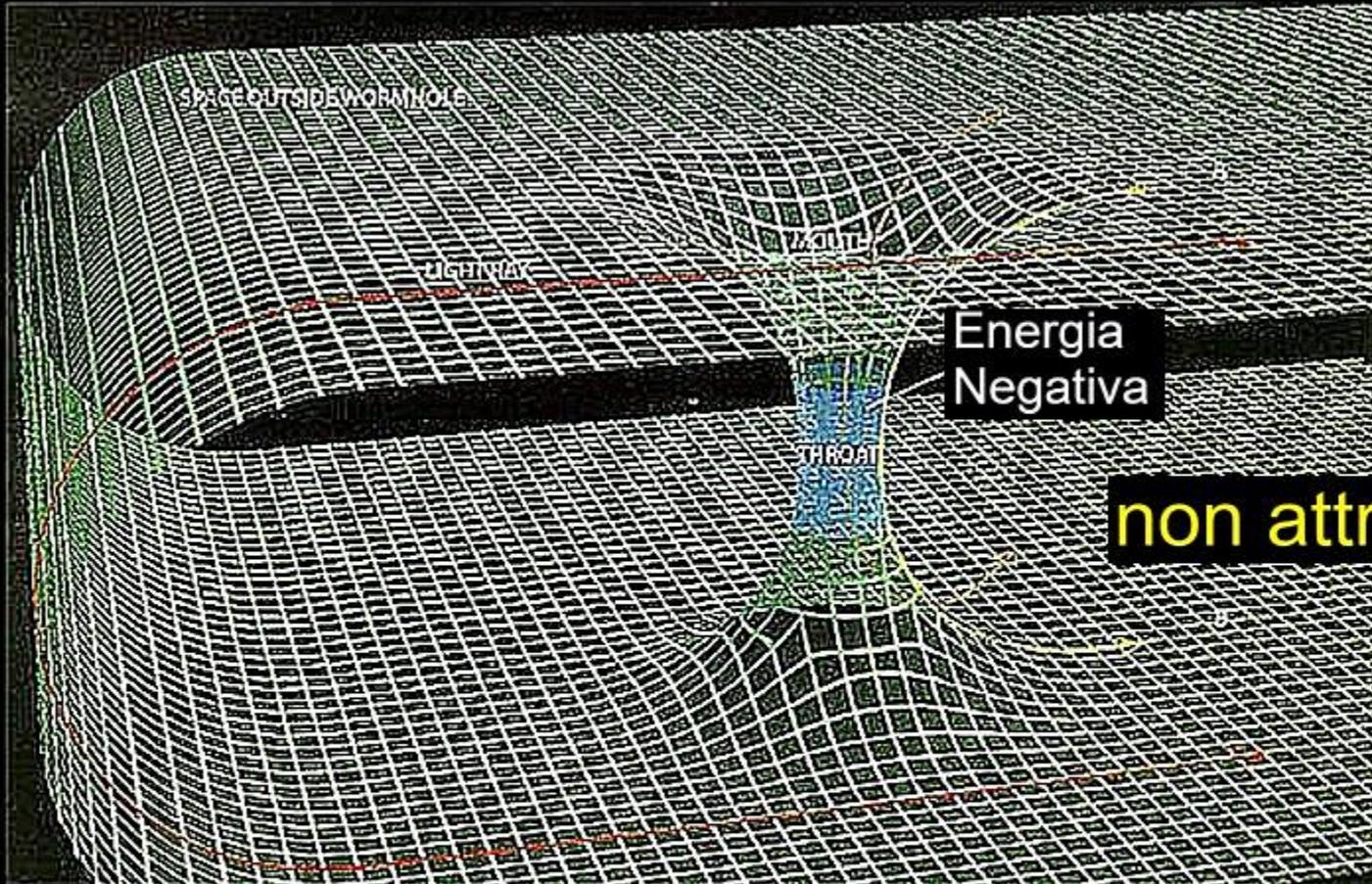


# Il ponte di Einstein-Rosen

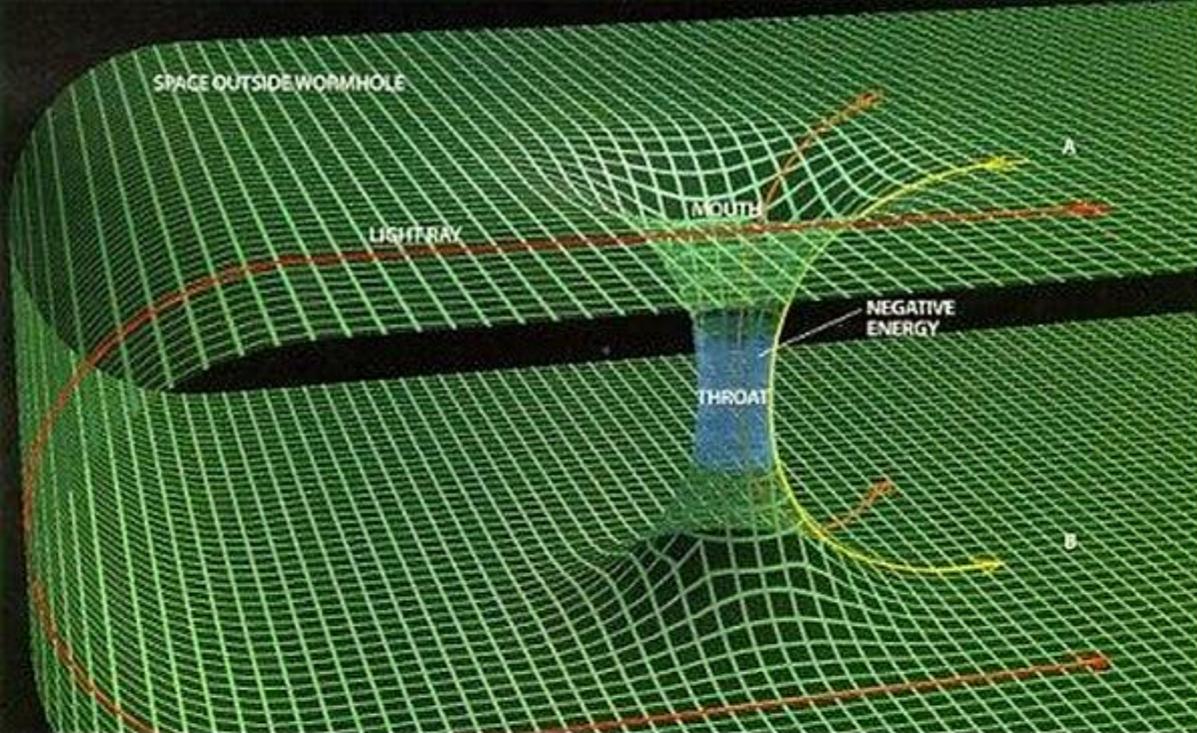
**Sono i famosi “wormhole”, cunicoli spazio-temporali che per adesso appartengono al campo della teoria e della fantascienza. Ma se davvero esistessero, dove dovremmo cercarli nel nostro universo?**

Spesso i buchi neri vengono definiti come tunnel (o meglio, come l'entrata di un tunnel) che collegano due punti anche molto distanti nell'universo. Lo abbiamo visto nell'articolo che abbiamo dedicato alle singolarità, nel quale abbiamo citato anche il wormhole di “Interstellar”. Ma cosa sono questi famosi **tunnel spazio-temporali** e dove potremmo cercarli nell'universo?

# Ponte di Einstein-Rosen (Wormhole)



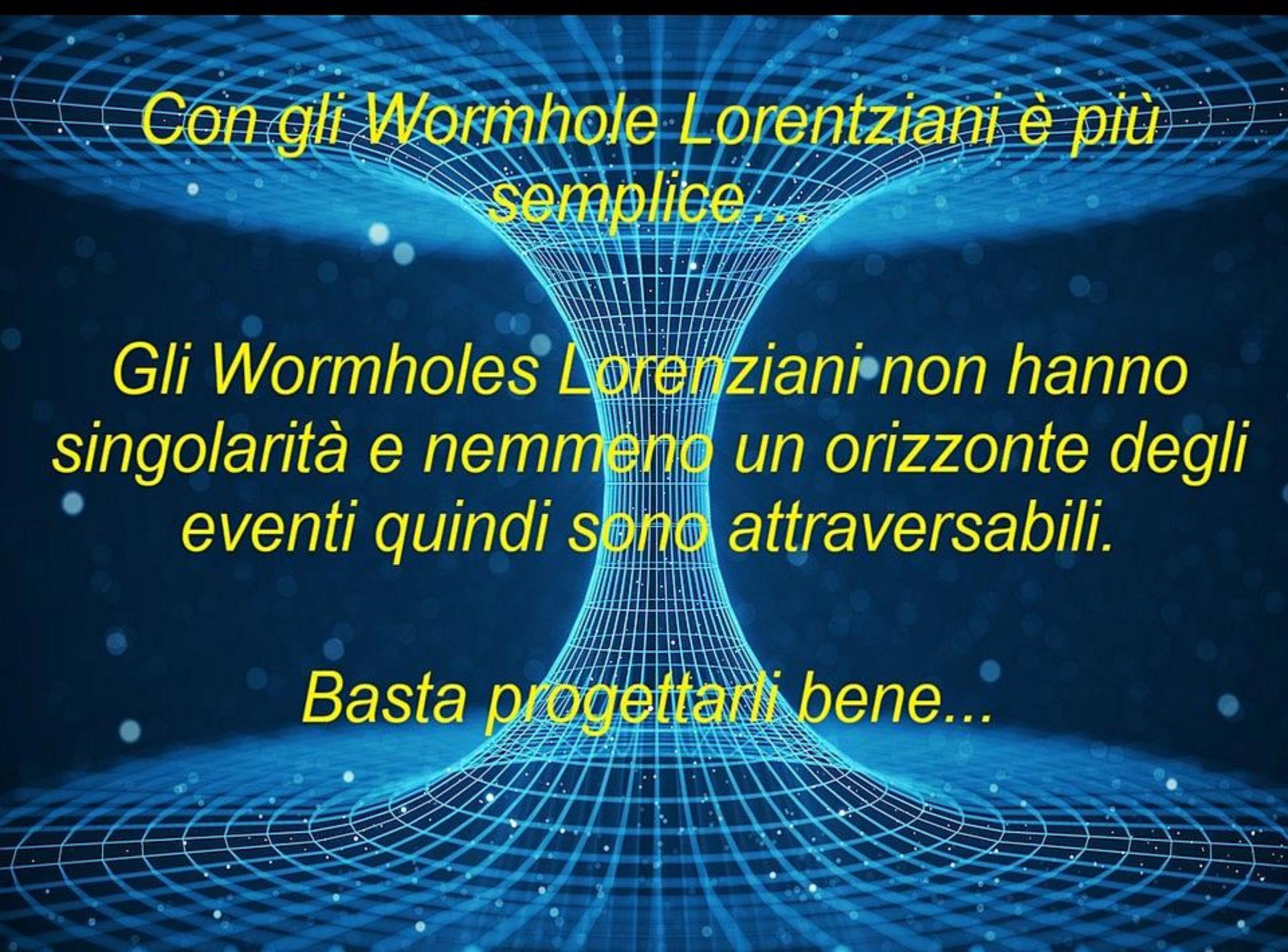
Nell'Universo la distanza non è costante, ma dipende dalla curvatura dello Spazio-Tempo



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

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

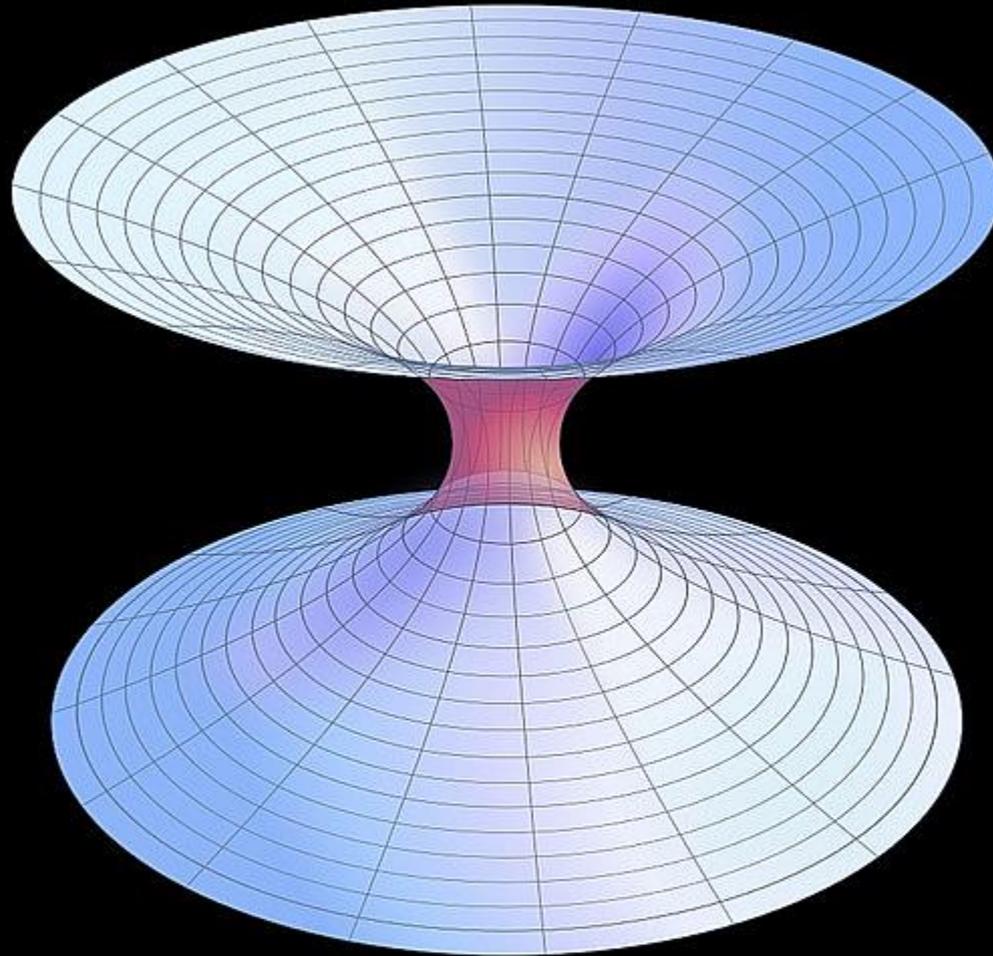
Il primo requisito risulta necessario per l'attraversamento del wormhole: un buco nero rotante potrebbe non avere una singolarità nel suo centro, bensì una specie di anello. In questa maniera sarebbe possibile attraversarlo senza necessariamente finirvi addosso. Il secondo requisito è necessario per 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.



*Con gli Wormhole Lorentziani è più semplice...*

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

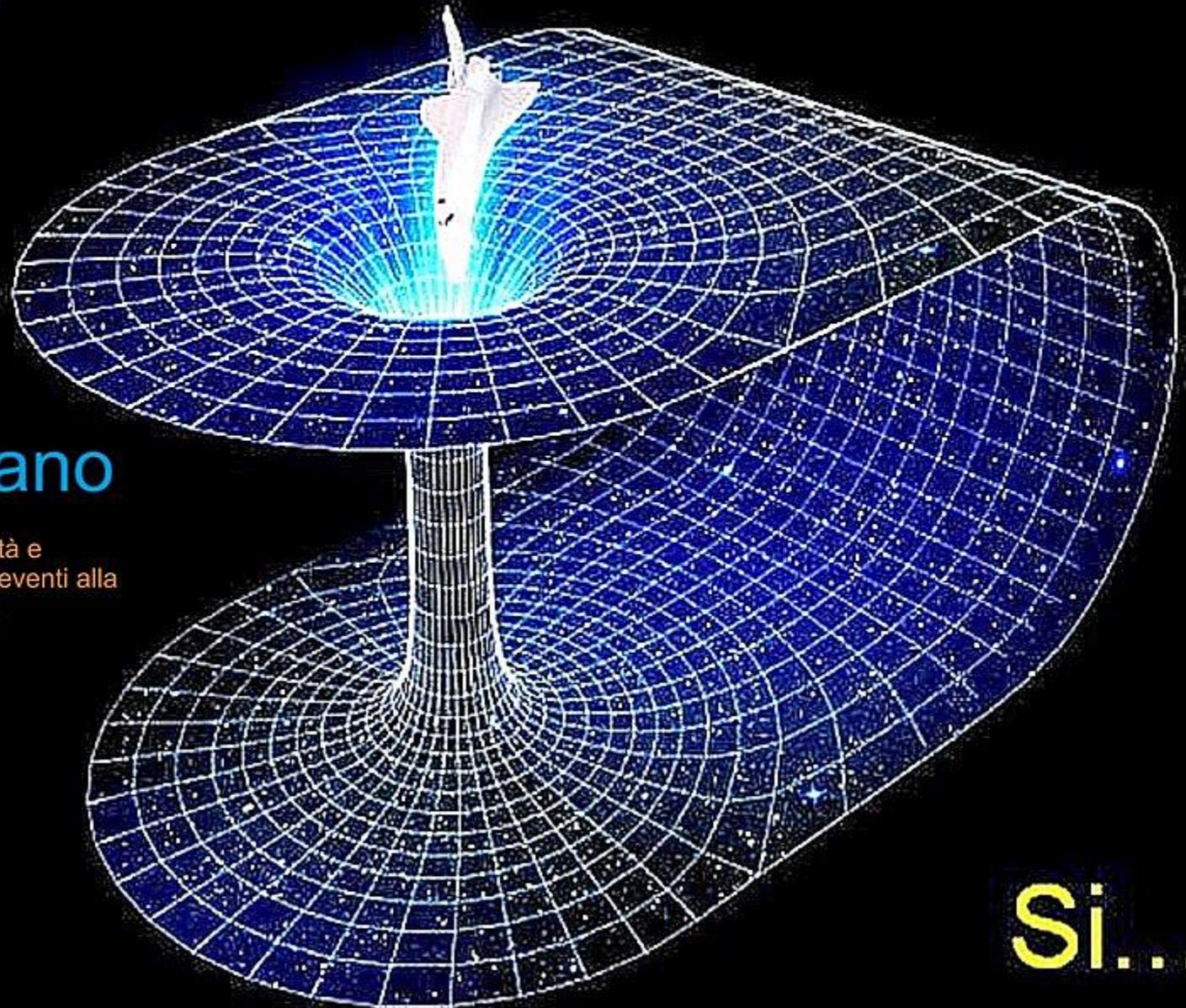
*Basta progettarli bene...*



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

Senza singolarità e  
senza orizzonte degli eventi alla  
strozzatura

# Si può passare attraverso?



## Lorentziano

Senza singolarità e  
senza orizzonte degli eventi alla  
strozzatura

Si....

# Ecco come funziona...

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

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

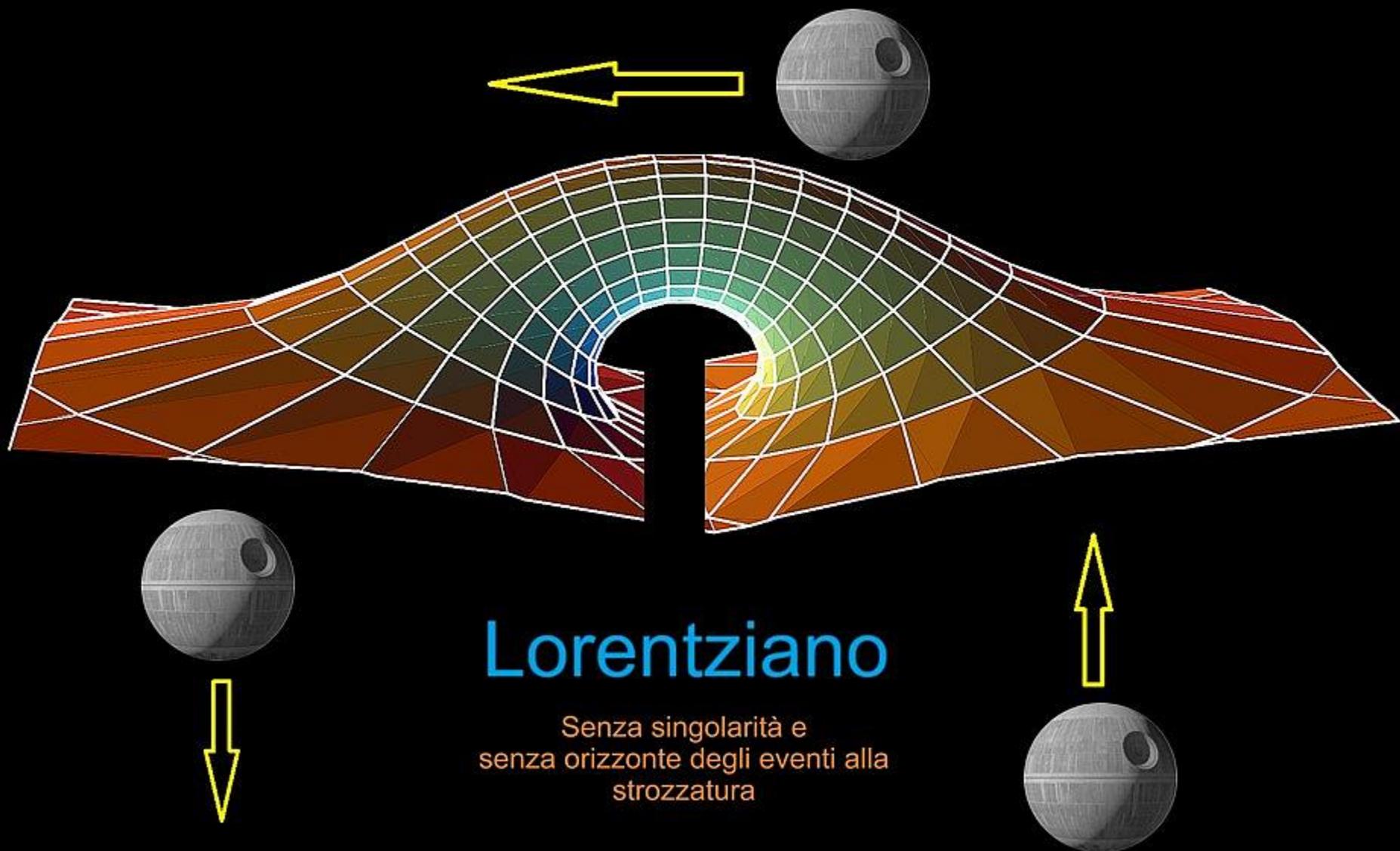
$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -[8 \pi G/c^4] T_{\mu\nu}$$

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 ( $6,673 \times 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>) e  $c$  è la velocità della luce nel vuoto ( $3 \times 10^8$  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.

# 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:  $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . (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.

# Wormhole attraversabile che connette due regioni distanti dello stesso universo



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:

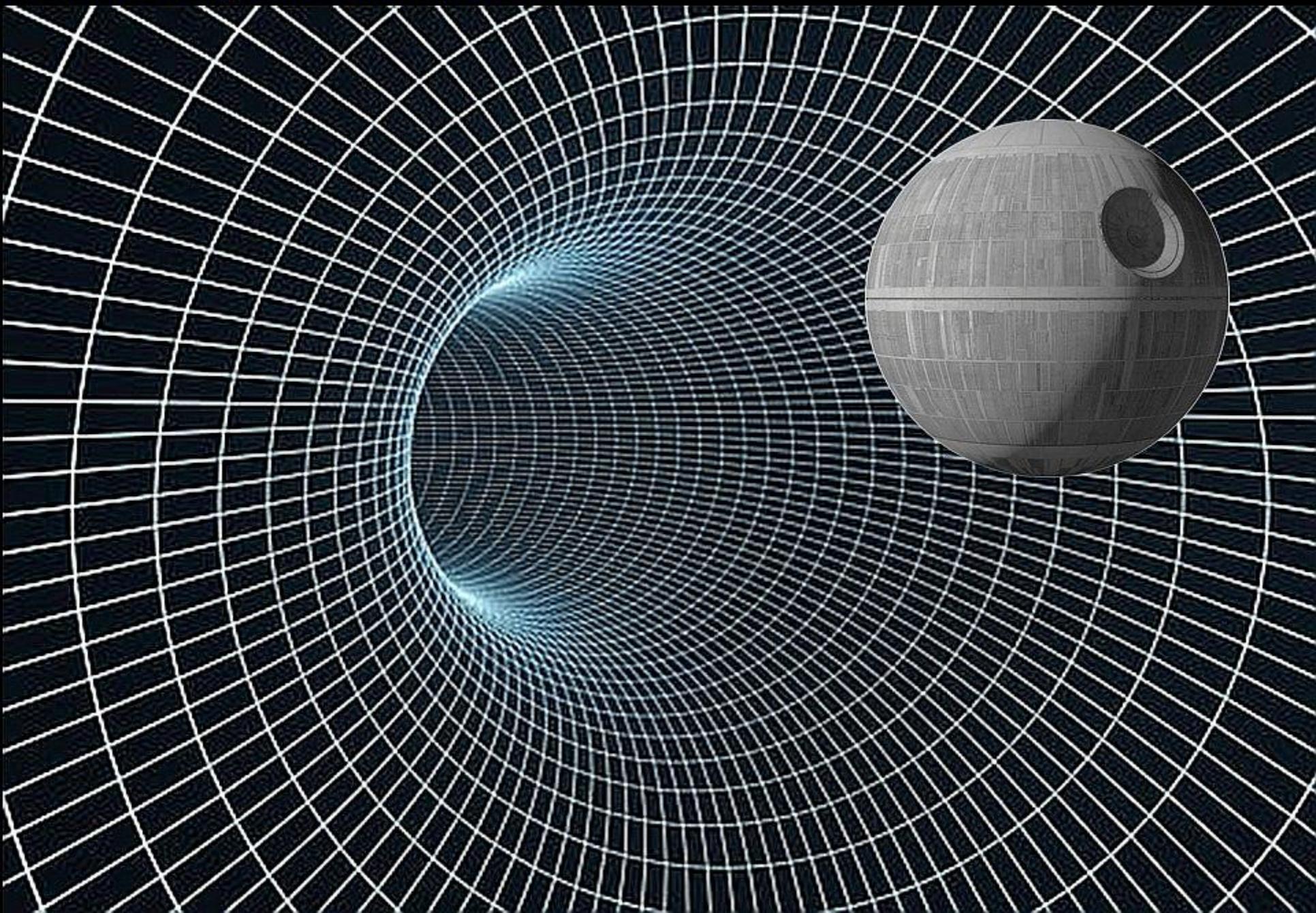
$$d\Theta^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$$

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

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

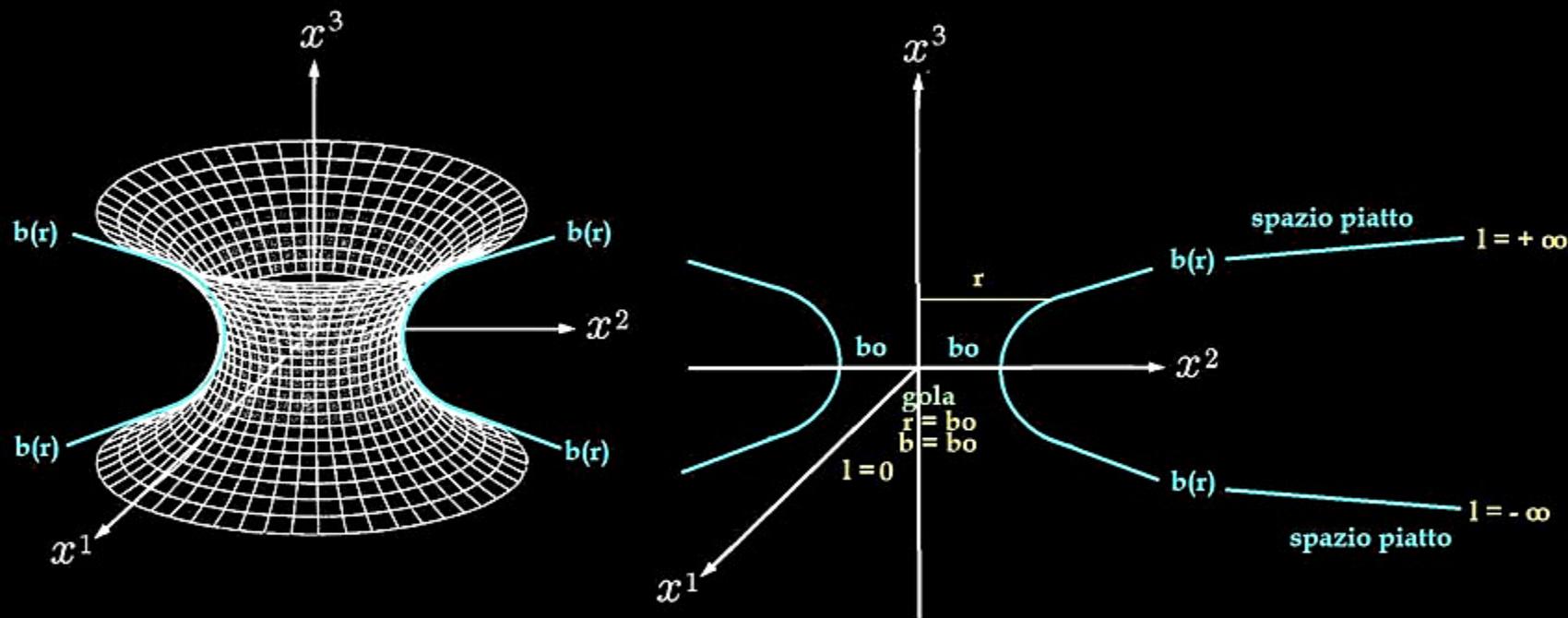
dove  $g_{\mu\nu}$  è il tensore metrico che è una matrice di  $4 \times 4 = 16$  elementi che codifica la geometria dello spazio-tempo e  $dx^\mu$  è la separazione infinitesima tra due punti di coordinate  $x^\mu$  e  $x^\nu$ . La funzione  $\Phi(r)$  è una funzione di *redshift liberamente specificabile* 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.

# Cunicolo spazio-temporale



# 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  $X^3$  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  $b_0$  sono necessarie una densità di materia/energia  $\rho(r)$  pari a:

$$\rho(r) = (db(r)/dr) \cdot c^2 / (8 \cdot \pi \cdot G \cdot r^2) \quad \begin{array}{l} \text{Energia} \\ \text{Negativa} \end{array}$$

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

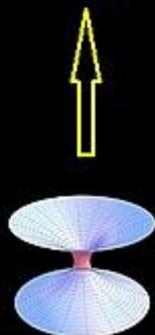
$T_{\varphi\varphi} = p$  è di nuovo la pressione laterale

Energia  
Negativa



dell'equazione di Einstein:

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



# Tensore di Stress-Energia

simmetria sferica

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

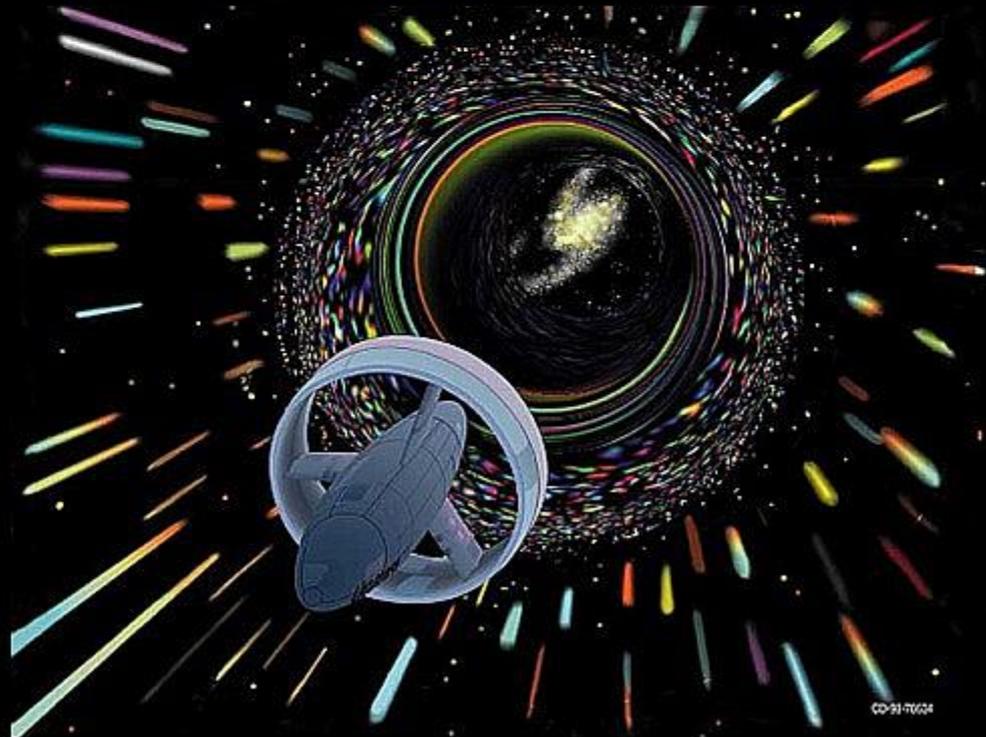
$\rho$  = densità di massa (massa/volume) oscura...

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

$\tau$  = tensione radiale

$p$  = pressione laterale

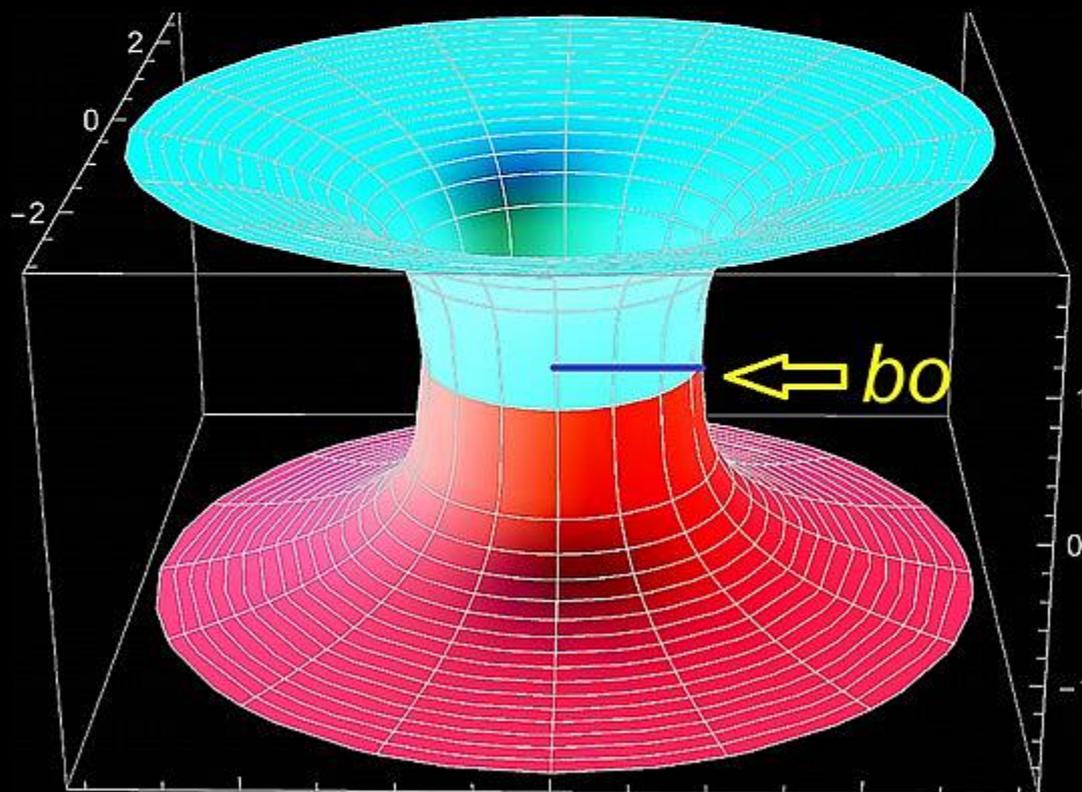
Riassumendo abbiamo che (equazione di campo) + (assenza di orizzonte degli eventi nella gola del wormhole) implicano che  $\tau > \rho \cdot c^2$  nella gola che a sua volta implica che gli astronauti che si muovono ad alta velocità entro la gola del wormhole vedono la presenza di una massa-energia negativa 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  $b(r) = b_0 + \sqrt{r}$  con ad esempio  $b_0 = 1000$  metri. Ricordiamo che le unità di misura sono quelle tipiche del sistema MKS quindi metri, chilogrammi, secondi, etc. Ricordatevi che un wormhole attraversabile è costoso, vi servirà una massa negativa (esotica) pari a:

$$M_{wh} = -(2.7 \times 10^{27} \cdot b_0) \text{ kg}$$

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

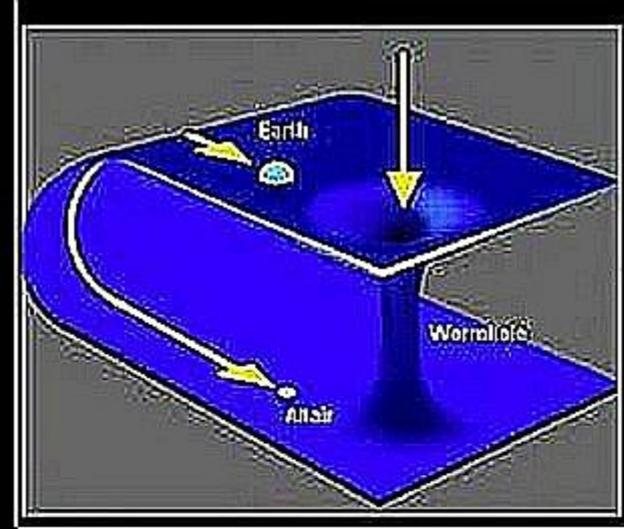


aspetto di un Wormhole



# 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:  $41,7 \text{ c}$

# STARGATE



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

## Da dove arrivano i tunnel spazio-temporali

Prima di cercare di capire dove potrebbero esistere questi cunicoli spazio-temporali, è d'obbligo fare un passo indietro. Il primo a interessarsi all'argomento fu **Ludwig Flamm**, nel 1916. Egli riprese e attualizzò l'ipotesi ottocentesca di una quarta dimensione spaziale che abbreviasse le distanze, e quindi i tempi di un viaggio. Questa nozione fu plasmata da **Hermann Weyl** nel 1921, in relazione alle sue analisi della massa in termini di energia e campo elettromagnetico.

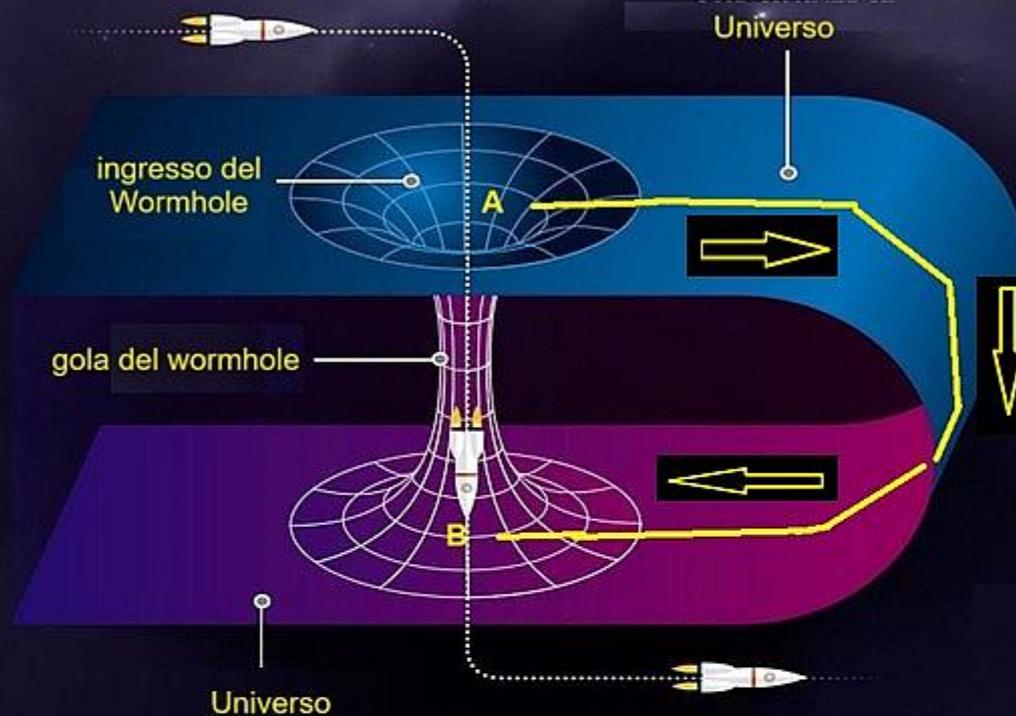
Furono, però, **Albert Einstein** e il suo collega **Nathan Rosen** (fisico statunitense naturalizzato israeliano) i primi a pubblicare il risultato di questi studi, nel 1935.

Cosa sostenevano? Che esistono connessioni fra aree di spazio che possono essere modellate come soluzioni di vuoto nelle equazioni di campo di Einstein.

Con questo sistema, i due scienziati riuscirono a combinare i modelli di buco nero e buco bianco,



# Viaggio nel passato



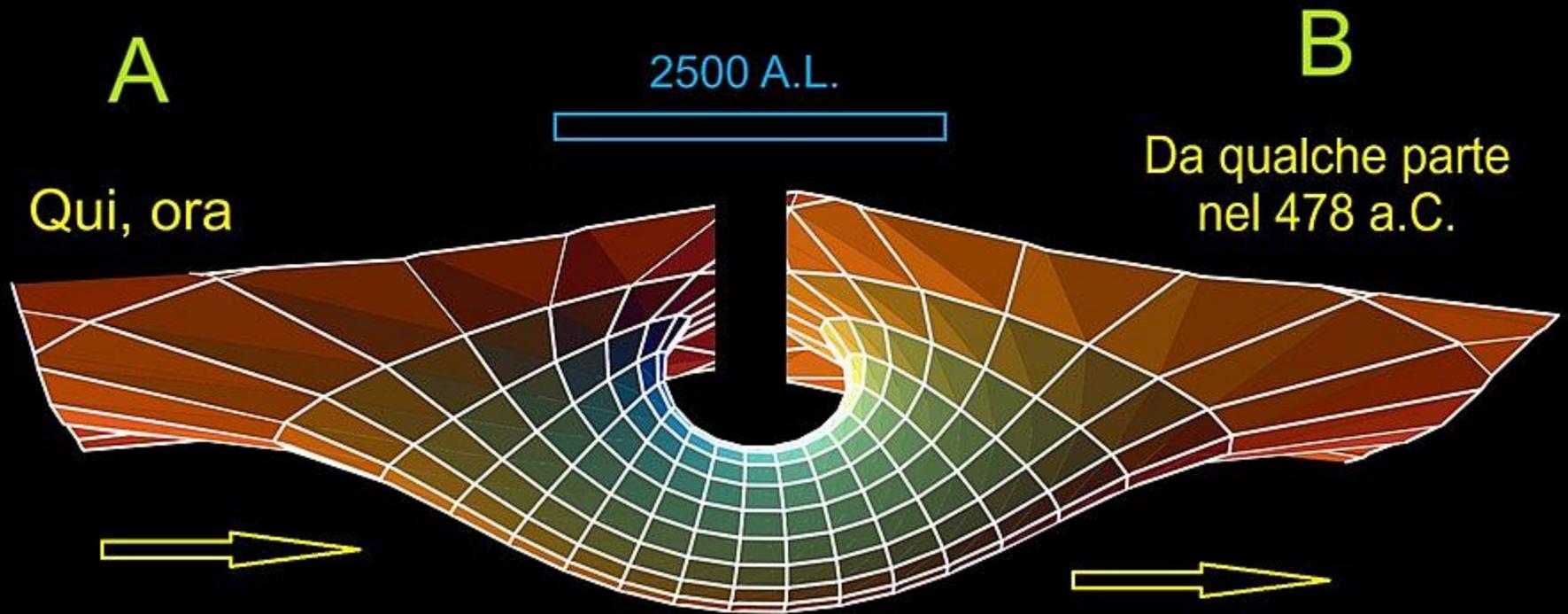
La traiettorie in giallo verrà percorsa dai raggi di luce relativi a tutti gli eventi del tempo della mia partenza. Io arrivo in B 10 anni prima degli eventi del tempo della mia partenza, quindi vedrò tutti gli eventi accaduti 10 anni prima in poi

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)



Gli Wormholes Lorentziani esistono in natura?

Sì!!

Sono creati e istantaneamente distrutti dalle fluttuazioni quantistiche (*Quantistic Foam*)

Possono generarsi attraverso il Principio di Indeterminazione di Heisenberg:

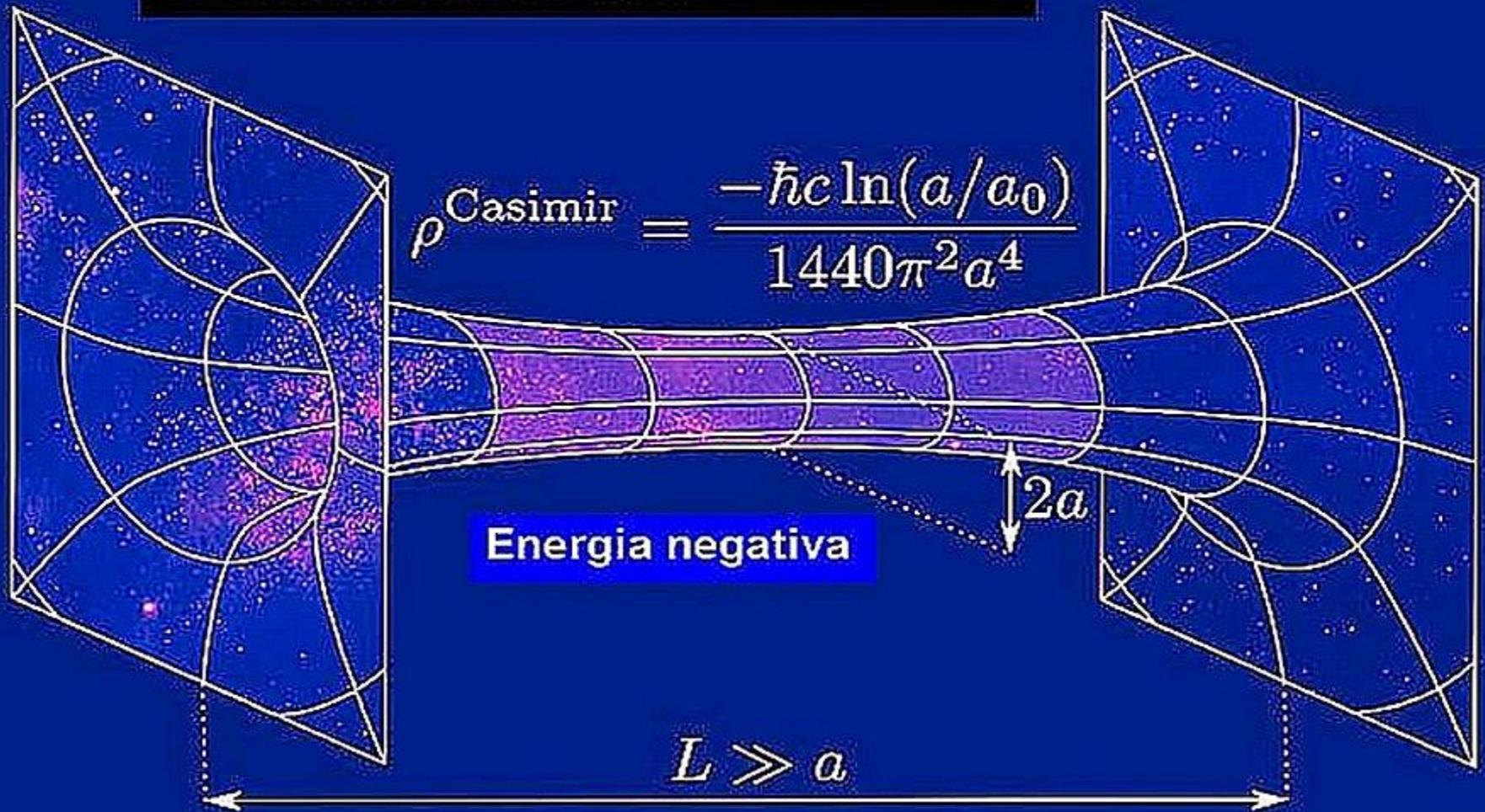
$$\Delta E \cdot \Delta t \simeq h$$

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



Lo spazio vuoto fluttua  
quantisticamente...

Effetto Casimir



In futuro, però, grazie al progresso scientifico, potremmo essere in grado di effettuare misurazioni che ci consentirebbero di identificare un wormhole. Gli scienziati, però, ritengono che anche se un wormhole fosse attraversabile, difficilmente un'astronave sopravviverebbe al viaggio. Realisticamente, per tenere aperto un wormhole stabile, dovremmo utilizzare **una gran quantità di energia negativa** e adesso come adesso, non sappiamo proprio come farlo.

però...

## Il ponte Einstein-Rosen

Il ponte di Einstein-Rosen (il nome deriva da Einstein e da un suo collega, Nathan Rosen) è una struttura, naturalmente solo teorica, che può collegare punti anche lontanissimi tra loro nello spazio-tempo. Si applica in base ad una soluzione particolare delle equazioni del campo di Einstein. Quando si parla di wormhole, spesso si prende in considerazione proprio il ponte di Einstein-Rosen in quanto esso può essere più facilmente visualizzato come un tunnel con due estremità che rappresentano due punti diversi dello spazio, nel tempo oppure in entrambi.

Il ponte di Einstein-Rosen avalla anche l'idea dei cosiddetti "buchi bianchi", praticamente buchi neri all'incontrario con una fonte di entrata in cui il materiale viene risucchiato e un'area di uscita in cui viene espulso. In tal senso un cunicolo del genere potrebbe essere usato per uno spostamento nello spazio. Come fa notare l'articolo, c'è però un problema insormontabile: un buco bianco risulterebbe molto instabile, troppo per essere attraversato. Probabilmente non esistono neanche. Il punto di ingresso potrebbe allora trovarsi all'interno dell'orizzonte degli eventi di buco nero. Ma la fisica ci dice che una volta superato questo confine è impossibile poi uscirne.<sup>[1]</sup>

## Il ponte Morris-Thorne

Il ponte Morris-Thorne (nome che deriva da chi l'ha concettualizzato nel 1988, lo scienziato Kip Thorne e il suo studente Mike Morris) è un tunnel spazio-temporale che viene tenuto aperto da un guscio sferico fatto di materia esotica. Nel concetto di Morris e Thorne, il wormhole potrebbe essere stabile, e dunque attraversabile. Questo ponte ha il vantaggio di non avere un "orizzonte degli eventi", diversamente dai ponti che sfruttano i buchi neri. Questo cunicolo sarebbe attraversabile in tutte e due le direzioni. La "gola" del wormhole potrebbe essere tenuta aperta da un qualche tipo di materia esotica con una densità di energia negativa. L'energia negativa necessaria potrebbe essere fornita dai campi di materia quantistica oppure l'intero wormhole potrebbe essere prodotto tramite un evento di tunneling quantistico.<sup>[2]</sup>

## Il ponte ad energia esotica

## Energia oscura

Un ponte ad energia esotica è un ponte spazio-temporale che per funzionare potrebbe servire di energia negativa. L'energia negativa è un concetto che si usa nella fisica per spiegare il campo gravitazionale e alcuni effetti dei campi quantistici. L'energia negativa potrebbe essere recuperata dal vuoto dello spazio visto che nel vuoto coppie virtuali di particelle e antiparticelle appaiono e scompaiono spontaneamente per brevissimi periodi di tempo prima di annientarsi. Si crede che alcune di queste particelle possono avere un'energia negativa e quest'ultima potrebbe essere "recuperata" sfruttando l'effetto Casimir. Si potrebbero porre due lastre metalliche piatte molto vicine tra loro con in mezzo il vuoto e senza campi elettromagnetici e sfruttare una particolare proprietà fisica, già dimostrata tramite esperimenti, per produrre un certo quantitativo di energia negativa. Tuttavia, come spiega l'articolo, si conosce ancora poco riguardo queste proprietà del vuoto, anzi non si sa nemmeno con chiarezza se l'energia negativa che si può ottenere tramite l'effetto Casimir sia il giusto tipo di energia negativa per creare un wormhole.<sup>[1]</sup>

# Conclusione finale:

Il problema è che dell'Universo (il nostro) sappiamo molto poco...

figuriamoci degli altri...

