



Università della Terza Età "Cardinale Giovanni Colombo" – Milano

A.A. 2023 - 2024

Corso di Astrofisica

Docente : **Adriano Gaspani**

Lezione 18

# Entropia e Informazione

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

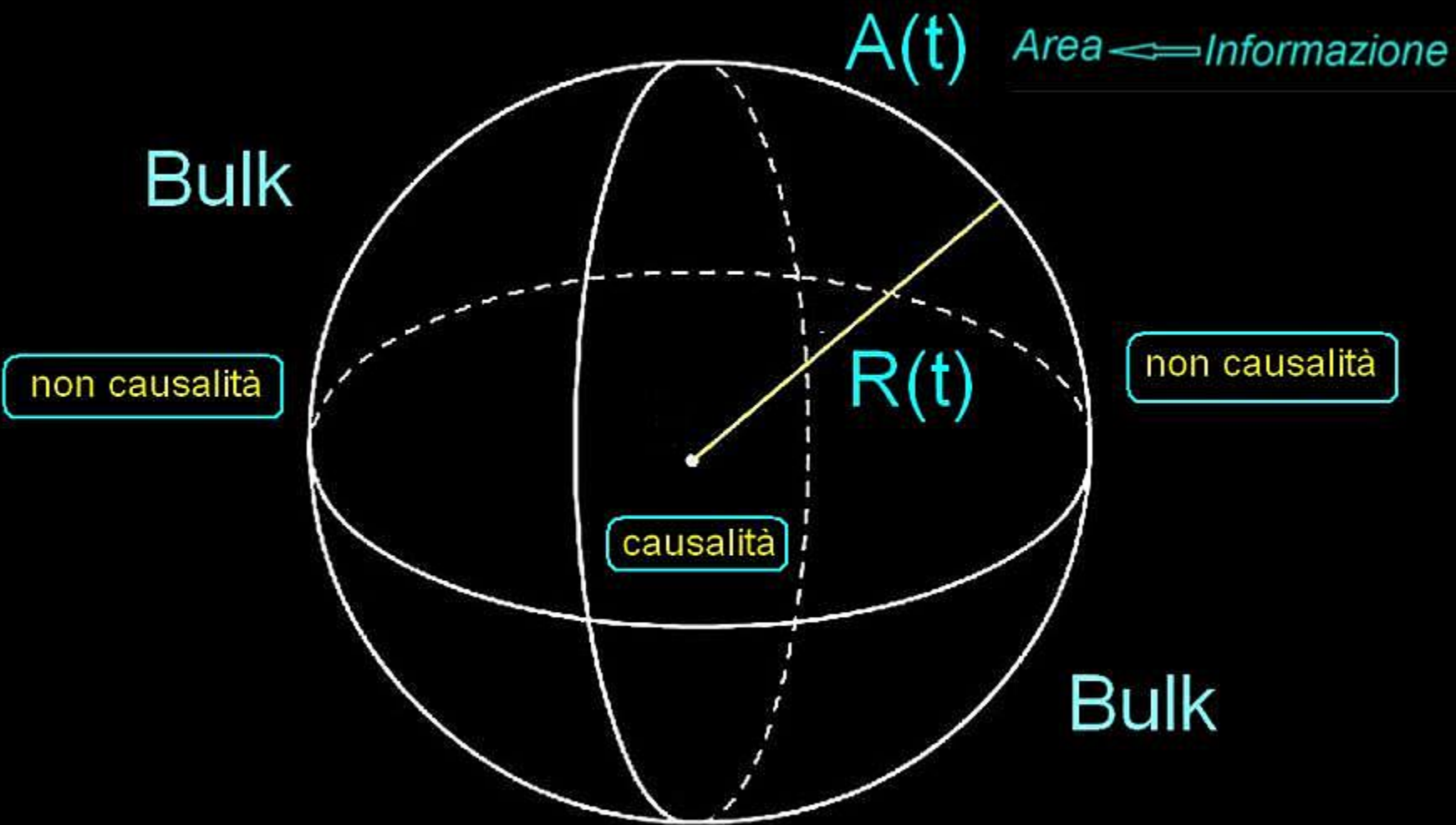


**La totalità dell'Universo osservabile**  
**Estensione: 93,2 miliardi di anni luce**

Questo orizzonte corrisponde quindi alla distanza massima con cui si può più avere *contatto causale*.

**...cioè si può osservare e misurare**

# Universo ( $k=1$ )



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

Cioè non esisterà mai la possibilità di osservare o scambiare alcun segnale o informazione generato d'ora in avanti con regioni oltre l'orizzonte, cioè in pratica *escono* dalla realtà dell'osservatore e quindi, di fatto, "al di fuori" del "suo Universo".

# I Principio della Termodinamica

*“Nulla si crea, nulla si distrugge e tutto si trasforma”*

- In qualsiasi sistema chiuso (e nell'Universo) la quantità di energia è costante.
- Se l'energia si trasforma allora può anche essere recuperata all'infinito in una sorta di moto perpetuo.

# Il principio della Termodinamica

- È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di trasferire calore da un corpo più freddo a uno più caldo (*Clausius*)
- È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato preveda che tutto il calore assorbito da una sorgente omogenea sia interamente trasformato in lavoro (*Kelvin*)

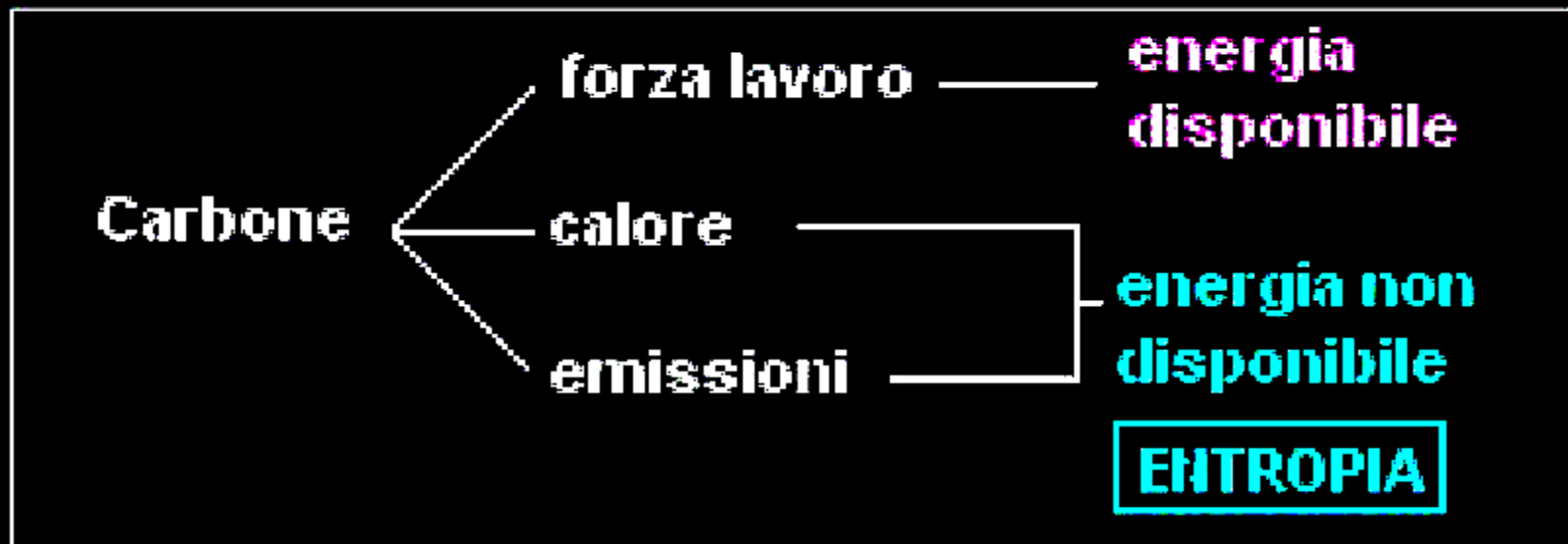
## Un'altra formulazione...

Ogni volta che una certa quantità di energia viene convertita da uno stato ad un altro si ha una **penalizzazione** che consiste nella **degradazione di una parte dell'energia stessa in forma di calore**, in particolare questa parte non sarà **più utilizzabile per produrre lavoro**.



# Un esempio pratico

Durante la combustione un tizzone di carbone ardente rilascia calore ed emissioni di carbonio. Una parte del calore viene convertito in lavoro mentre un'altra parte del calore viene dispersa nell'ambiente senza essere più recuperabile.



## Processi spontanei ed entropia

Un **processo spontaneo** è un processo fisico o chimico che ha luogo senza interventi esterni.

Alcuni esempi di processi spontanei sono:

- Caduta verso il basso di un corpo
- Passaggio di calore da un corpo caldo ad uno freddo
- Mescolamento di due gas
- Svolgimento di una reazione fortemente esotermica

Nella direzione opposta tali processi non sono spontanei.

La tendenza naturale di sistemi meccanici semplici è di andare verso una diminuzione di energia: è questa diminuzione che definisce il verso del processo spontaneo.

Ad esempio, un oggetto di massa  $m$  cade SPONTANEAMENTE verso il basso perché dalla quota  $h$  al pavimento diminuisce la sua energia potenziale della quantità  $mgh$ .

Il verso spontaneo del processo è quindi la caduta e non la risalita.

Ma la spontaneità di una reazione (o in generale di un processo complesso) non è determinata univocamente dalla variazione di energia (o entalpia) ma richiede una nuova grandezza nota come

# Entropia

# Definizione

L'**entropia** è una funzione di stato che misura il disordine di un sistema fisico o più in generale dell'Universo.

Il nome viene dal greco dal greco  $\epsilon\nu$  (dentro), e da  $\tau\rho\omicron\tau\eta$  (cambiamento, punto di svolta, rivolgimento) e fu scelto per assonanza con quello di **energia**, a cui è strettamente connessa (infatti significa "dove va a finire l'energia fornita ad un sistema").

# Cenni storici

- La prima intuizione moderna viene fatta risalire a Sadi Carnot, un ufficiale dell'esercito francese, che nel 1824 osservò che in un sistema chiuso, senza scambi con l'esterno, il calore passa spontaneamente da una sorgente più calda ad una più fredda → le trasformazioni avvengono invariabilmente in una sola direzione, ovvero quella verso il maggior disordine.
- Il termine fu introdotto da Rudolf Clausius nel "Trattato sulla teoria meccanica del calore", pubblicato nel 1864, per spiegare la tendenza di un sistema chiuso ad evolvere verso uno stato di equilibrio termico → si riferiva al legame tra movimento interno (al corpo o al sistema) ed energia interna o calore, ipotizzando che il calore dovesse riferirsi al movimento di particelle meccaniche interne al corpo → definiva l'entropia come il rapporto tra la somma dei piccoli incrementi (infinitesimi) di calore, divisa per la temperatura assoluta durante l'assorbimento del calore.

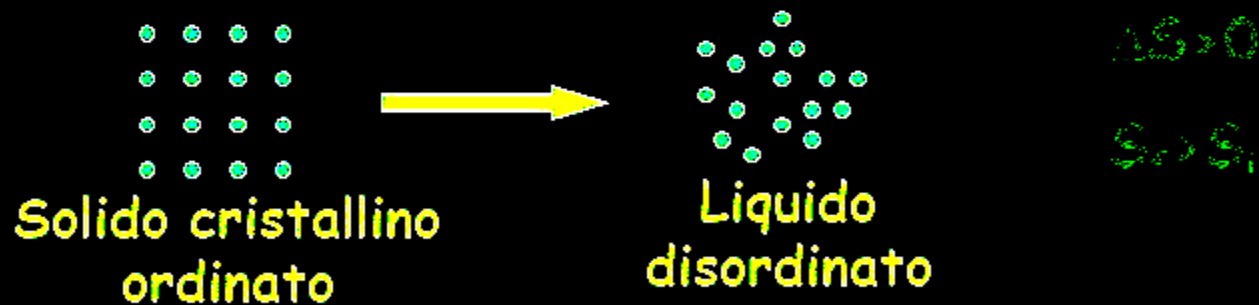
## Entropia e II° principio della termodinamica

L'entropia  $S$  è una grandezza termodinamica che misura il grado di disordine (o della casualità) di un sistema.

Tale grandezza è una funzione di stato per cui per un dato processo è possibile definire univocamente una variazione di entropia

$$\Delta S = S_f - S_i$$

La variazione di entropia per alcuni processi è qualitativamente intuitiva: ad esempio per un processo di fusione si deve avere  $\Delta S > 0$  poiché il grado di disordine aumenta



Ad esempio per la fusione di 1 mole di  $H_2O$  si ha  $\Delta S = 22 \text{ J/K}$   
Le unità dell'entropia sono  $\text{joule}/^\circ\text{K}$

Da tutte le osservazioni sperimentali su sistemi complessi si deduce che un processo avviene naturalmente come risultato di un aumento complessivo del disordine del sistema: in altre parole vi è una tendenza naturale dei sistemi a mescolarsi e deteriorarsi o, in generale, a dare un aumento del disordine.

Questo concetto è espresso in modo più preciso dal **secondo principio della termodinamica**

**"per un processo spontaneo l'entropia totale di un sistema e del suo ambiente (cioè dell'universo) aumenta"**

**Si noti la differenza con il primo principio: l'energia totale rimane costante, mentre l'entropia totale aumenta.**

È più utile esprimere il secondo principio in modo da riferirsi alle proprietà del sistema considerato più che a quelle di tutto l'universo. A tale scopo prendiamo in esame un sistema in cui ha luogo un dato processo e consideriamo lo scambio di calore tra esso e l'ambiente

# L'entropia e i principi della Termodinamica

Assumendo che l'Universo sia un sistema isolato - ovvero un sistema per il quale è impossibile scambiare materia ed energia con l'esterno - il primo ed il secondo principio della termodinamica possono essere riassunti da un'unica frase:

***“L'energia totale dell'Universo è costante e l'entropia totale è in continuo aumento”***



## Quindi...

...Fino a quando esiste una differenza di energia all'interno del sistema chiuso è anche disponibile energia per compiere lavoro. Nel momento in cui la temperatura diventa costante in ogni parte del sistema cessa ogni spostamento ed ha luogo uno stato di equilibrio perenne di **morte termica**, ossia la **massima entropia**.

# Entropia

- L'entropia è una grandezza fisica legata al disordine di un sistema.
- Un mucchio di mattoni ha più entropia di un muro costruito con essi.
- L'acqua in un bicchiere ha più entropia del ghiaccio dal quale si è sciolta.

# L'entropia è una funzione di stato

Quindi l'entropia è una funzione di stato perché dipende solo dagli stati iniziali e finali e non dal modo in cui si passa da uno stato all'altro.

Per calcolare  $S(B) - S(A)$  è sufficiente:

- scegliere una qualunque trasformazione reversibile che faccia passare il sistema dallo stato A allo stato B

$$S(X) = \text{Entropia del sistema allo stato } X$$

# L'entropia dell'Universo

Per quanto visto finora:

ogni trasformazione che avviene in un sistema isolato provoca una variazione di entropia

$\Delta S \geq 0$  (*= 0 se e solo se la trasformazione è reversibile*);

- l'Universo è tutto ciò che esiste: non c'è un ambiente “esterno” con cui scambiare energia;
- in esso avvengono continuamente trasformazioni irreversibili, quindi *l'entropia dell'Universo è in aumento incessante*.

## Il quarto enunciato del secondo principio

- Un sistema isolato parte da uno stato iniziale  $A$  e viene lasciato libero di evolvere nel tempo.
- L'energia totale del sistema si conserva; (per il 1° princ.)

*...e l'entropia?*

*L'evoluzione spontanea di un sistema isolato giunge ad uno stato di equilibrio a cui corrisponde il massimo aumento dell'entropia*

(compatibilmente con il primo principio della termodinamica).

## **Il quarto enunciato del secondo principio**

Es: Il passaggio spontaneo del calore dal corpo più caldo al corpo più freddo è il risultato del principio generale di aumento dell'entropia dell'Universo.

I fenomeni naturali hanno un verso privilegiato (freccia del tempo)

**Lo scorrere del tempo è la nostra percezione dell'aumento di Entropia dell'Universo**

# ...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)

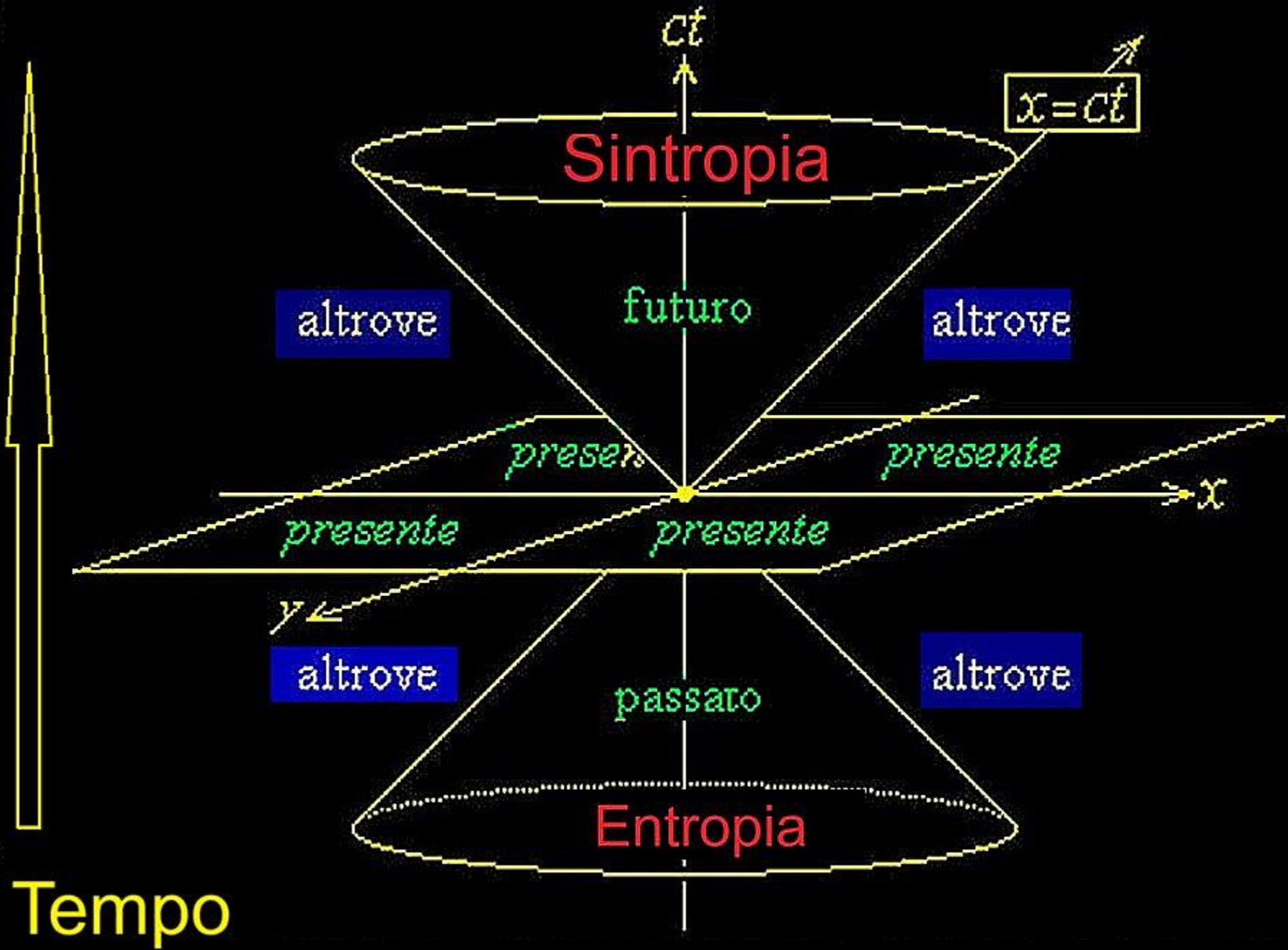
$R(t_0)$  = Raggio dell'Universo visibile al tempo  $t_0$  (anni luce)

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

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

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

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





*Come si concilia la seconda legge  
con lo stato disomogeneo attuale  
dell'Universo?*

# Impossibilità o improbabilità?

*Il secondo principio è in accordo con l'esperienza perché i fenomeni che lo violano sono così improbabili da non avvenire mai.*

- *Nessuna legge fisica vieta l'evoluzione spontanea verso uno stato più ordinato, ad es. il passaggio spontaneo di calore dal corpo più freddo a quello più caldo) ma è un fenomeno così improbabile che in pratica non avviene mai*

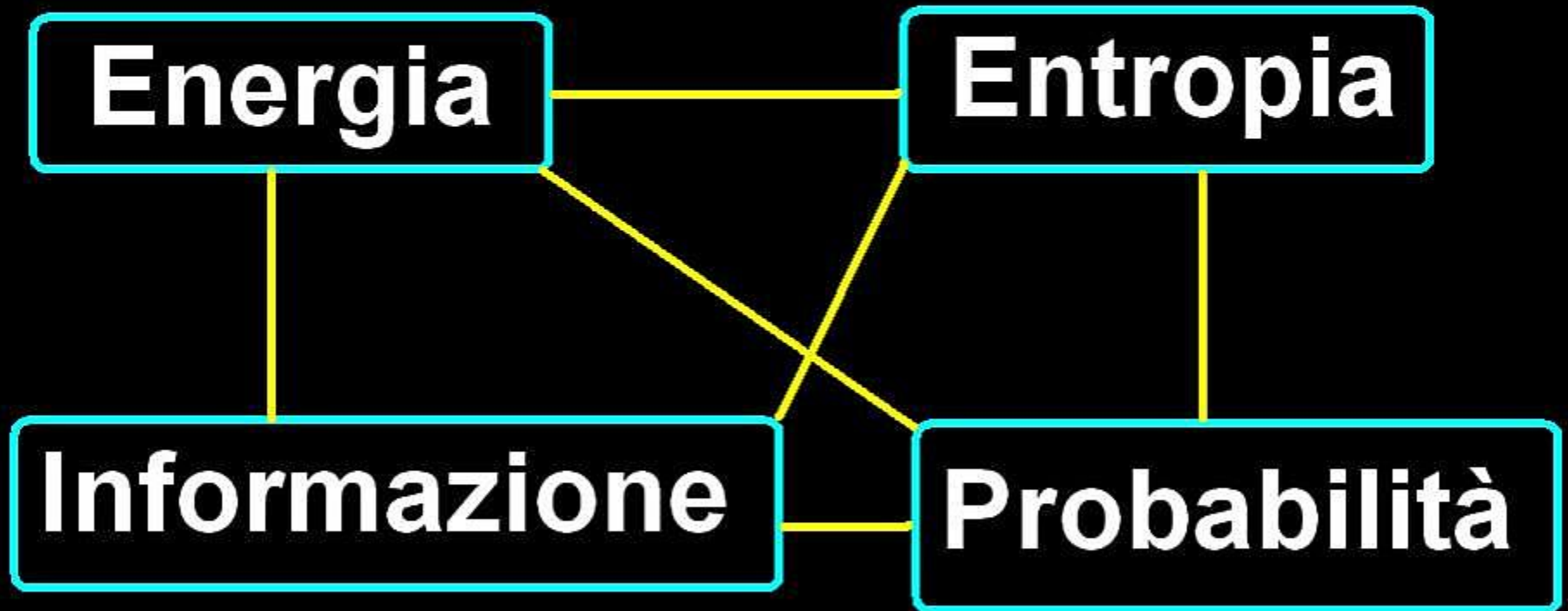
# I sistemi viventi.

- L'evoluzione delle specie viventi verso forme sempre più complesse induce a ritenere che esistano sistemi che producono ordine crescente (es: evoluzione di un embrione ) e quindi violino il secondo principio (*IV enunciato*)
- Ma questi sistemi non sono isolati: gli organismi cedono continuamente calore all'atmosfera come prodotto del loro metabolismo, aumentandone l'entropia

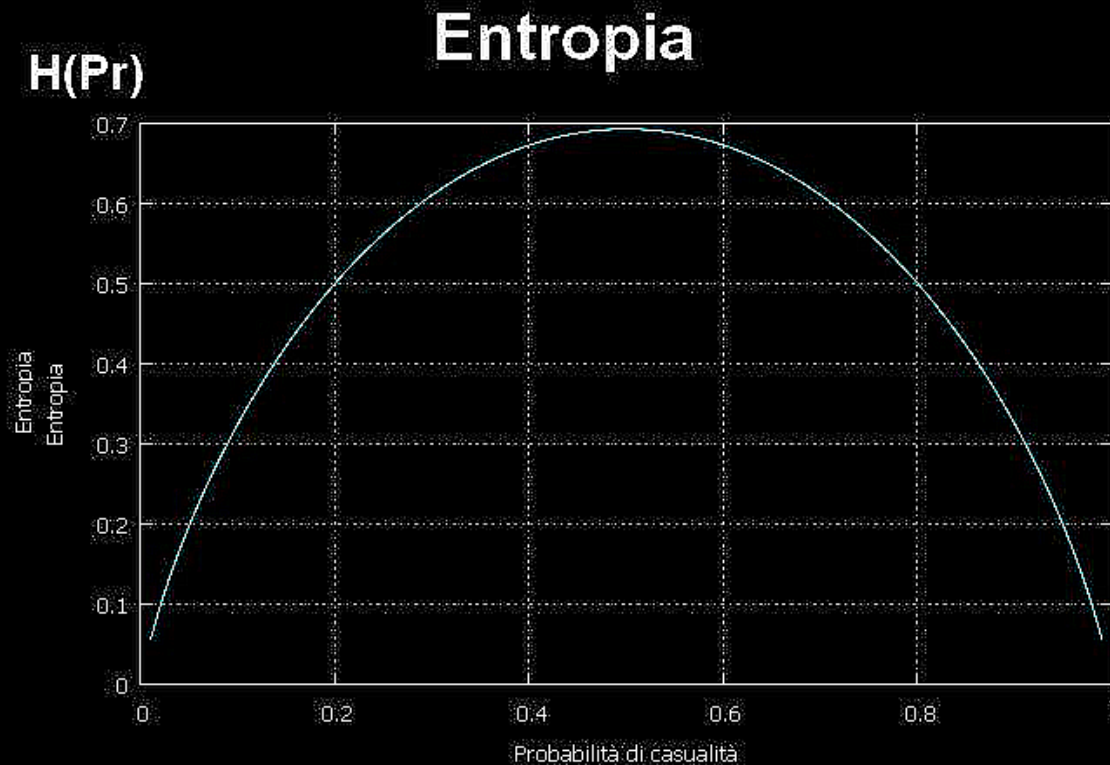
# Il terzo principio della termodinamica

- Negli ultimi due secoli si sono ottenute in laboratorio temperature sempre più basse
  - nel 2003 sono stati raggiunti sperimentalmente i  $4,5 \times 10^{-10}$  K.
- Tuttavia, più la temperatura di un corpo si avvicina allo zero assoluto, più è difficile raffreddarlo ulteriormente,
- Terzo principio della termodinamica:
- *è impossibile raffreddare un corpo fino allo zero assoluto mediante un numero finito di trasformazioni. (Legge di Nerst)*

# Corrispondenze



# Sistema a due stati con probabilità di casualità Pr

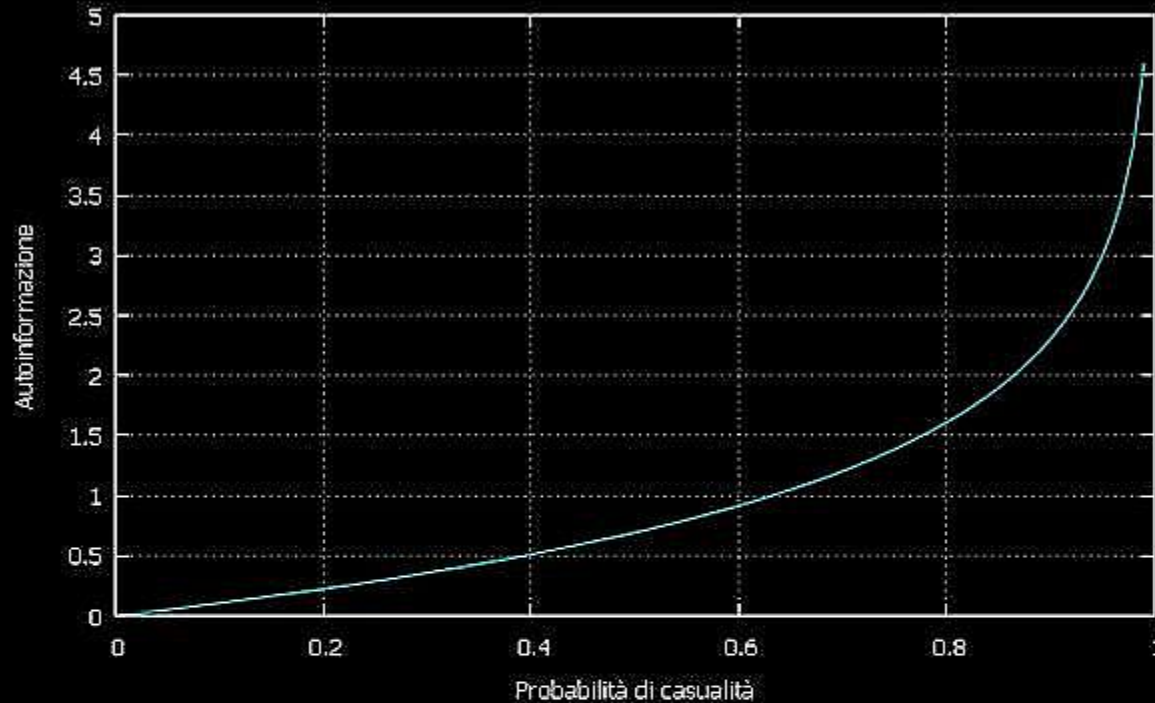


$$H(Pr) = - \left[ (1-Pr) \cdot \ln(1-Pr) + Pr \cdot \ln(Pr) \right]$$

Pr = probabilità di casualità

$\text{Im}(\text{Pr})$

Autoinformazione

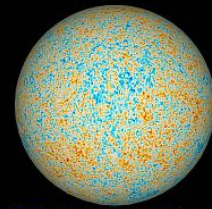


$$\text{Im}(\text{Pr}) = -\ln(1-\text{Pr})$$

$\text{Pr}$  = probabilità di casualità

Sistema a due stati con probabilità di casualità  $\text{Pr}$

# Evoluzione dell'Universo:



CMB flux (Cosmic Microwaves Background) anisotropia termica

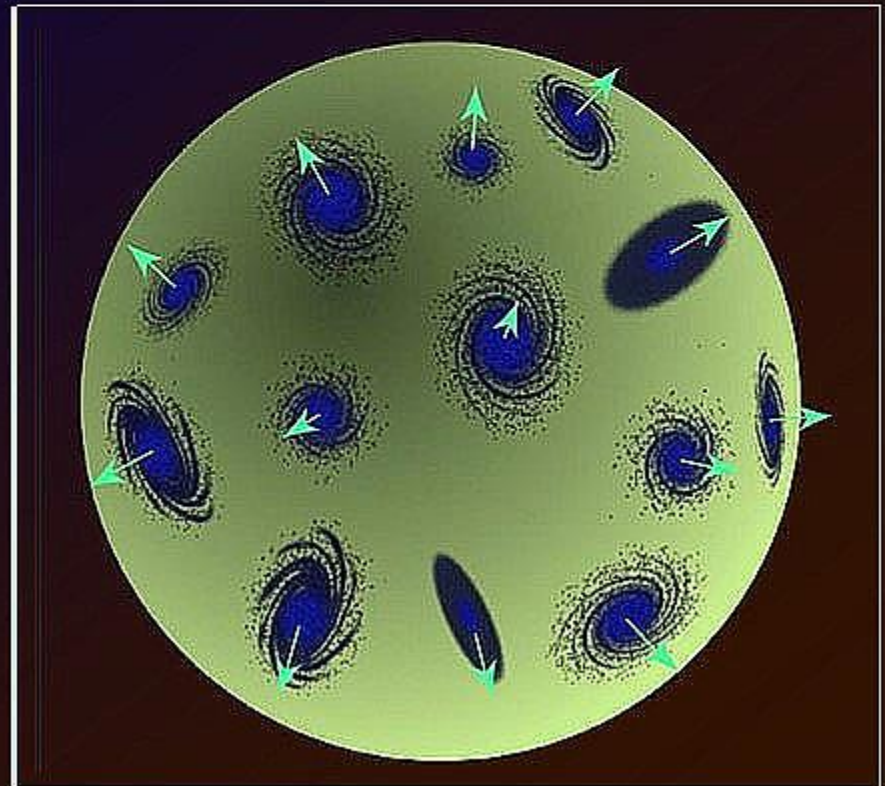
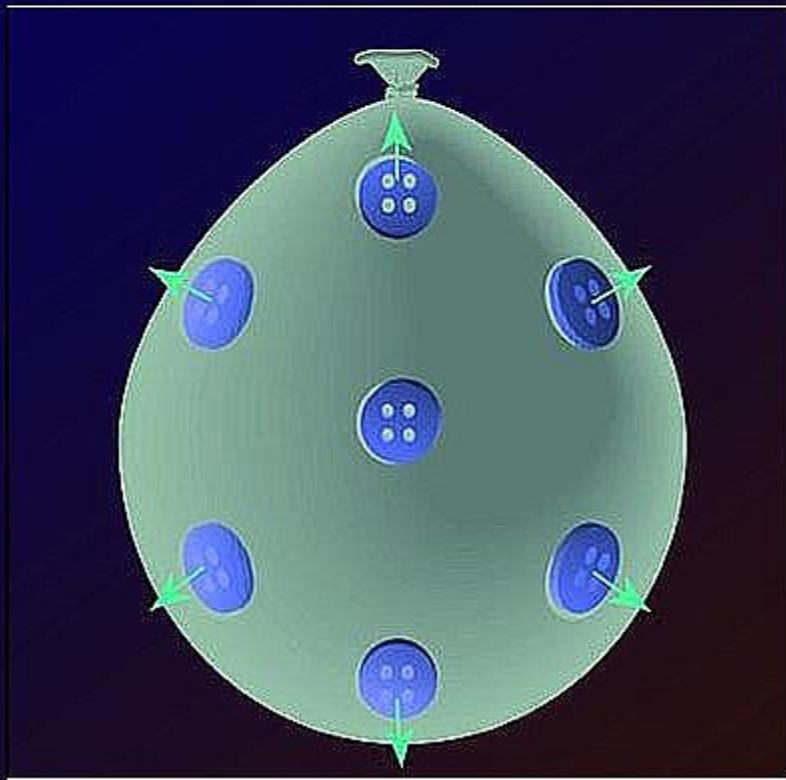
Componente che domina la dinamica dell'Universo

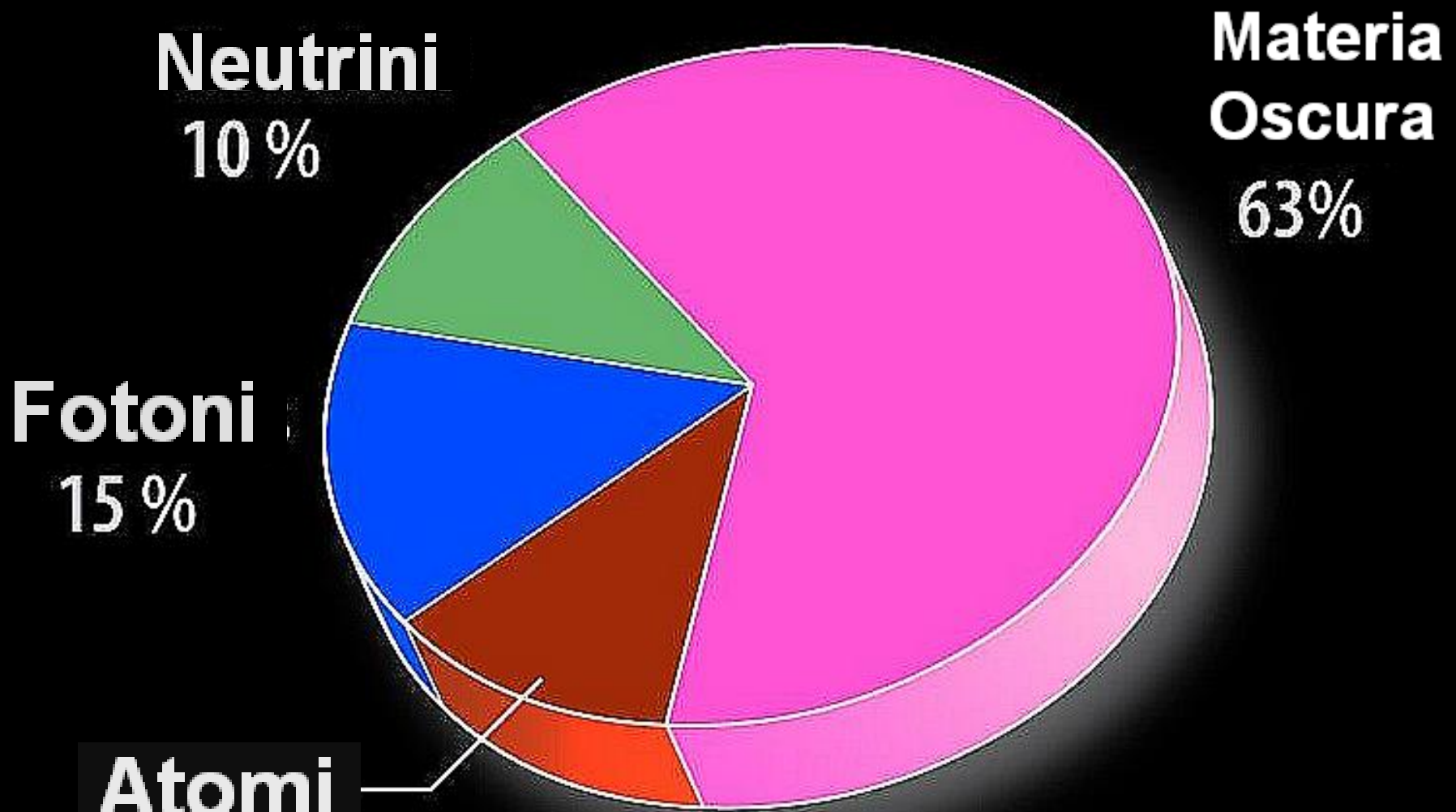




## L'Universo in espansione

- Il nostro universo è una superficie a 3 dimensioni, "immerso" in uno spazio a 4 dimensioni.
- Si sta espandendo come un palloncino
- Tutte le galassie si stanno allontanando tra di loro



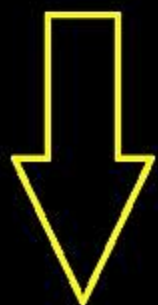


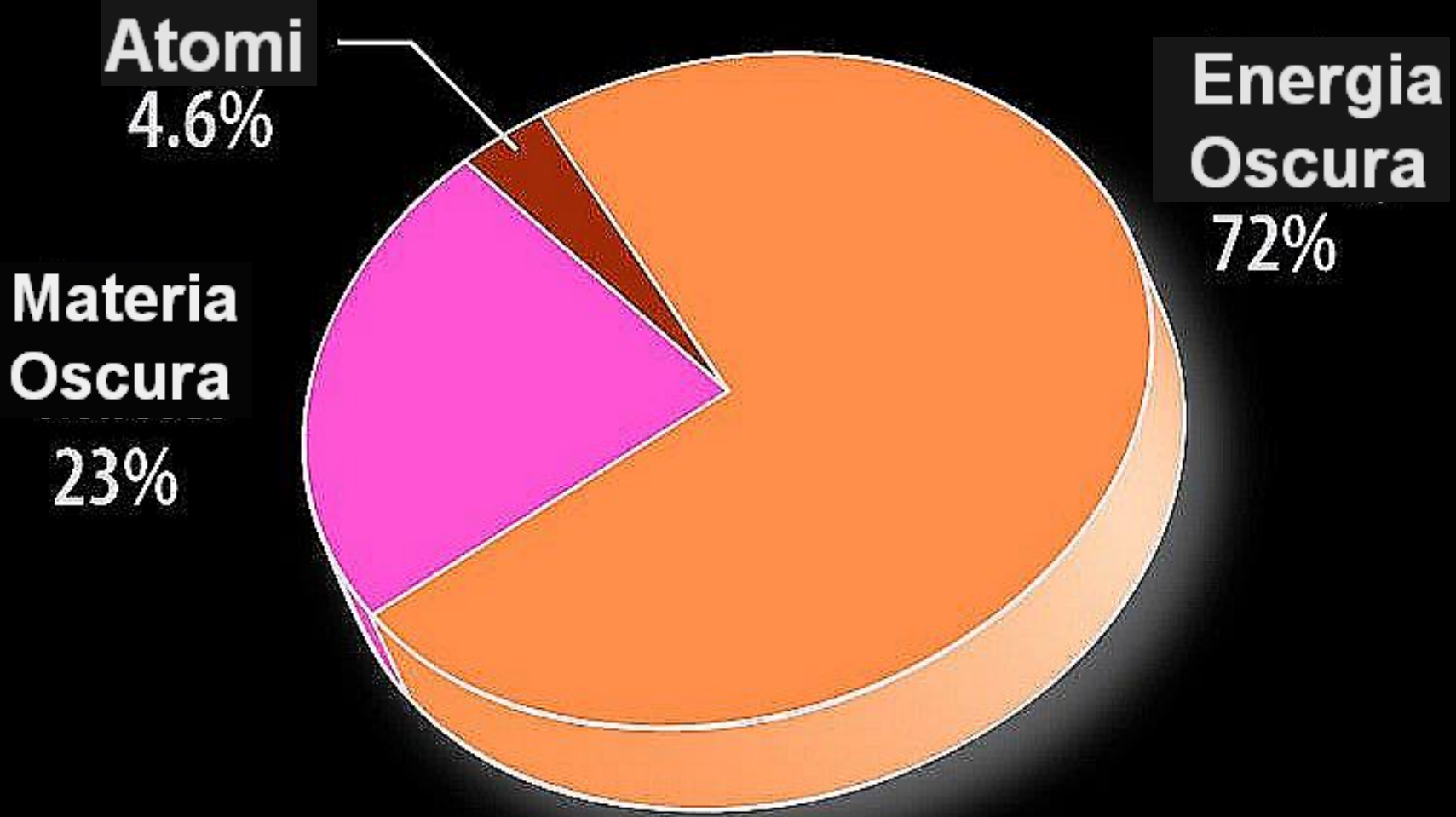
**13,7 Miliardi di anni fa**

**(età dell'Universo: 380.000 anni)**



**Un aumento di Entropia  
verificatosi negli ultimi  
13.72 miliardi di anni...**





Oggi

## L'Energia del Vuoto (= Energia Oscura)

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

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

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

$\hbar$  = Costante di Plank ridotta

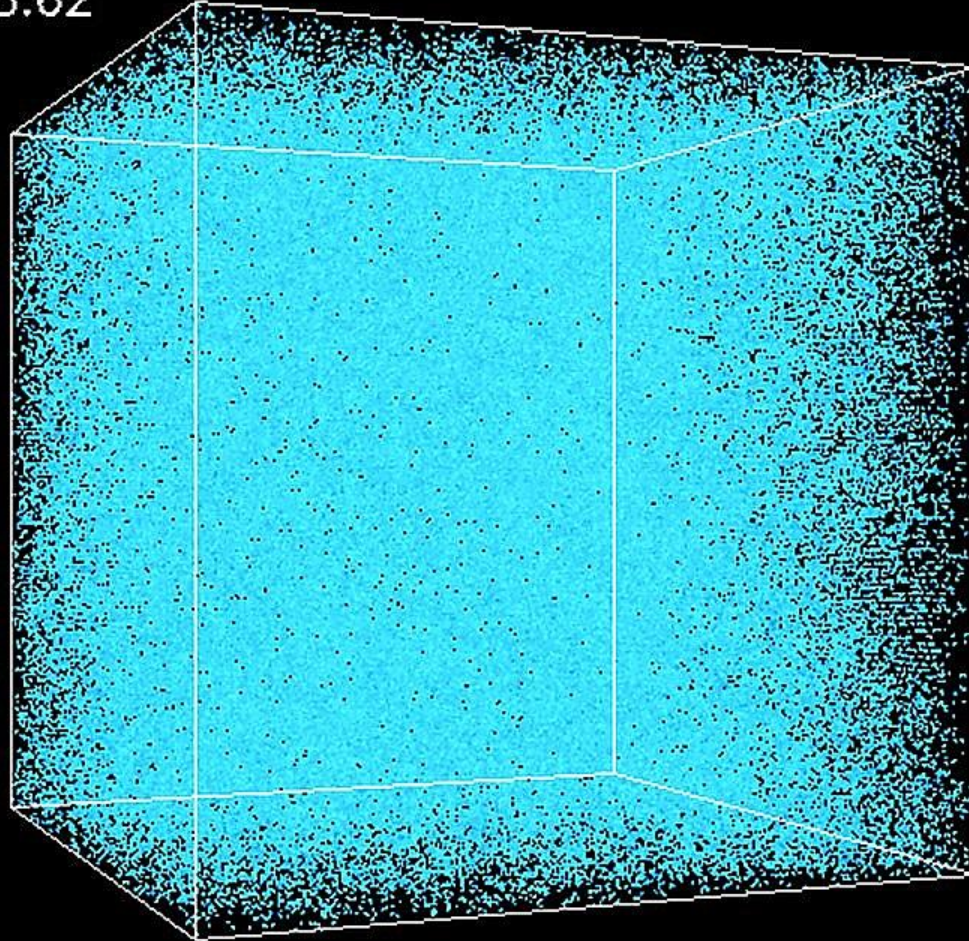
$c$  = Velocità della Luce ( $c=300.000 \text{ Km/sec}$ )

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

**Densità dell'Energia Oscura**

$Z=28.62$

$t = 13.7 / (1+z)^2$  Gy  
dopo il Big Bang

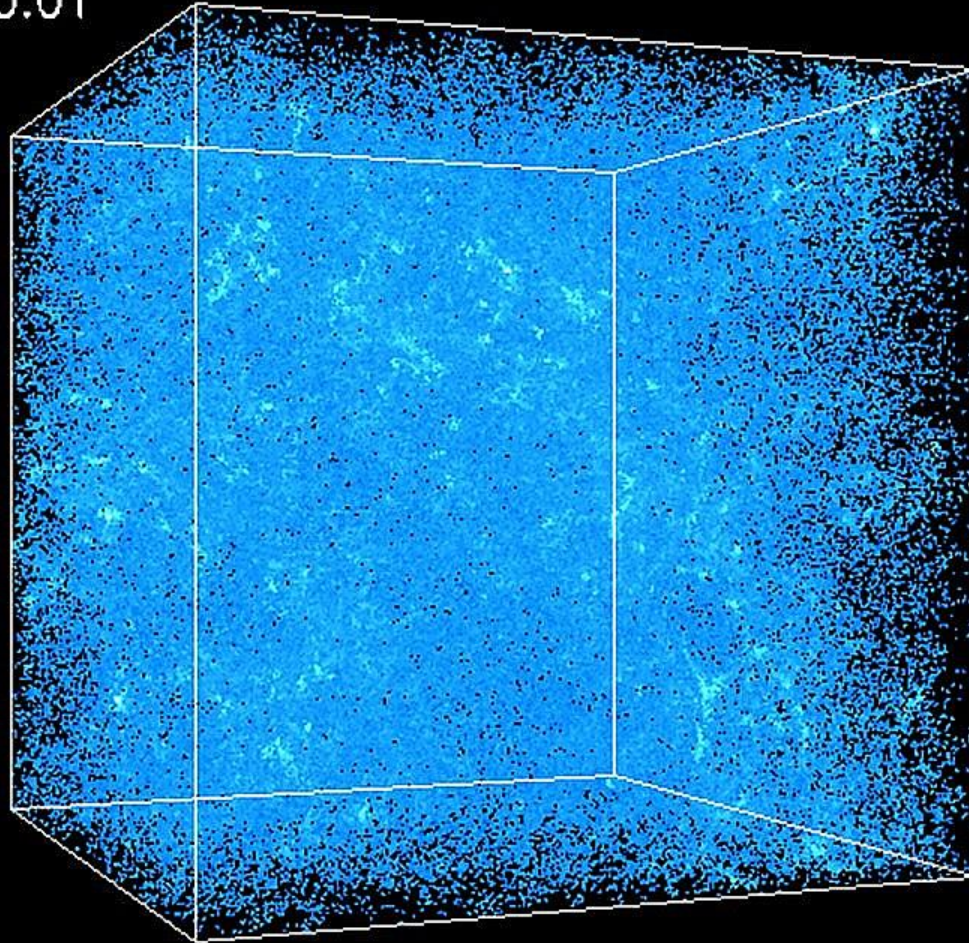


$t = 0.0156$  Gy

1 Gy = 1 miliardo di anni

$Z=10.01$

$t = 13.7 / (1+z)^2$  Gy  
dopo il Big Bang

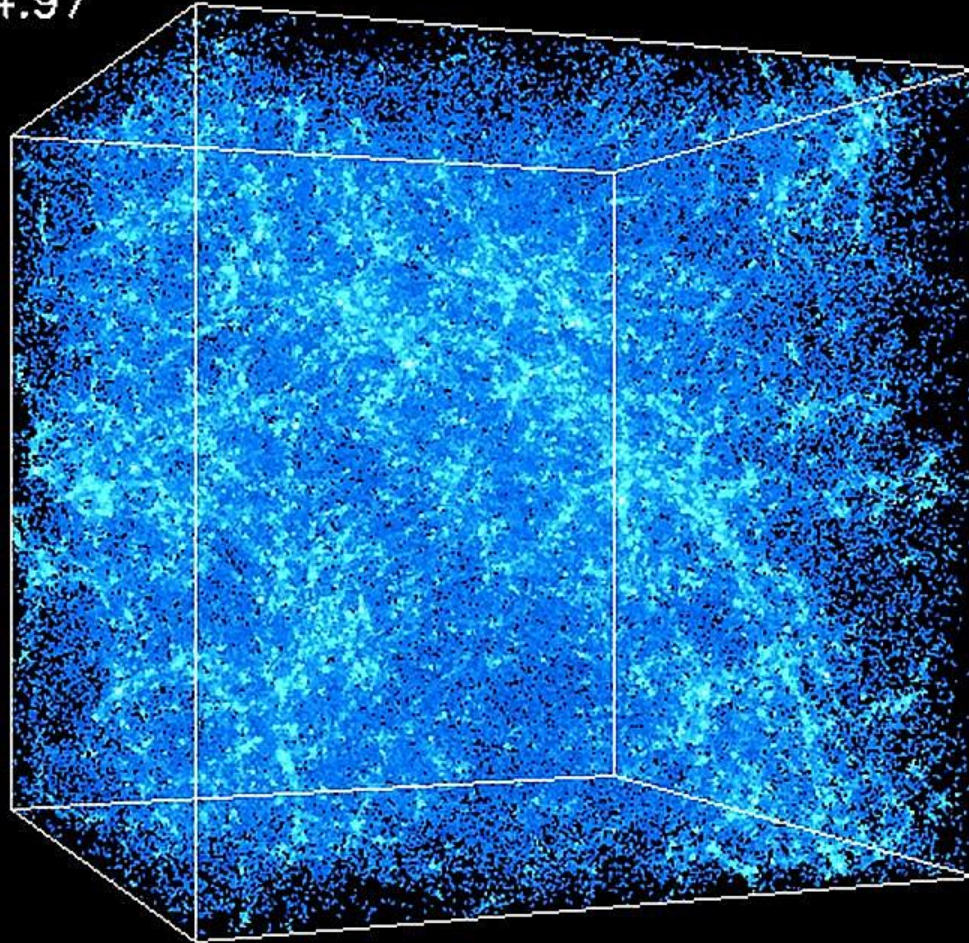


$t = 0.113$  Gy

1 Gy = 1 miliardo di anni

$Z = 4.97$

$t = 13.7 / (1+z)^2$  Gy  
dopo il Big Bang



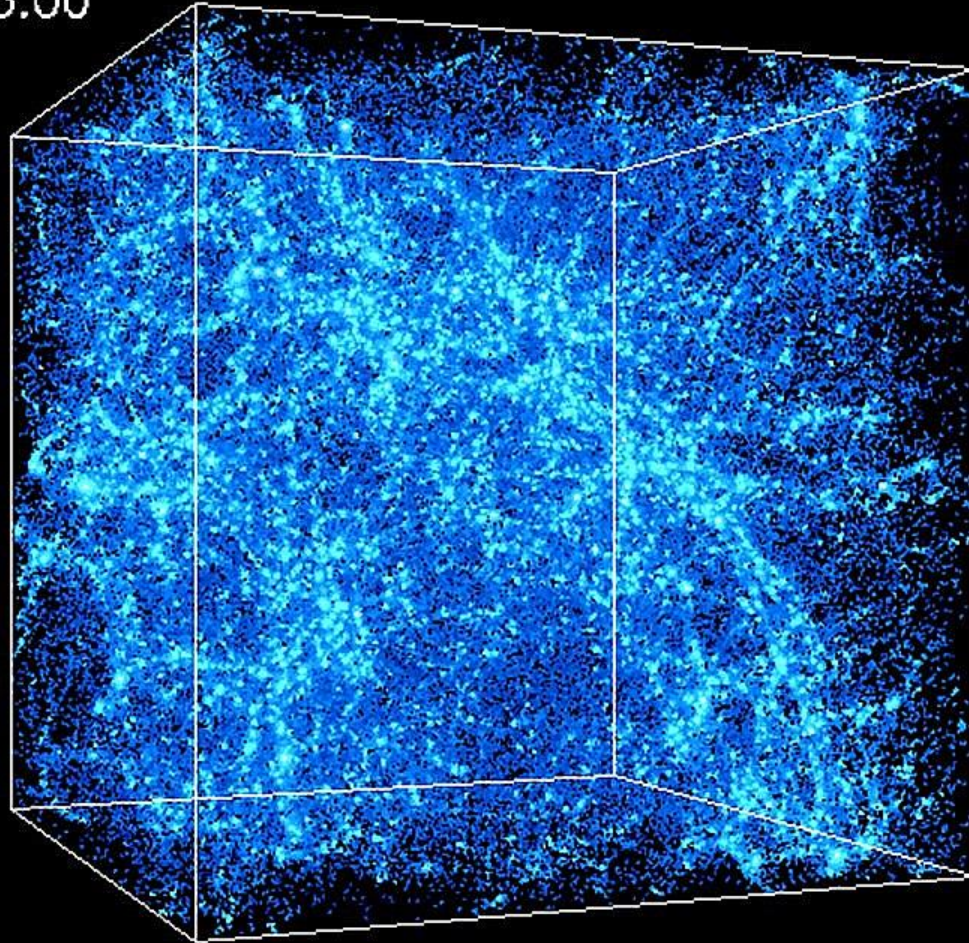
$t = 0.384$  Gy

1 Gy = 1 miliardo di anni



$Z = 3.00$

$t = 13.7 / (1+z)^2$  Gy  
dopo il Big Bang

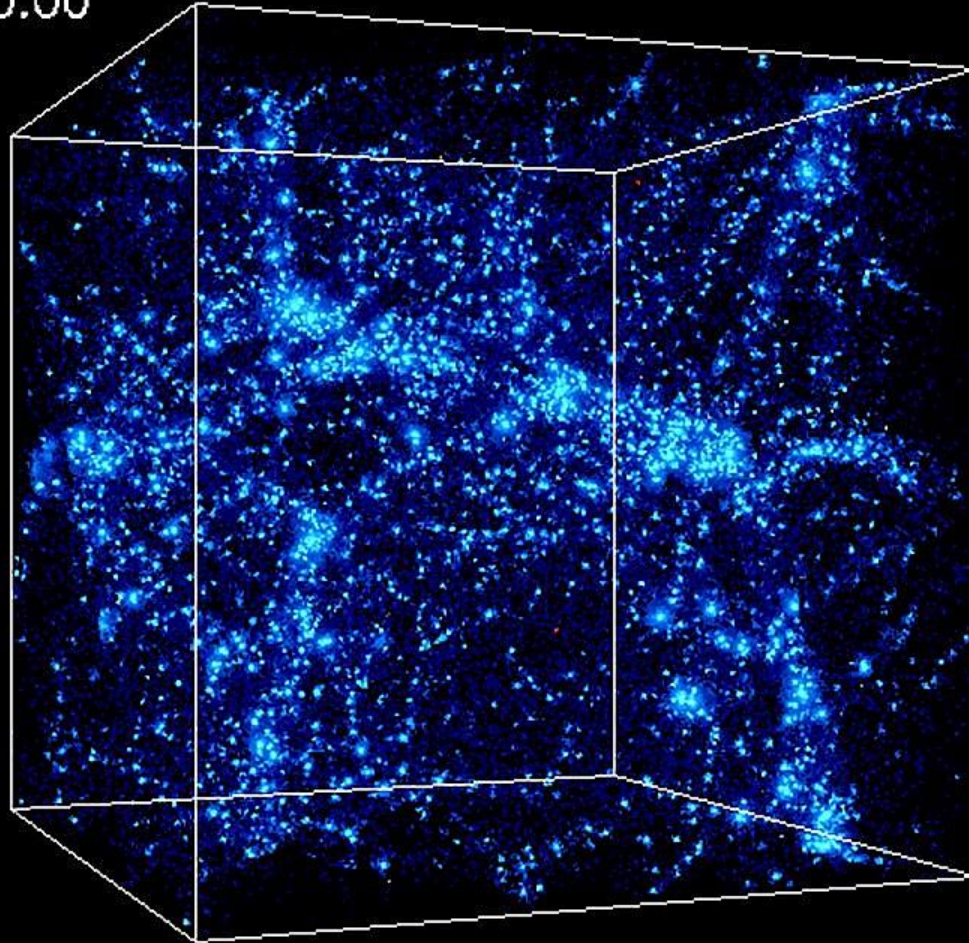


$t = 0.856$  Gy

1 Gy = 1 miliardo di anni

$z = 0.00$

$t = 13.7 / (1+z)^2$  Gy  
dopo il Big Bang



$t = 13.7$  Gy  
oggi...

1 Gy = 1 miliardo di anni

# Aumento di Entropia in funzione del tempo

$$S_u(t) = 2 \times 10^{15} \cdot \pi^2 \cdot \frac{k_B \cdot c^5}{h \cdot G} \cdot t^2$$

dove:

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

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

Il tempo  $t$  è espresso in anni

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

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

$K_B$  = costante di Boltzmann  $1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>

$c$  = velocità della luce nel vuoto 299 792 458 m s<sup>-1</sup>

# Aumento di Entropia in funzione del tempo velocità di variazione

$$\left[ S_u(t) - S_u(t_0) \right] = 4 \times 10^{15} \cdot \pi^2 \cdot \frac{k_B \cdot c^5}{h \cdot G} \cdot (t - t_0)$$

dove:

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

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

Il tempo  $t$  è espresso in anni

$h$  = costante di Plank  $6.626\,070\,040(81) \times 10^{-34}$  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  $1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>

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

## Un'ipotesi: la morte termica dell'Universo.

- Dato che l'evoluzione spontanea dell'universo segue la direzione corrispondente al massimo aumento dell'entropia, nell'universo il calore continuerà a passare da zone più calde (stelle) a zone più fredde (pianeti) finché tutti i corpi raggiungeranno la stessa temperatura.
- Senza differenze di temperatura non si potrà eseguire lavoro e nell'universo non avverrà più nessuna trasformazione

# *La Morte Termica*

*L'entropia dell'universo aumenta sempre, aumentando il disordine.*

*Contemporaneamente diminuisce l'energia "disponibile".*

*Vi sarà un tempo in cui non vi sarà più energia disponibile.*

*La temperatura dell'universo sarà uniforme:*

*Questa è La Morte Termica*

## *Le Molte Morti dell'Universo?*

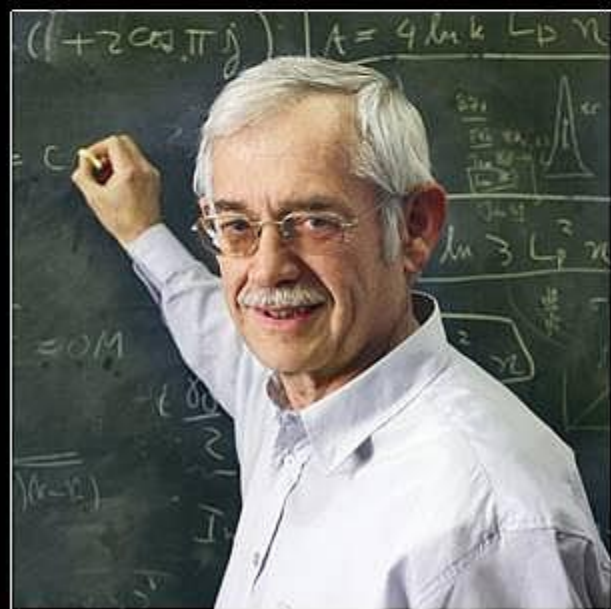
- $10^{12}$  y  $\rightarrow$  *Le stelle cessano di nascere e si trasformano tutte in nane, stelle di neutroni e buchi neri.*
- $10^{14}$  y  $\rightarrow$  *La luminosità finisce: le galassie non esistono più. I protoni decadono. La materia non esiste più.*
- $10^{46}$  -  $10^{100}$  y  $\rightarrow$  *i buchi neri evaporano*
- $10^{100}$  y  $\rightarrow$   $\infty$ : *l'Universo contiene fotoni, neutrini, elettroni e positroni.*

*Arriva la Morte Termica*

# 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)





# Entropia dell'Universo al tempo t

## Entropia di Beckenstein - Hawking

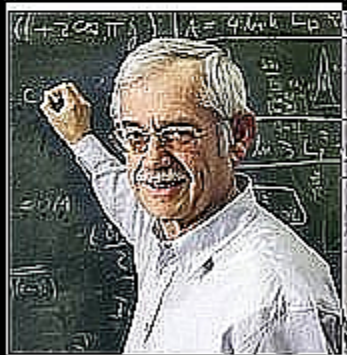


Hawking

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

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

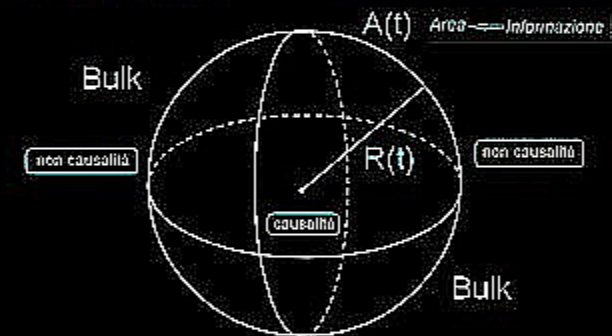
G = costante di gravitazione universale

K<sub>B</sub> = costante di Boltzmann

c = velocità della luce nel vuoto

Universo (k=1)

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



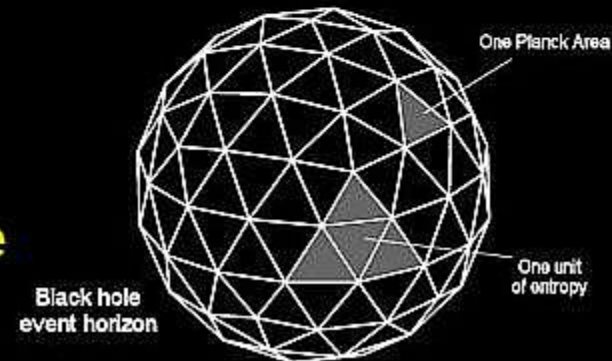
R(t) = 13,7 miliardi di AL

# Entropia di Beckenstein - Hawking

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

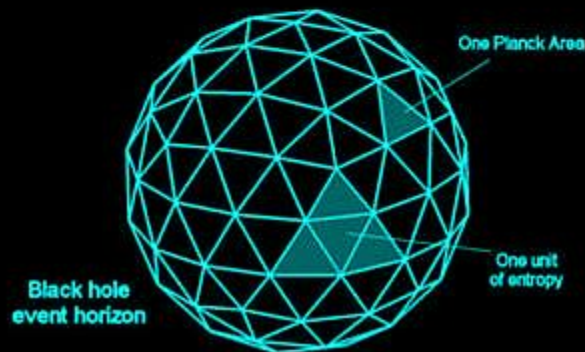


**A** = area dell'orizzonte degli eventi  
**c** = velocità della luce nel vuoto  
**h** = costante di Planck (non ridotta)  
**G** = costante di Gravitazione Universale  
**k** = costante di Boltzmann



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

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



## Unità di Planck: unità fondamentali

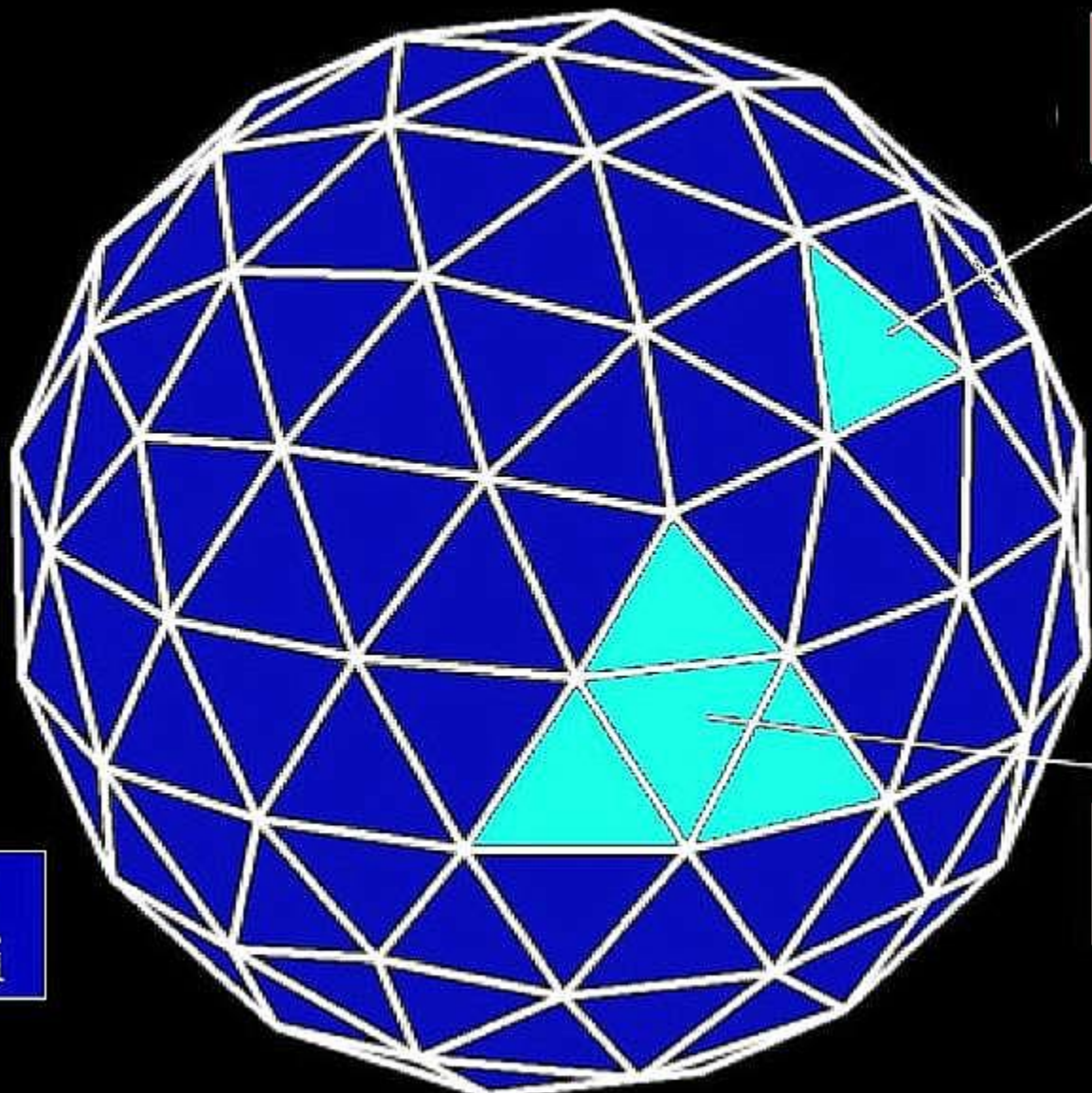
Dimensione	Formula		Valore nel Sistema Internazionale
Lunghezza di Planck	Lunghezza (L)	$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1,616\ 252(81) \times 10^{-35}$ m
Massa di Planck	Massa (M)	$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2,176\ 44(11) \times 10^{-8}$ kg
Tempo di Planck	Tempo (T)	$t_p = \frac{l_p}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5,391\ 24(27) \times 10^{-44}$ s
Temperatura di Planck	Temperatura ( $\Theta$ )	$T_p = \frac{m_p c^2}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}}$	$1,416\ 785(71) \times 10^{32}$ 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:

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

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

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

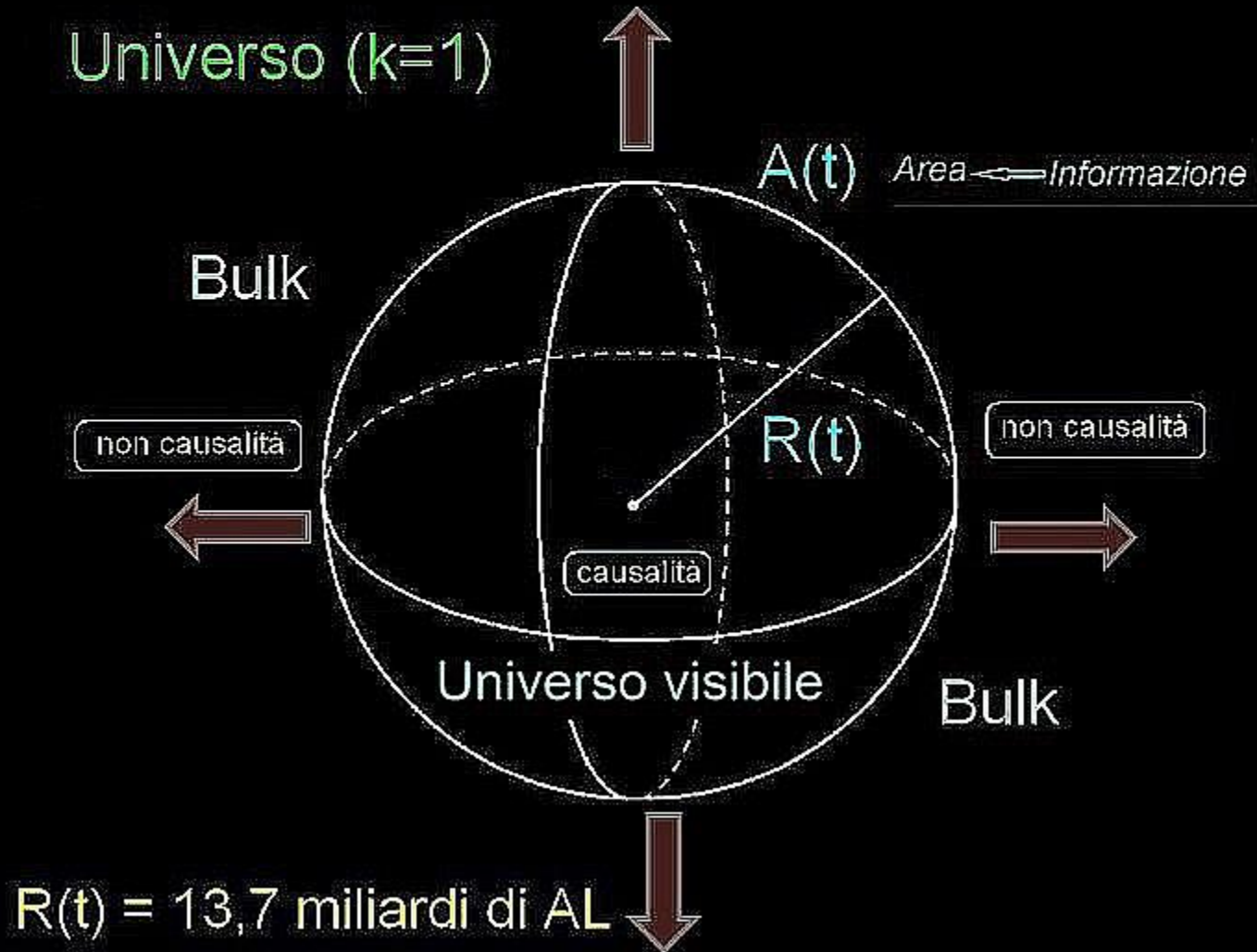


Una unità di Planck

Una unità di entropia

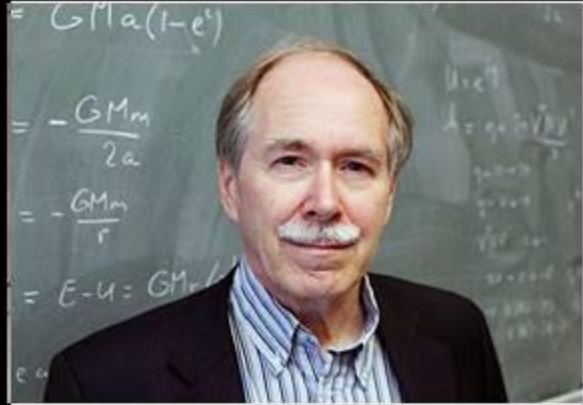
Orizzonte degli eventi

# Il continuo aumento dell'Entropia dell'Universo a causa della sua espansione



**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  $t$**



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"

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

superficie cosmologica



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

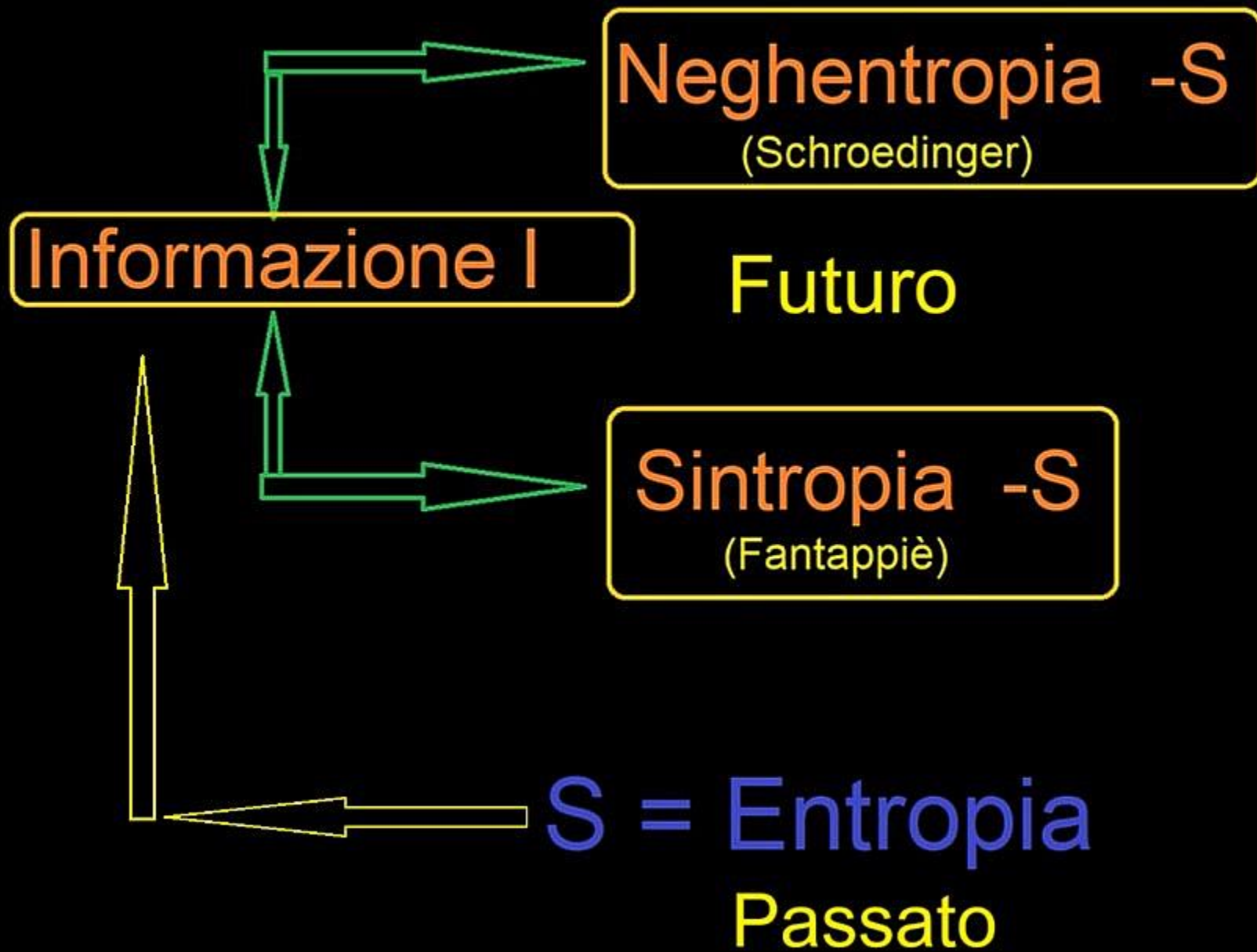
valore massimo

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

Universo  $\Rightarrow$  BH

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

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

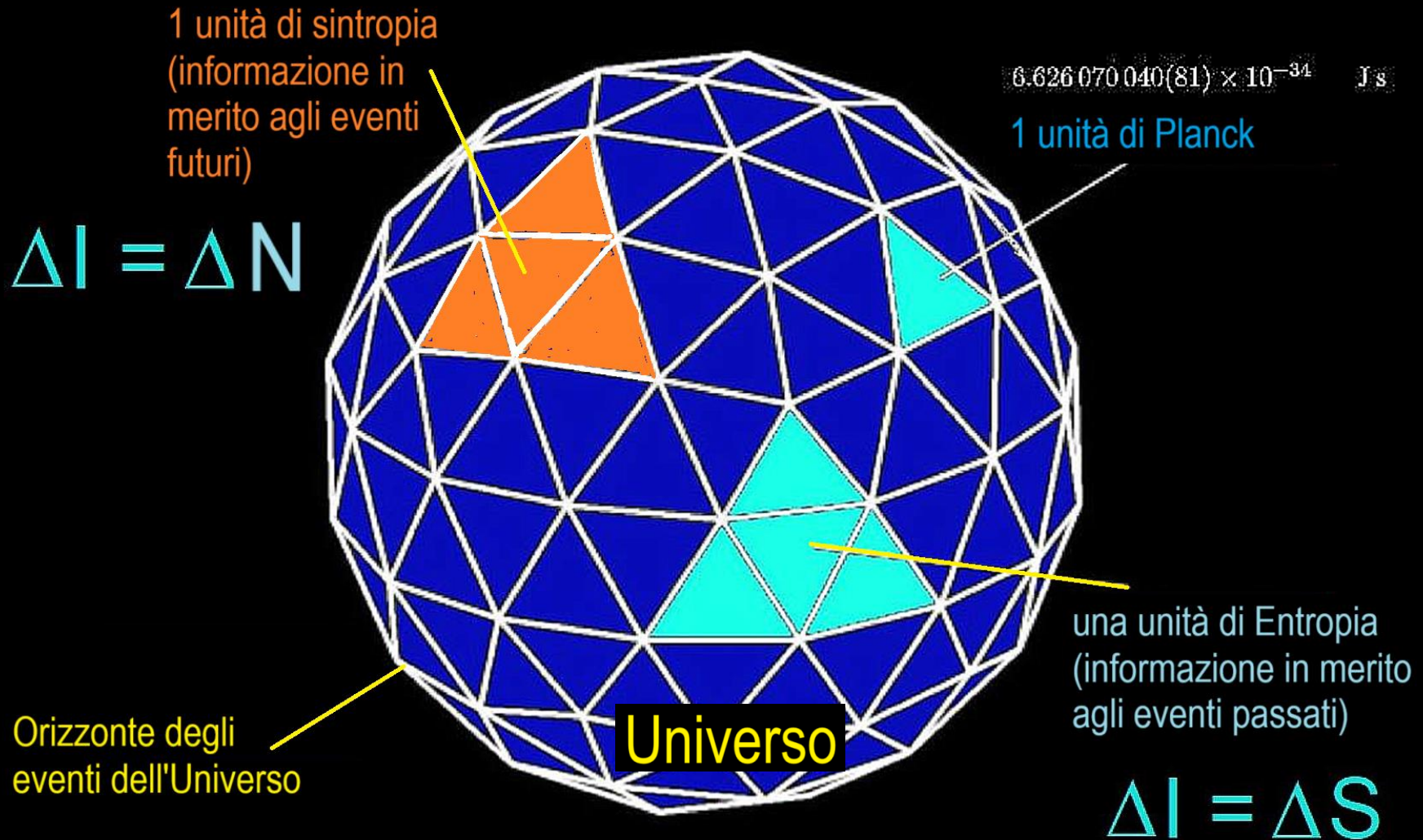


**Entropia** ← Informazione derivante  
dagli eventi passati

**Sintropia** ← Informazione intorno  
agli eventi futuri

L'informazione è già tutta codificata  
nell'orizzonte esterno dell'Universo

# Codifica dell'informazione



# Codifica dell'informazione

Presente =  $F(\text{Passato}, \text{Futuro})$

Stato Presente =  $G(\text{Entropia}, \text{Sintropia})$

Informazione attuale =  $H(\text{Info}(\text{passato}), \text{Info}(\text{futuro}))$

dove:

$F(\cdot)$ ,  $G(\cdot)$ ,  $H(\cdot)$  : funzioni sconosciute altamente nonlineari

 (libero) arbitrio

**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**

**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

**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).**



Massima informazione codificabile nell'Universo

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.**

# Informazione codificata nell'Universo

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  $t^2$

Cosa provoca ciò?

...l'Energia Oscura che crea lo Spazio-Tempo...

# il principio di Brillouin

Brillouin (1964) ha enunciato il suo famoso principio:

$$\Delta I = \Delta S + C$$

$$\Delta I > 0$$

$$C \ll 1$$

dove:

$$C = K_B \cdot \ln(2)$$

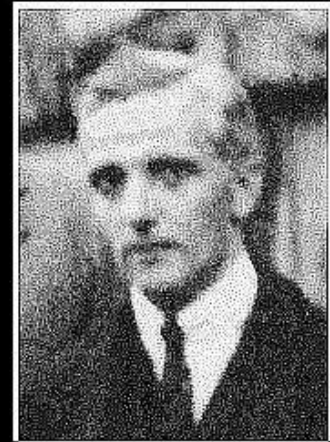
$K_B$  = costante di Boltzmann

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

$\Delta S$  = aumento di entropia

$\Delta I$  = informazione acquisita studiando un sistema

Leon Brillouin (Sèvres, 7 agosto 1899 – New York, 1969) è stato un fisico francese



$$\Delta I = \Delta S$$

L'osservazione di un sistema fisico permette di guadagnare una quantità di informazione  $\Delta I$ , ma questo si paga con un aumento  $\Delta S$  di entropia del sistema.

...ma anche sull'Entropia dell'Universo.

# Aumento di Entropia in funzione del tempo

## ... e di Informazione

$$\Delta S_u(t) = 4 \times 10^{15} \cdot \pi^2 \cdot \frac{k_B \cdot c^5}{h \cdot G} \cdot \Delta t$$

dove:

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

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

Il tempo  $t$  è espresso in anni

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

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

$K_B$  = costante di Boltzmann  $1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>

$c$  = velocità della luce nel vuoto 299 792 458 m s<sup>-1</sup>

# 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

- 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.**

**Dove è il libero arbitrio?**



# Il destino dell'Universo

Cosa succederà quando

$$V(\text{espansione}) = c$$

... quando la velocità di espansione dell'Universo sarà uguale alla velocità della luce (nel vuoto) ?

$$c = 300000 \text{ Km/sec}$$

...l'Universo sarà in equilibrio termodinamico.

$T(\text{univ}) = 0 \text{ } ^\circ\text{K}$

...l'Entropia sarà massima.

...l'Informazione sarà massima.

$10^{122}$  bits

...l'orizzonte cosmologico sarà un orizzonte degli eventi.

...l'energia oscura avrà vinto

# Big Freeze

...tra 16,7 Miliardi di anni

# Evoluzione dell'Universo:

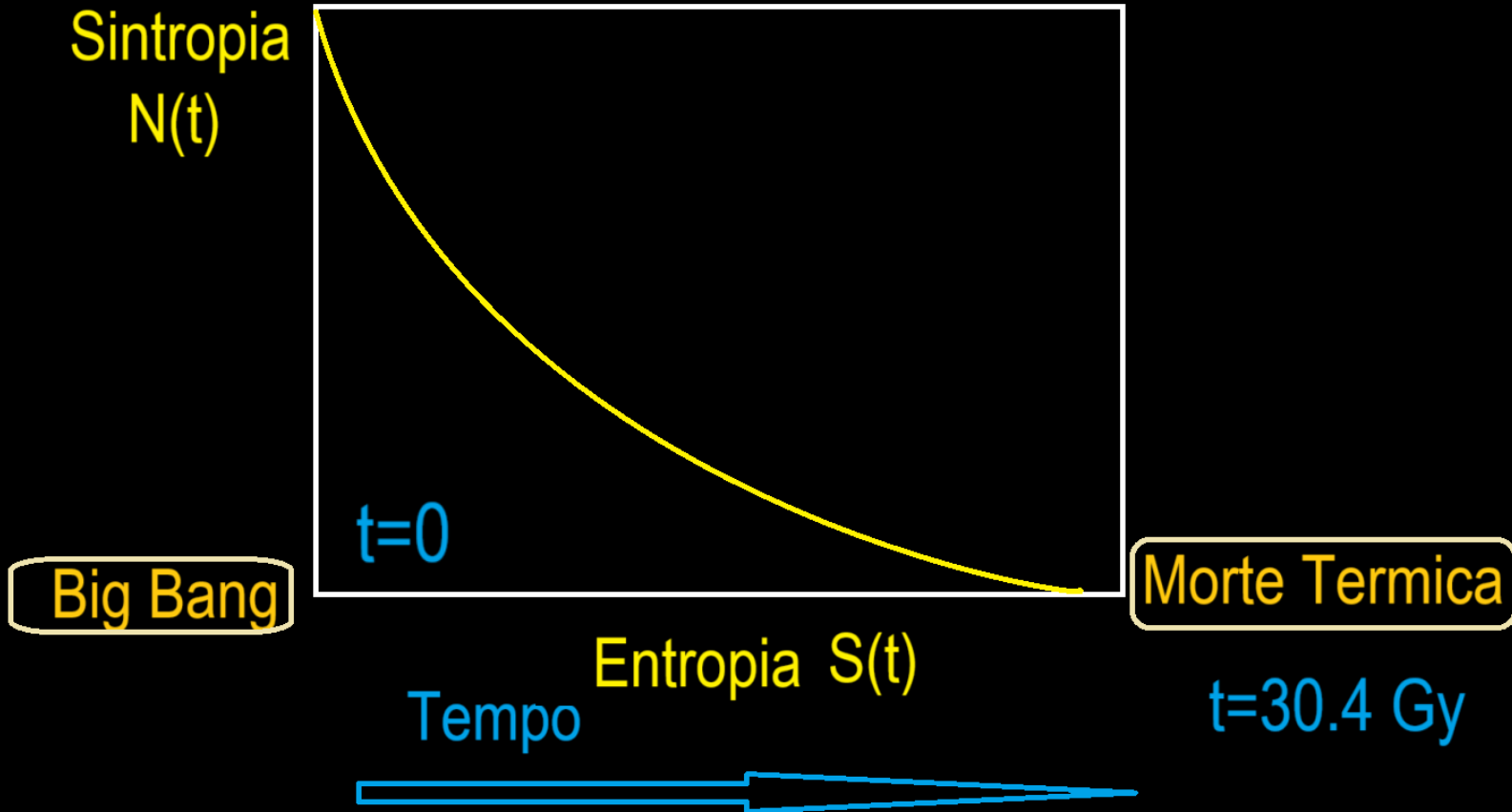
Trasformazione della Sintropia in Entropia

**Big Bang** = Massima Sintropia e Zero Entropia

**Morte Termica** = Zero Sintropia e Massima Entropia

# Evoluzione dell'Universo:

## Trasformazione della Sintropia in Entropia



...l'Energia Oscura che crea lo Spazio-Tempo...

...però nessuno sa cosa sia...

Domande strane... (ma legittime...)

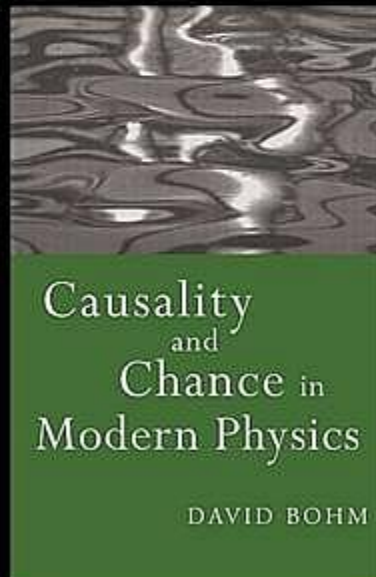
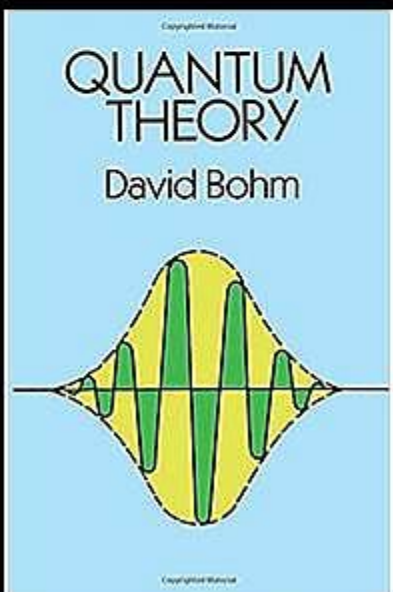
L' Energia Oscura è "l'intelligenza dell'Universo"?

L' Energia Oscura rende l'Universo una entità cosciente e senziente?

L' Energia Oscura stabilisce le leggi della Fisica valide in un dato Universo?

# Fenomeni Naturali

Ogni fenomeno naturale è una percezione della variazione locale del **Campo Informativo** che pervade tutto l'Universo



**Il campo informativo contiene due livelli di Ordine:**

**Ordine Esplicito**

**Ordine Implicito**

**Teoria delle Variabili Nascoste**  
**(metafora del mazzo di carte)**

Informazione  
relativa agli eventi  
futuri

$$\Delta I = \Delta N$$

Ordine Implicato

Sintropia

Ordine

Disordine

Ordine Esplicito

Entropia

Informazione  
proveniente dal  
Passato

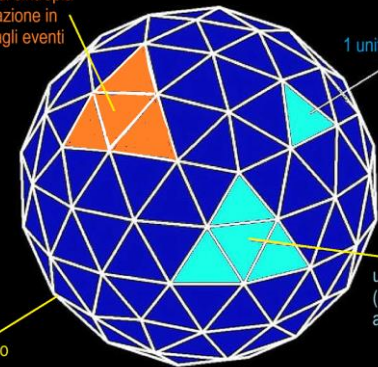
$$\Delta I = \Delta S$$

1 unità di sintropia  
(informazione in  
merito agli eventi  
futuri)

1 unità di Planck

Orizzonte degli  
eventi dell'Universo

una unità di Entropia  
(informazione in merito  
agli eventi passati)





# Gravità Entropica

**Erik Peter Verlinde** (Woudenberg, 21 gennaio 1962) è un fisico olandese.

Si occupa di fisica teorica e teoria delle stringhe. È fratello gemello di Herman Verlinde, anch'egli fisico teorico. Ha dato il nome alla "formula di Verlinde", importante nella teoria di campo conforme (CFT) e nella teoria topologica del campo quantistico (TQFT). Attualmente lavora presso l'Istituto di Fisica Teorica dell'Università di Amsterdam.

Nel corso di un simposio tenutosi l'8 dicembre 2009 presso lo Spinoza Instituut a Utrecht ha presentato una teoria che deriva dalla meccanica newtoniana. Il 6 gennaio 2010 ha quindi pubblicato *On the Origin of Gravity and the Laws of Newton*, che si può tradurre in: "Sull'origine della gravità e delle leggi di Newton". In tale teoria l'esistenza della gravità è spiegata in ragione di una differenza nella concentrazione di informazione nello spazio vuoto che separa e circonda due masse. La gravità sarebbe quindi una forza entropica, l'effetto di una causa esistente ad un livello più profondo della realtà microscopica. In un'intervista con il giornale *de Volkskrant* ha affermato che a livello microscopico le leggi di Newton non si applicano, ma a livello di mele e pianeti sì. Come per la pressione dei gas: le molecole del gas in sé non hanno alcuna pressione, ma un contenitore pieno di gas sì.



Erik Peter Verlinde

# Gravità Entropica

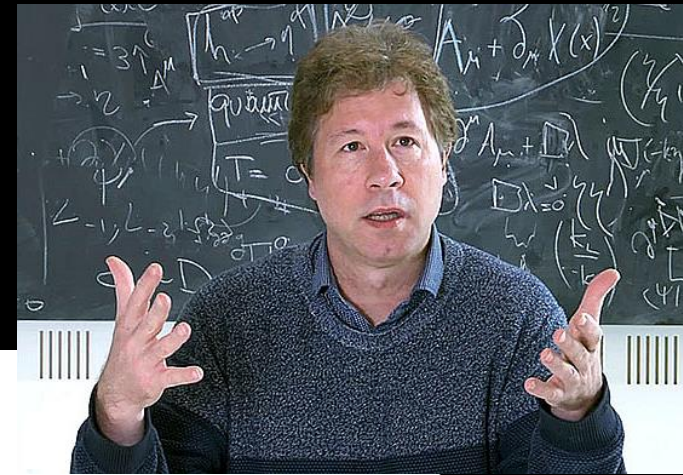
## On the Origin of Gravity and the Laws of Newton

Erik Verlinde<sup>1</sup>

Institute for Theoretical Physics  
University of Amsterdam  
Valckenierstraat 65  
1018 XE, Amsterdam  
The Netherlands

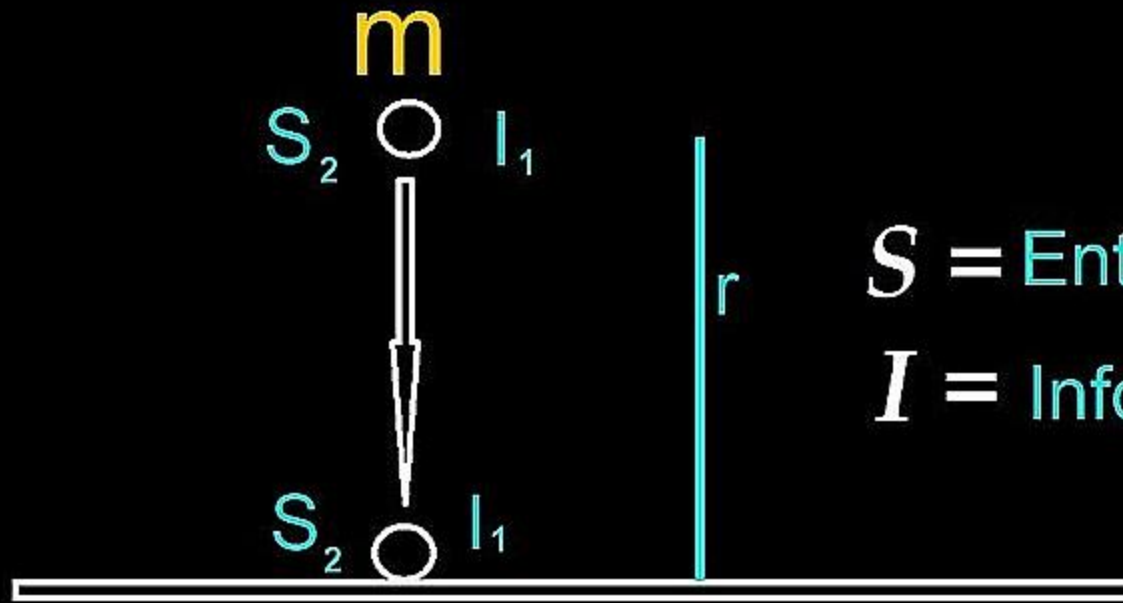
### Abstract

Starting from first principles and general assumptions Newton's law of gravitation is shown to arise naturally and unavoidably in a theory in which space is emergent through a holographic scenario. Gravity is explained as an entropic force caused by changes in the information associated with the positions of material bodies. A relativistic generalization of the presented arguments directly leads to the Einstein equations. When space is emergent even Newton's law of



Erik Verlinde

# Quando un corpo cade...



$S$  = Entropia

$I$  = Informazione (bits)

$$S = k_B \cdot \log_2(I)$$

# Gravità Entropica

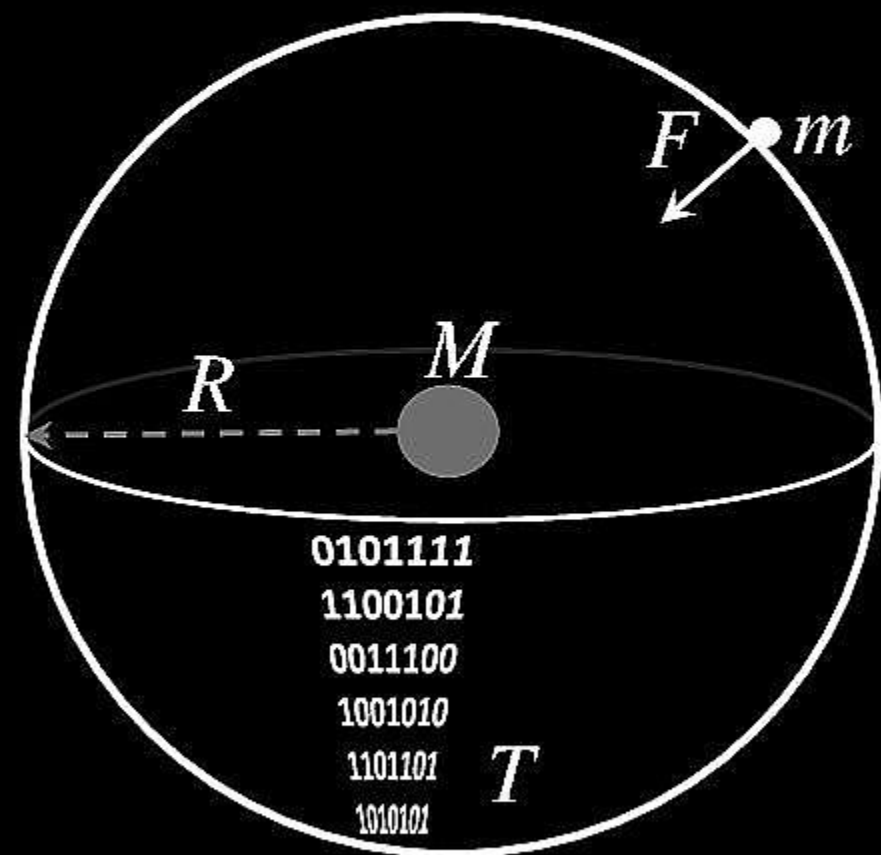
**La Forza di Gravità, come noi la percepiamo, è dovuta ad una variazione locale dell'Entropia dovuta alla presenza di corpi materiali dotati di massa.**

**La Gravità corrisponde ad una variazione dell'Informazione nel Campo Informativo locale.**

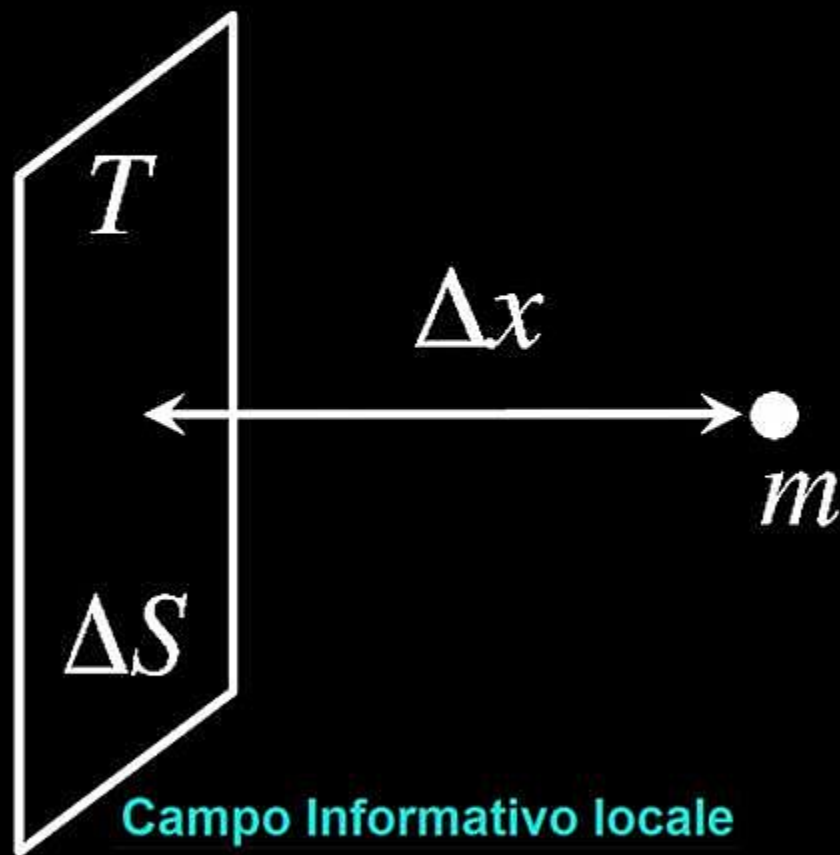
# Gravità Entropica

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial E},$$

$$\frac{F}{T} = \frac{\partial S}{\partial x}.$$

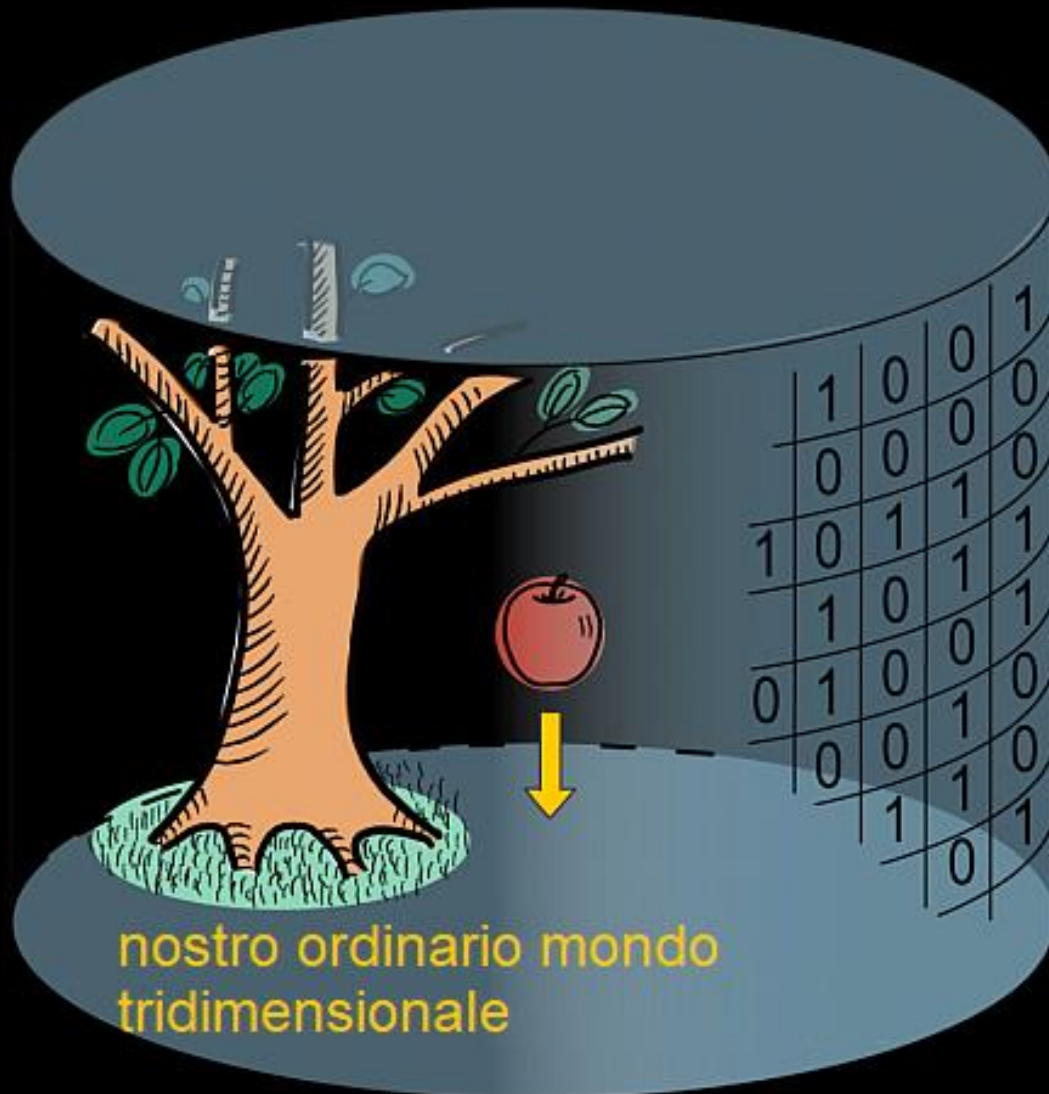


Campo Informativo locale



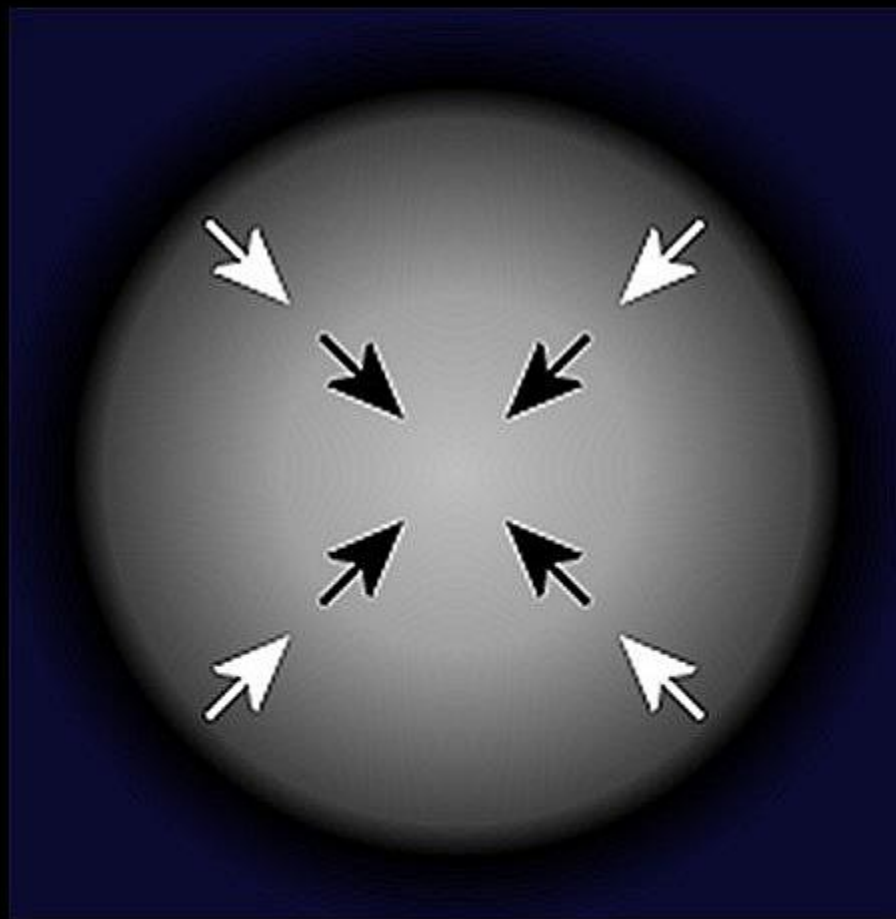
Campo Informativo locale

# Gravità Entropica



Campo Informativo  
Entropia  
Informazione

Un collasso gravitazionale produce un aumento di Entropia...



Quindi...

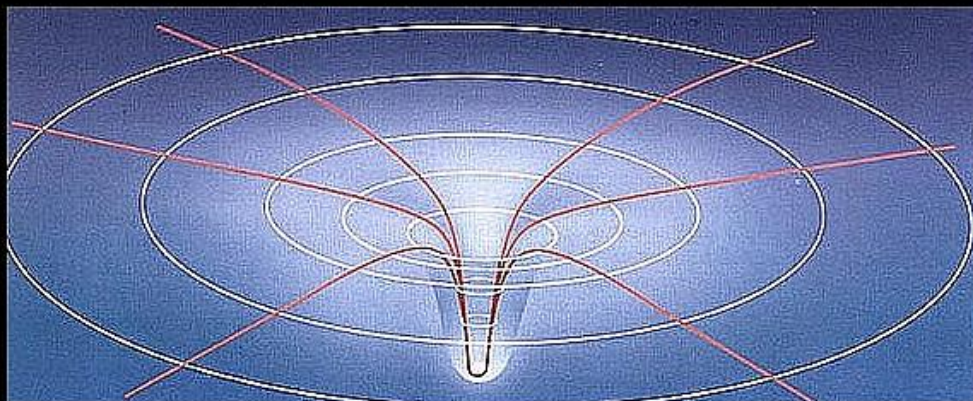


Le stelle si formano con un collasso gravitazionale.

Le stelle muoiono con un collasso gravitazionale...

L'Entropia sempre aumenta.....

l'Informazione sempre aumenta...







Grazie per  
l'attenzione!