



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 2

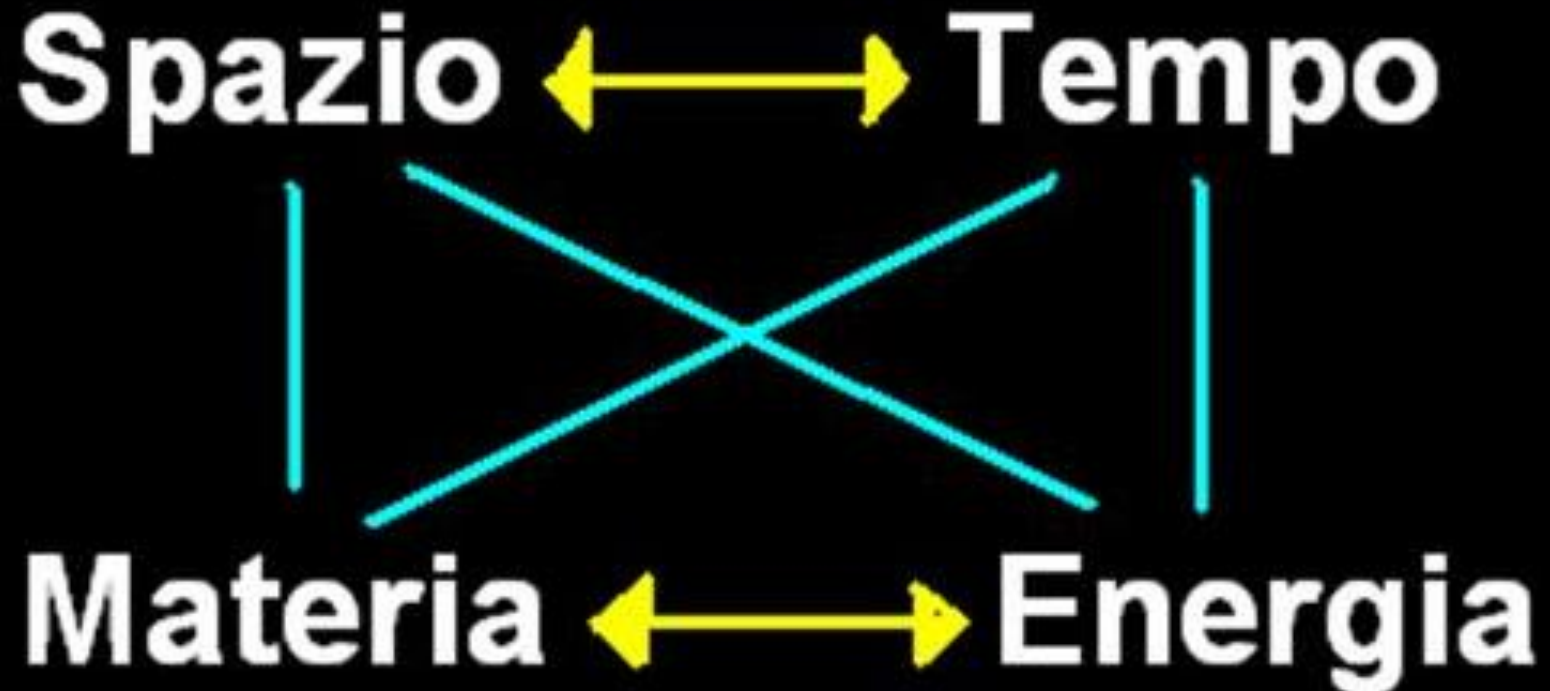
Lo Spazio, il Tempo, la Materia
e l'Energia

A close-up, slightly low-angle shot of Yoda's face. He has a wrinkled, green complexion with deep lines around his eyes and mouth. His eyes are wide and looking slightly to the right. The background is dark and out of focus, showing some white fur, possibly from a creature he is interacting with.

**Spazio
Tempo
Materia
Energia**

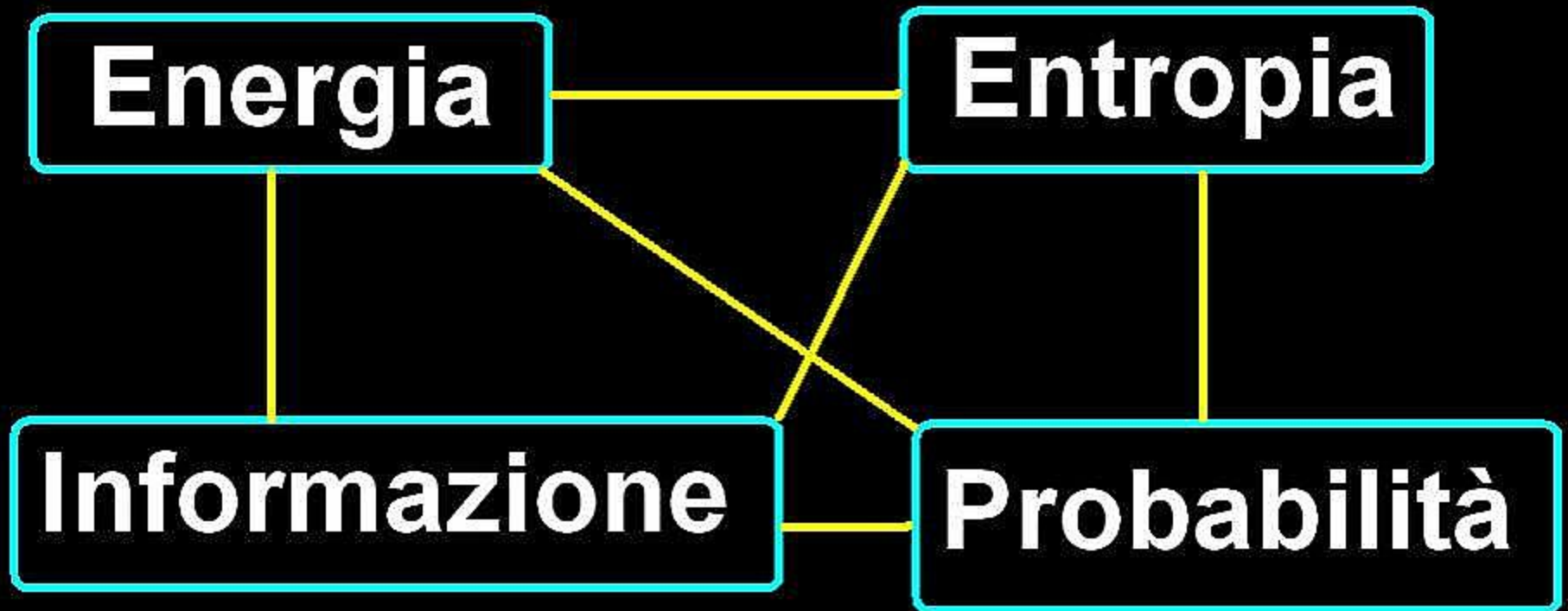
4 diversi aspetti della stessa cosa...

Esiste quindi una corrispondenza
incrociata tra tutti...



sono legati indissolubilmente...

Corrispondenze



... ma anche:

Entropia e Informazione



$$S = \ln(E)$$



$$I = \log_2(E)$$

$$I = K_s \cdot \ln(E)$$

E = Energia (joules)

S = Entropia (nats)

I = Informazione (bits)

$K_s =$ costante di Shannon = $1/\ln(2)$

Dove c'è Energia, c'è Informazione!

quanta Informazione codifica una massa m ?

$$I = Ks \cdot \ln(m \cdot c^2) \quad \text{bits}$$

m è espressa in kg-massa

c = velocità della luce nel vuoto.

m è la massa a riposo (oggetto fermo)

Di cosa è fatto l'UNIVERSO?

...per lo meno il nostro

energia
oscura
73%



materia
ord.
4%

materia
oscura
23%

tutta questa massa
e energia codifica
informazione

Quanta informazione è codificata nell'Universo?

$$I(t) < I(\max)$$

dove:

$$I(\max) = 10^{122} \text{ bits}$$

t = tempo attuale = 13.7 Gy

Il Modello Standard

è il modello della struttura
dell'Universo comunemente
accettato attualmente

prevede un certo tipo di
struttura della Materia

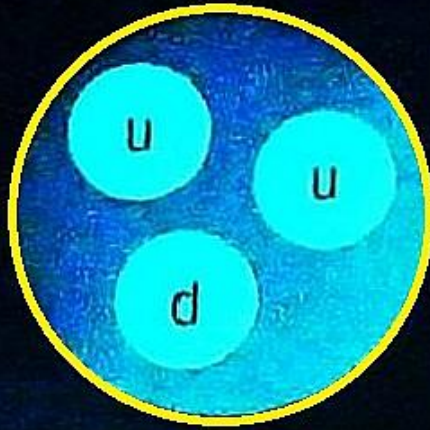
Struttura della Materia

Adroni

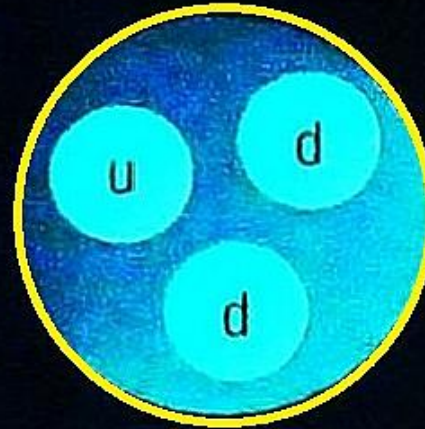


Barioni
(3 Quark)

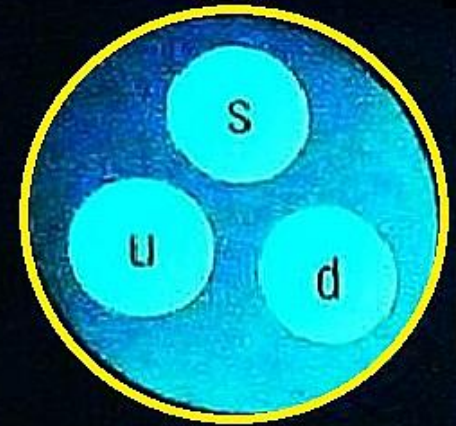
PROTONE



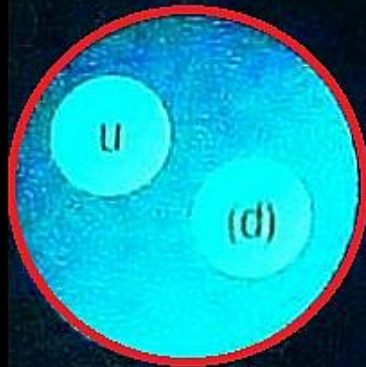
NEUTRONE



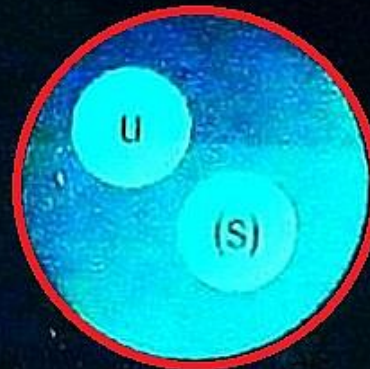
LAMBDA



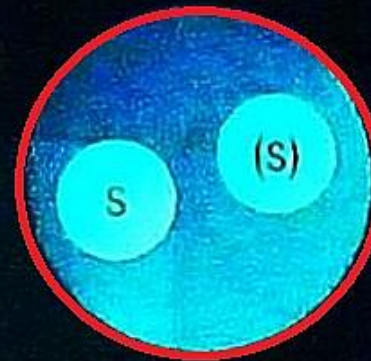
MESONE PI^+



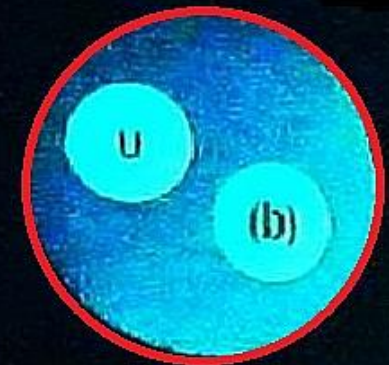
MESONE KA^+



MESONE PHI



MESONE B^+



Mesoni
(2 Quark)

Rappresentazione di alcuni adroni a seconda della loro combinazione di quark. Nella riga superiore, i barioni (formati da tre quark) e in quella inferiore, i mesoni (formati da due quark).

Materia

Le 17 particelle del Modello Standard



Unità di Planck

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:

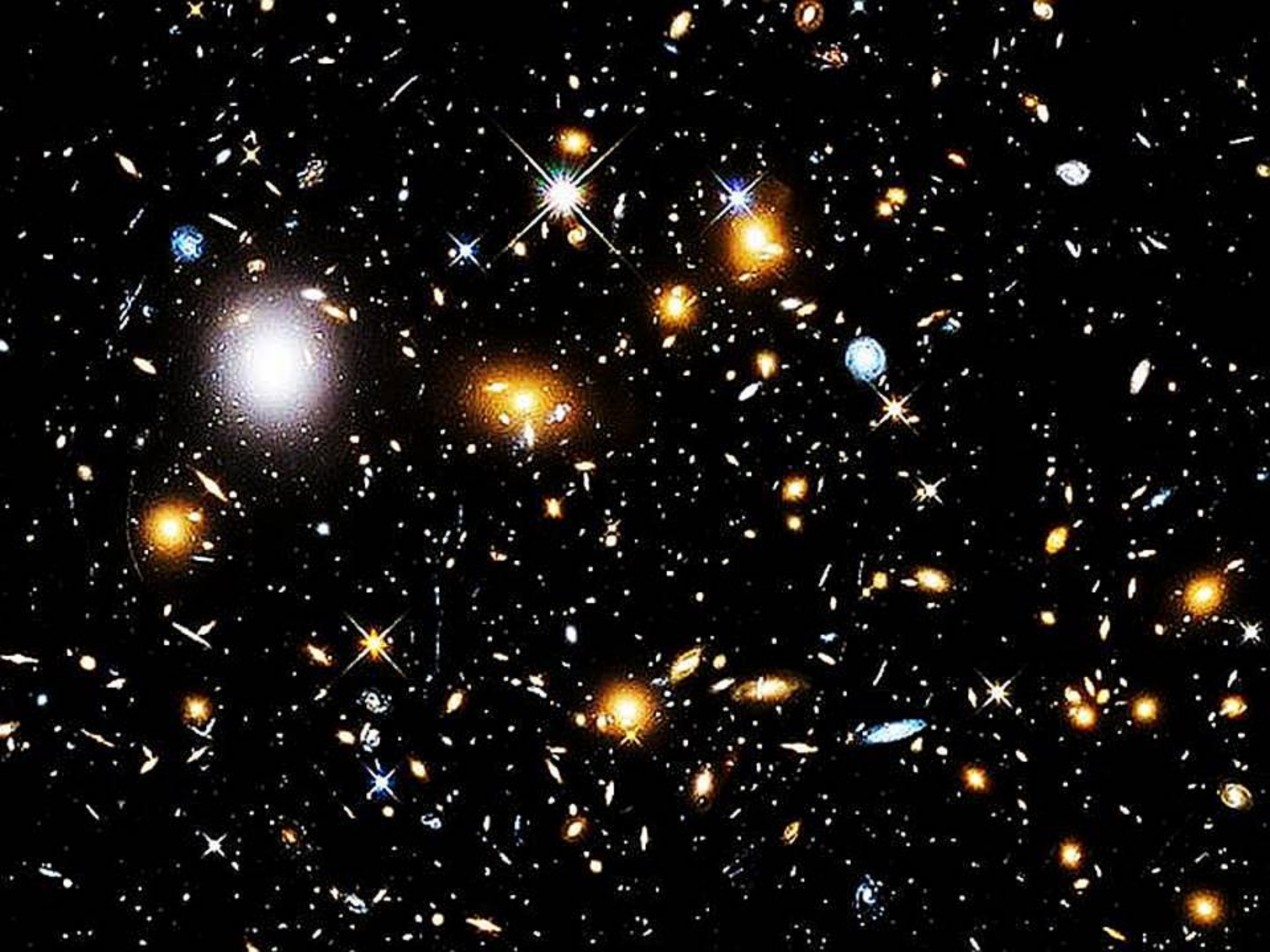
$$c = \frac{l_p}{t_p}$$

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

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

La struttura dell'Universo

Sovrapposizione di 342 esposizioni da parte di HST tra il 18 e il 28 dicembre 1995. L'immagine mostra circa 1.500 galassie nelle profondità dell'Universo e ricopre una zona di cielo pari a quella che copre 1 eurocent a circa 20 m di distanza in direzione dell'Orsa Maggiore.



Energia del vuoto...

(Effetti)



Energia oscura o esotica

L'Energia del Vuoto

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

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

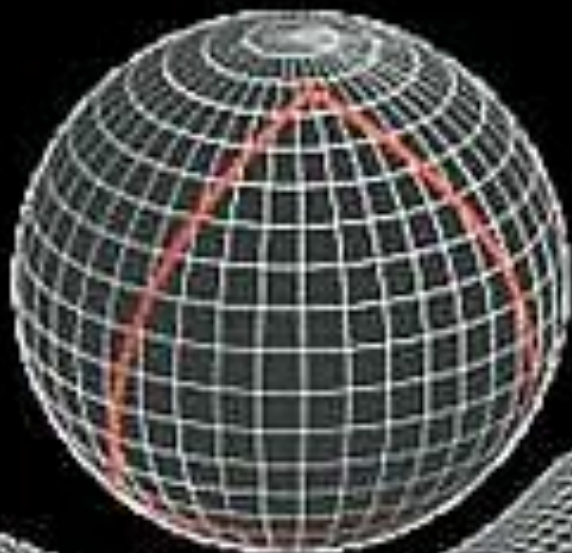
I_{∞} = Quantità di informazione contenuta nell'Universo

\hbar = Costante di Plank ridotta

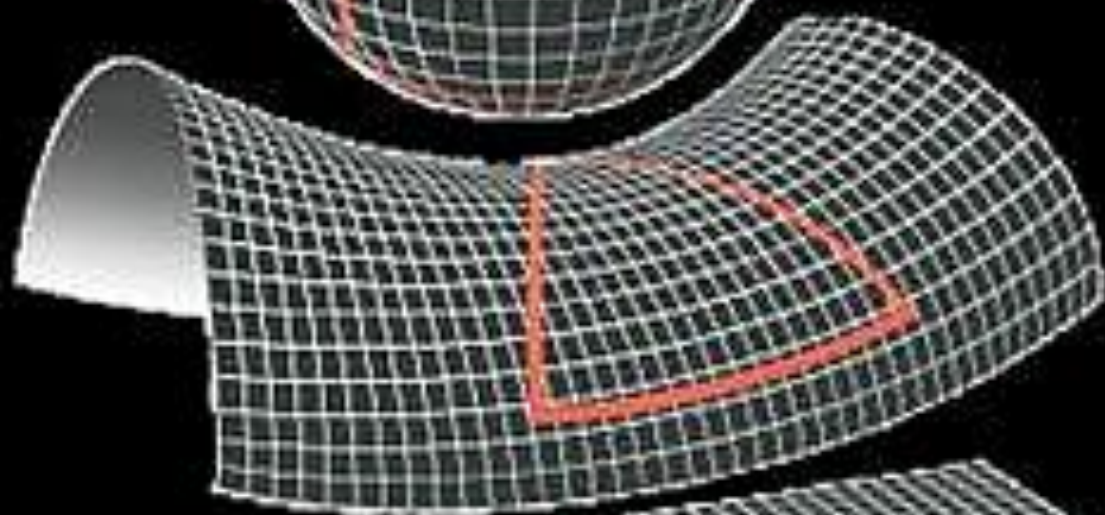
C = Velocità della Luce ($c=300.000 \text{ Km/sec}$)

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

Densità dell'Energia Oscura



$$k = +1$$



$$k = -1$$



$$k = 0$$

La forma dell'Universo?

Equazioni di Friedmann

$$\dot{R} = \left[R^2 \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3} - kc^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) R + \frac{\Lambda c^2}{3} R$$



Aleksandr Aleksandrovič Fridman
(San Pietroburgo, 6 giugno 1888 –
Pietrogrado, 16 settembre 1925)

R = Raggio dell'Universo (fattore di scala)

\dot{R} = Velocità di espansione

\ddot{R} = Accelerazione dell'espansione

ρ = Densità media della materia

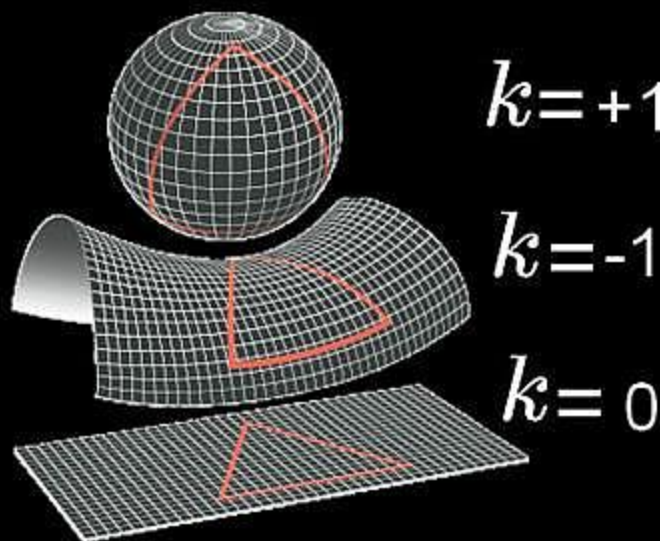
p = Pressione

c = Velocità della luce

G = Costante di Gravitazione Universale

Λ = Costante cosmologica

k = Parametro di curvatura

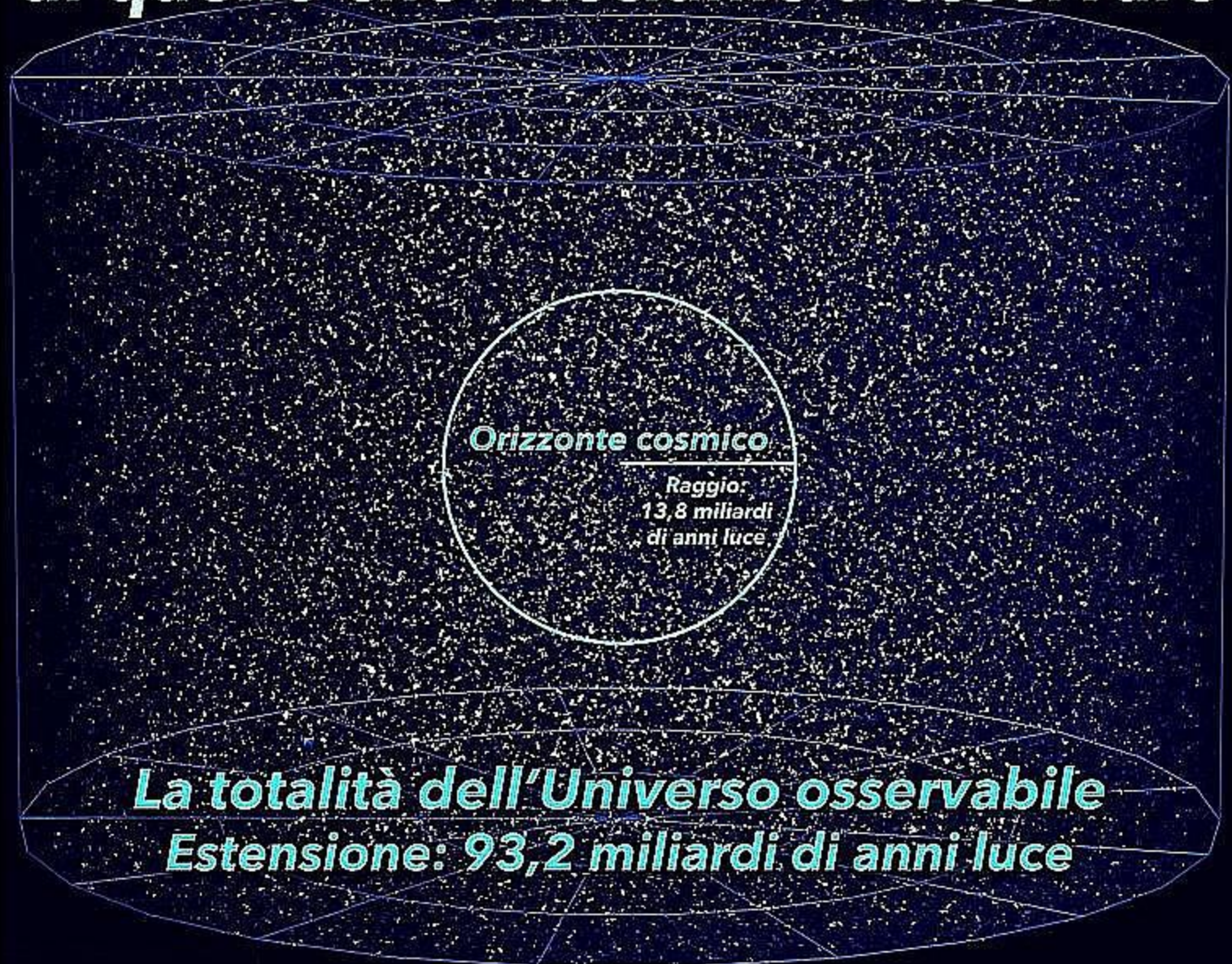


Il fatto che la velocità della luce sia finita ($c=300000$ km/sec) crea un orizzonte cosmologico al tempo t di età dell'Universo.

Il suo raggio è $R = t$ anni luce

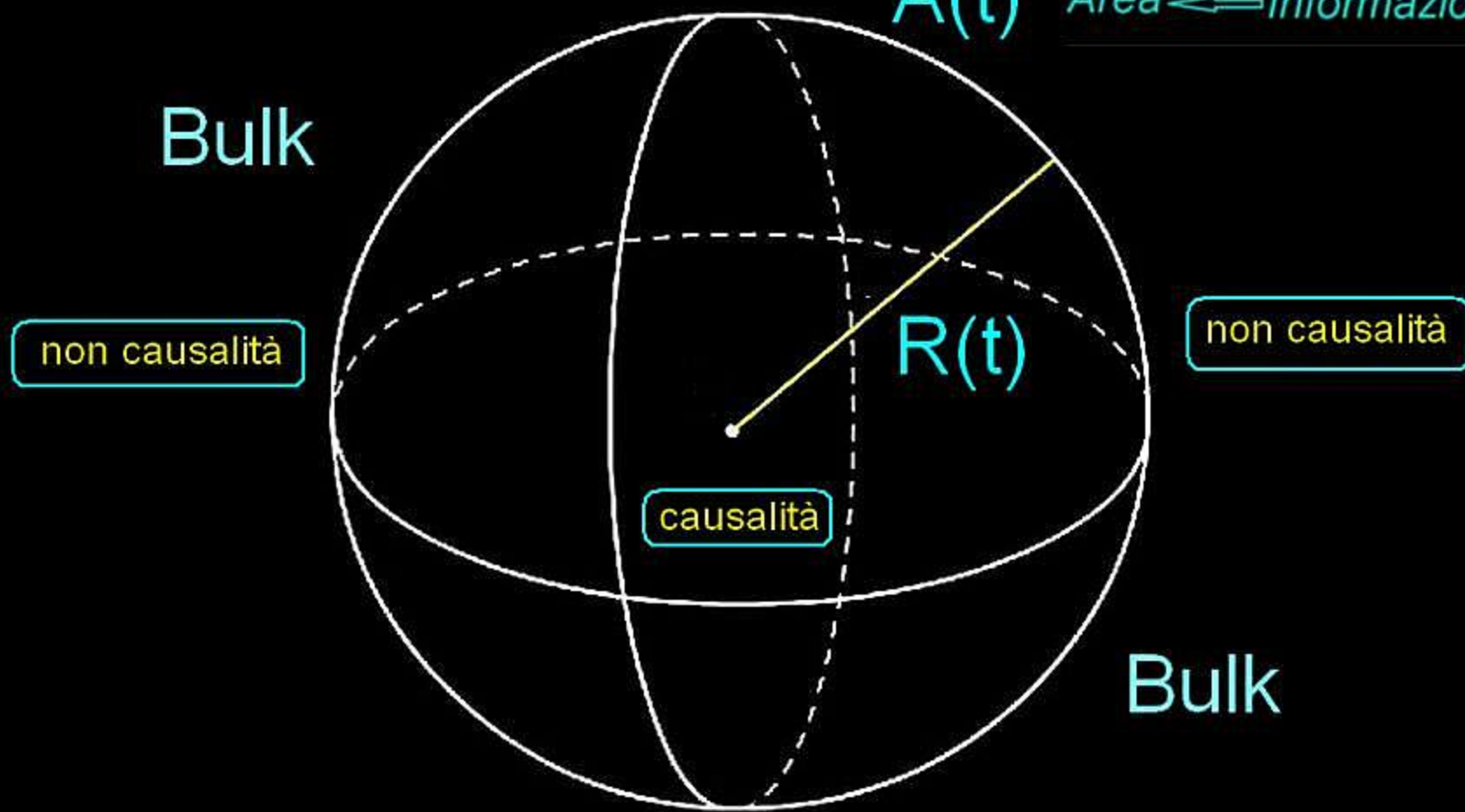
Si crea una superficie che racchiude un volume di spazio a cui abbiamo accesso in maniera causale.

L'Universo è 38 volte più grande di quello che riusciamo a osservare



Universo ($k=1$)

$A(t)$ Area \longleftrightarrow Informazione



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

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

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

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

I_{BH} = informazione

S_{BH} = Entropia

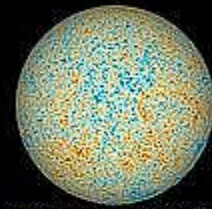
k = costante di Boltzmann

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

Evoluzione dell'Universo:



CMB (Cosmic Microwave Background) anisotropia termica

Componente che domina la dinamica dell'Universo



Fattore di scala $a(t)$



Tempo e transizioni



Età dell'Universo

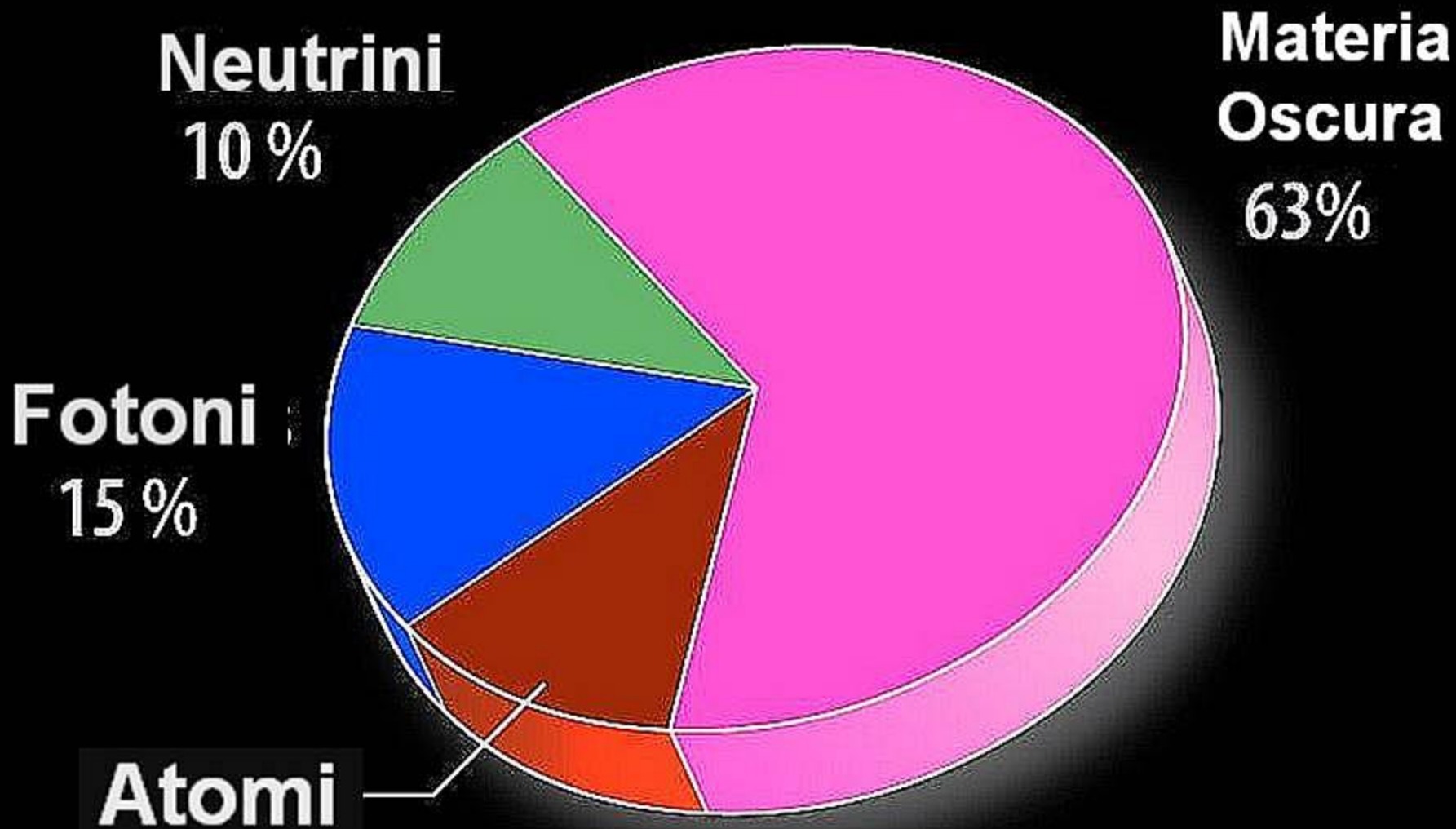
Eventi \Rightarrow Big bang o Big bounce

\Uparrow Formazione dei nuclei

\Uparrow Formazione di atomi e fondo diffuso

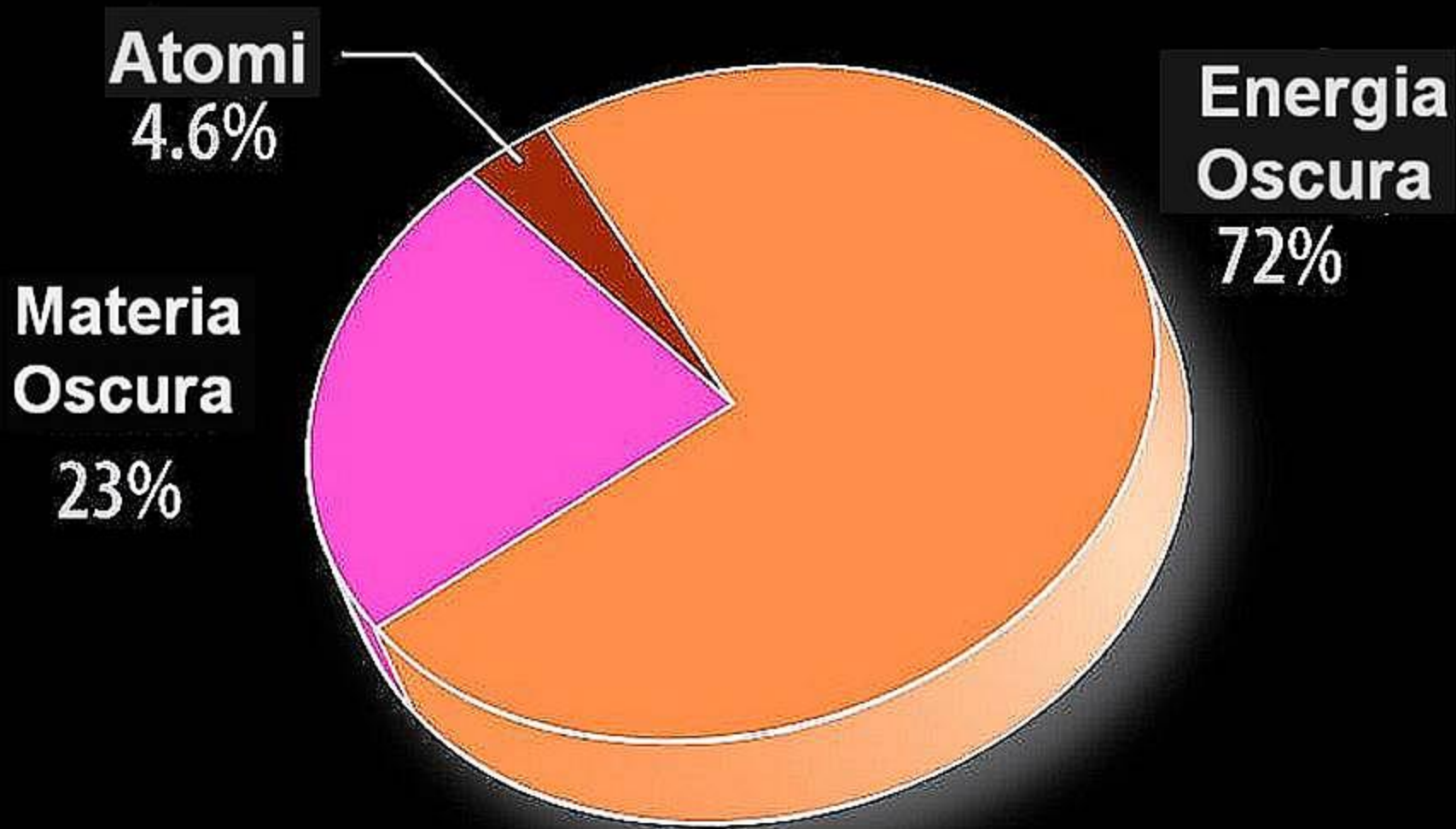
\Uparrow Formazione delle galassie

\Uparrow Presente



13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)



Oggi

Lloyd (2002) cercò di rispondere alla seguente domanda:

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

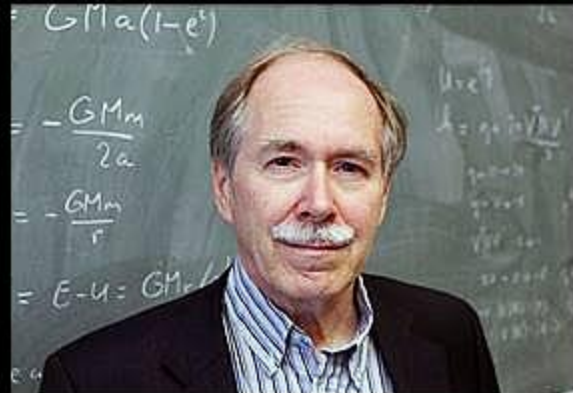
Età attuale dell'Universo: 13,7 Miliardi di anni

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:

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



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

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

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

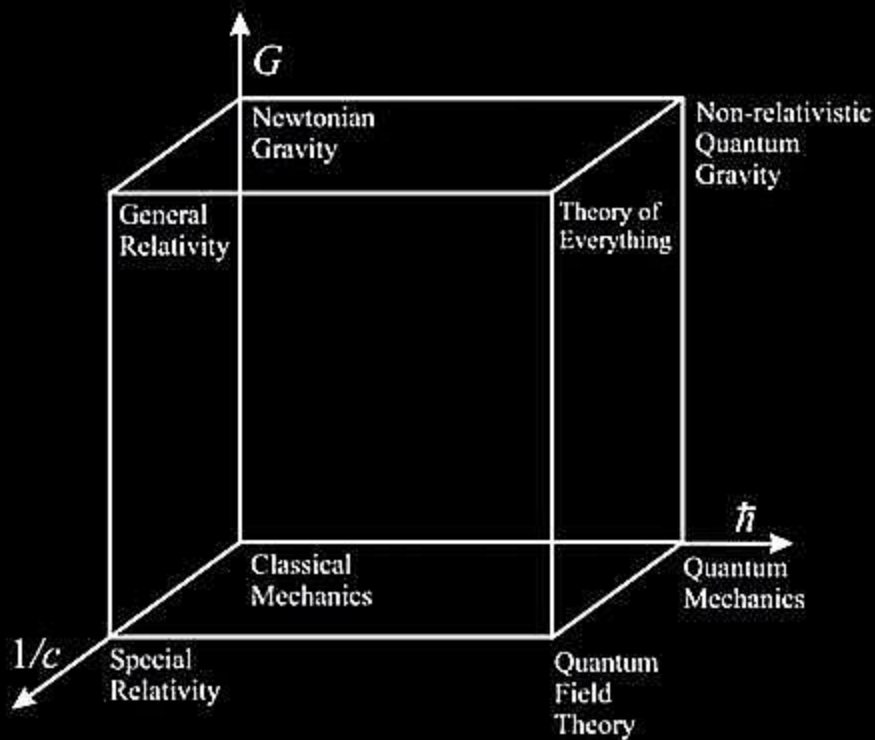
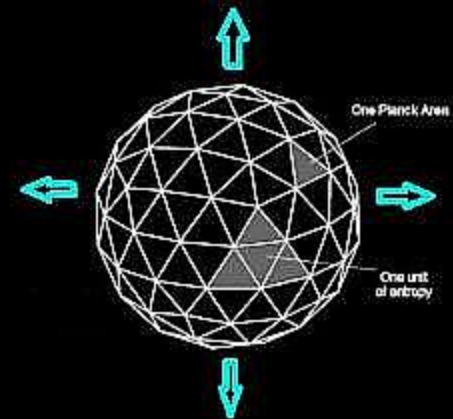
Il Principio Olografico implica che le leggi fisiche non possono esistere in termini di perfette forme matematiche, ma sono soggette a variazioni dipendenti dal contenuto di Informazione dell'Universo.

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

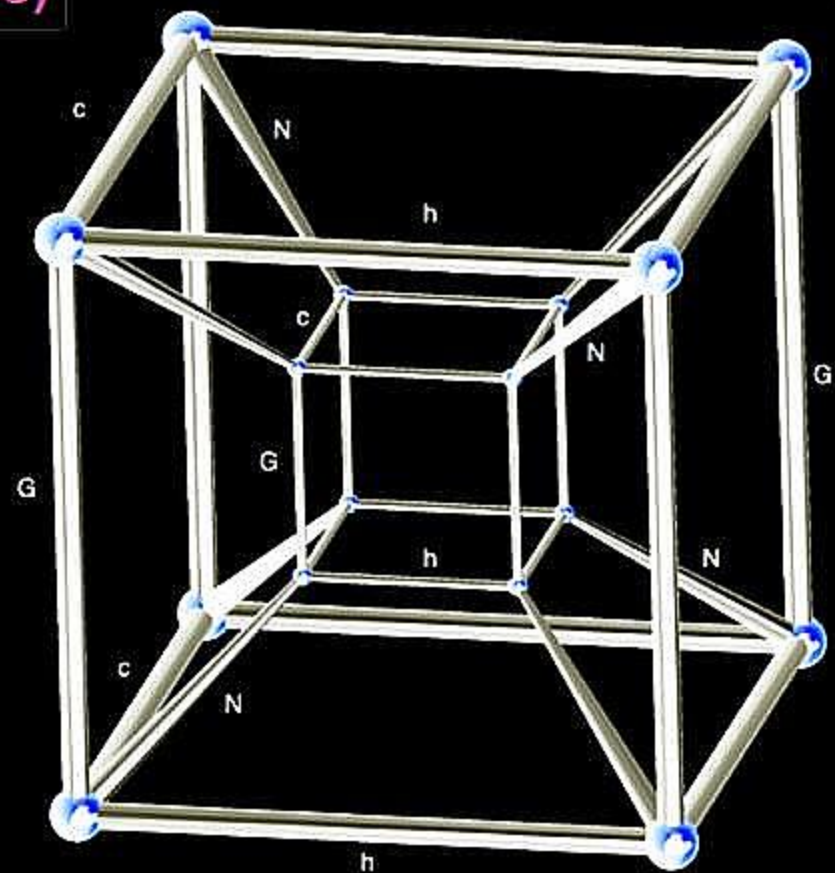
P.A.M. Dirac ne era convinto...

Aumento progressivo dell'Informazione (N bits) nell'Universo a causa della sua espansione

(variazione delle costanti fisiche)



Situazione attuale



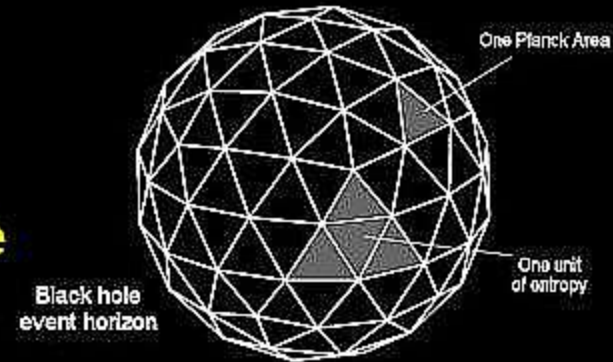
Futuro

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



Entropia dell'Universo al tempo t

Entropia di Beckenstein - Hawking

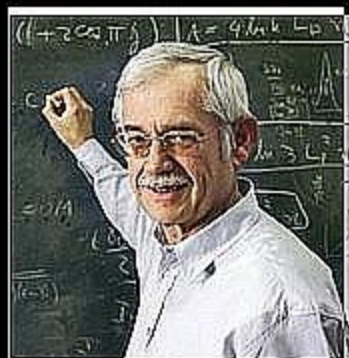


Hawking

$$S_u(t) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_B \cdot c^3}{h \cdot G} \cdot A(t)$$

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

Essa sarà proporzionale all'area del suo involucro (orizzonte cosmologico) al tempo t



Beckenstein

$$S_u(t) = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{k_B \cdot c^3}{h \cdot G} \cdot R(t)^2$$

h = costante di Plank

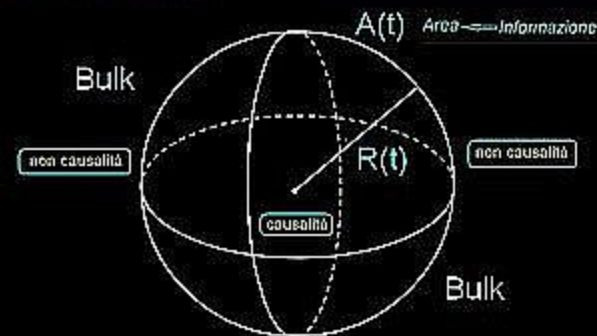
G = costante di gravitazione universale

k_B = costante di Boltzmann

c = velocità della luce nel vuoto

Universo (k=1)

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



R(t) = 13,7 miliardi di AL

...il trascorrere del tempo.

$$(t - t_0) = \frac{3.17 \times 10^8}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot G}{2 \cdot k_B \cdot c^5}} \cdot \frac{1}{\sqrt{S_u(t)}} \cdot \left[S_u(t) - S_u(t_0) \right] \quad (\text{anni})$$

ma anche:

$$(t - t_0) = 3.17 \times 10^8 \cdot \left[R(t) - R(t_0) \right] \quad (\text{anni})$$

dove:

$S_u(t)$ = Entropia dell'Universo al tempo t

$S_u(t_0)$ = Entropia dell'Universo al tempo t_0

$R(t)$ = Raggio dell'Universo visibile al tempo t (anni luce)

$R(t_0)$ = Raggio dell'Universo visibile al tempo t_0 (anni luce)

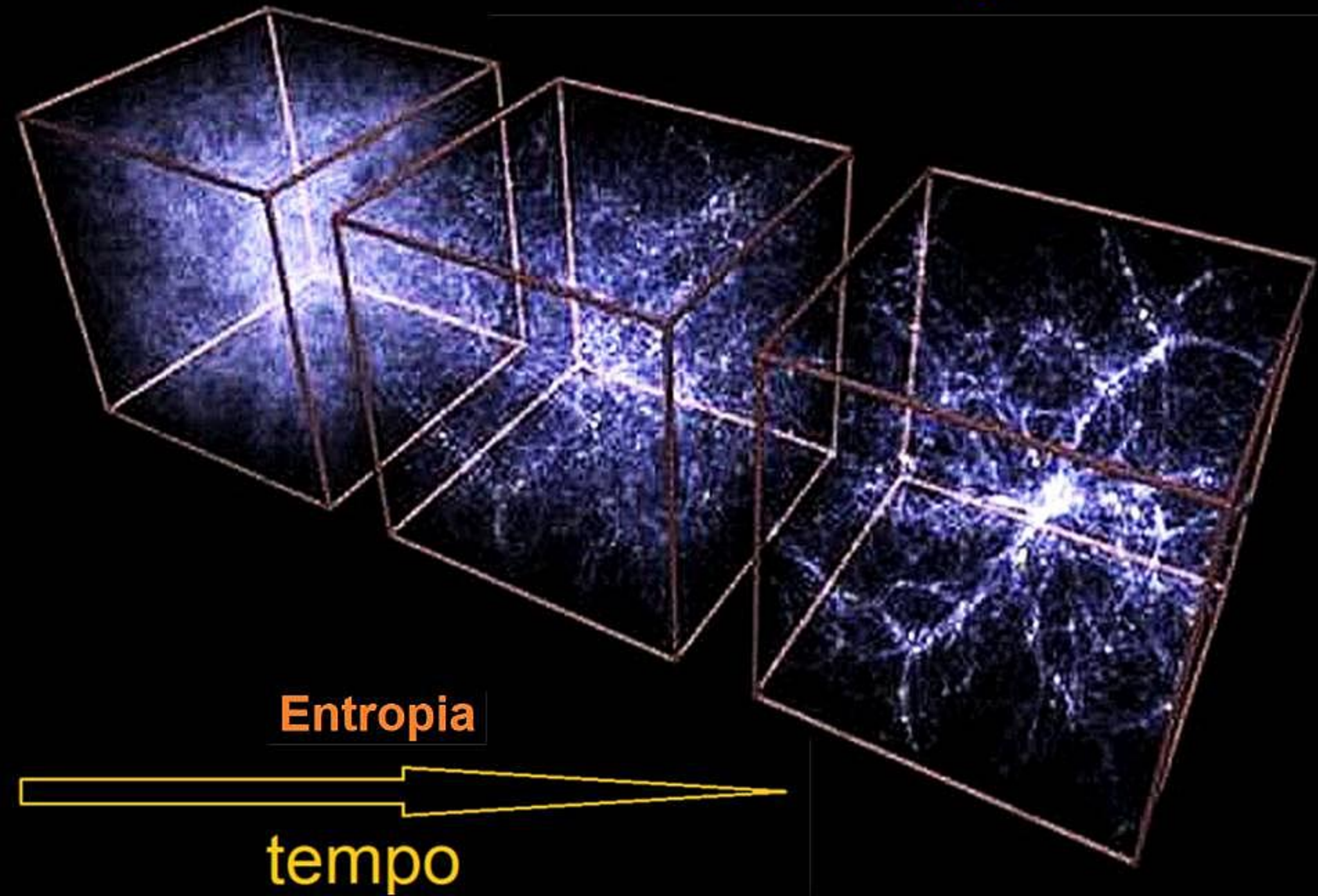
h = costante di Plank $6.626\,070\,040(81) \times 10^{-34} \text{ J s}$

G = costante di gravitazione universale $6.674\,08(31) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

k_B = costante di Boltzmann $1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

c = velocità della luce nel vuoto $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$

Effetti 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

sembrerebbe di no...

- 3) L'Universo è sostanzialmente a 2 dimensioni le quali creano l'effetto tridimensionale a noi percepibile agendo sull'informazione localmente presente in ogni punto di esso.
- 4) Ogni punto locale dell'Universo contiene l'informazione completa relativa al tutto l'Universo nel suo insieme.

Questo spiega bene l'Entanglement

- 5) Ogni istante temporale nell'Universo contiene tutta l'informazione relativa agli altri istanti passati, presenti e futuri di esso, quindi l'informazione sul presente è una combinazione non lineare dell'informazione relativa al passato e di quella relativa al futuro.



Grazie per
l'attenzione!