

# TATIANA'S QUESTION

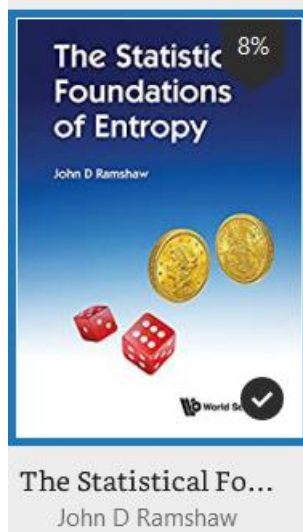
L'ENTROPIA  
NEL NOSTRO UNIVERSO  
IN ESPANSIONE

AUDIO



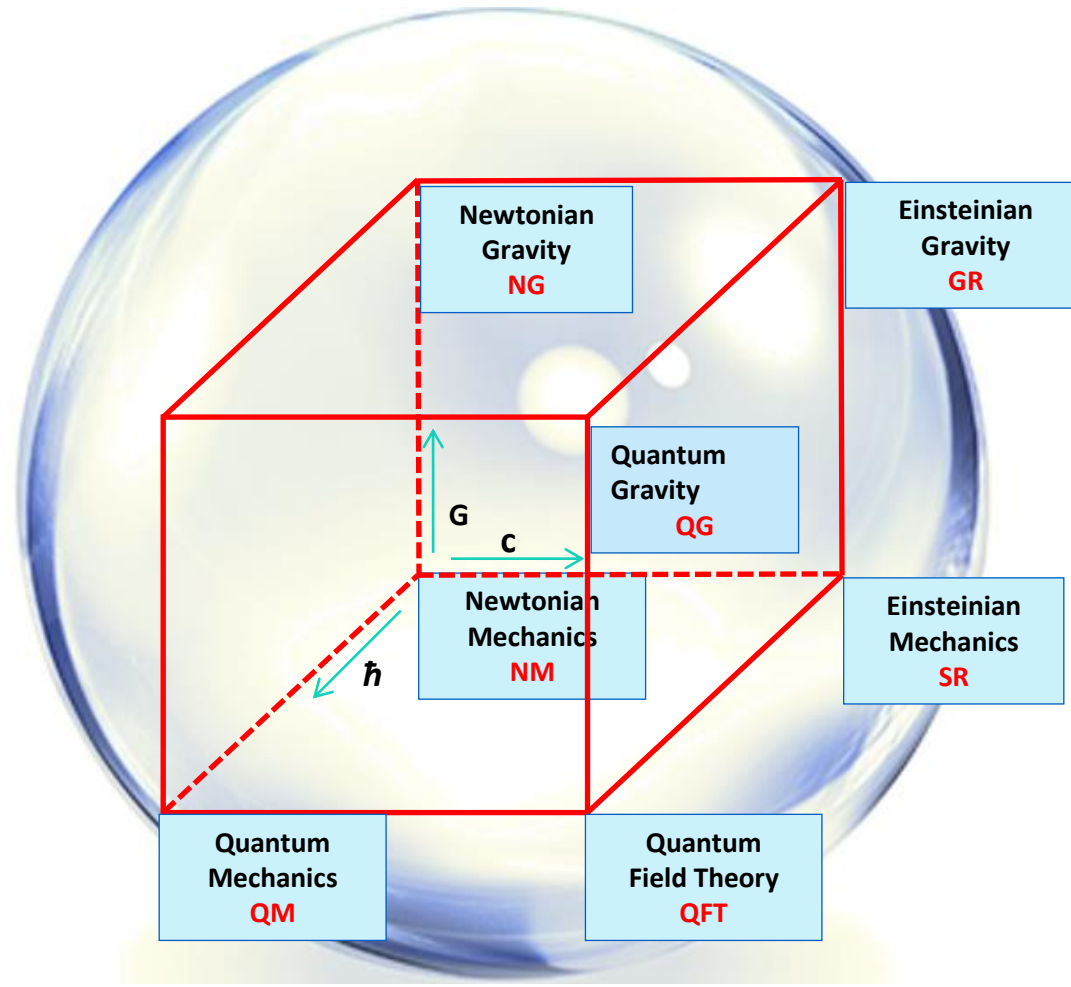
# LA DOMANDA

*Secondo lei l'espansione è irreversibile?  
E poi come si inserisce all'interno di questo modello  
il concetto di Entropia?*



*.. so readers encountering the statistical interpretation of entropy for the first time **are likely to benefit from frequent pauses for thoughtful contemplation...** and will thereby acquire a deeper appreciation for **the subtle beauty, elusive simplicity, and ultimate inevitability of entropy.***

# LA 'SFERA' DELLA FISICA



*Il cubo della Fisica*

Statistical Mechanics  
**SM**  
Information Theory  
**IT**

*La sfera della Fisica*

Mia definizione!

Esempio: Carlo Rovelli,  
Relational Quantum Mechanics, Feb. 1997

Postulate 1 (Limited information). There is a maximum amount of relevant information that can be extracted from a system.

# *ENTROPY – ‘THE SOFISTICATED LADY’*

## **Un concetto fondamentale:**

- Termodinamica
- Meccanica statistica
- Information theory
- Complexity Theory
- Biologia

## **Entropia**

- È una misura del grado di disordine, ovvero dell'incertezza
- È una misura della (mancanza di) informazione di un sistema
- È sempre crescente in un sistema isolato (costante solo per trasformazioni reversibili)
- Non si conserva
- È legata 'alla freccia del tempo'
- È una necessità per lo sviluppo della Vita

\* ....Greater freedom of choice , greater uncertainty, greater information .. Warren Weaver



Duke Ellington and his orchestra in concerto in Copenhagen (1965-1971) - sax Harry Carney

# *ENTROPIA – 'IN EVERY DAY LIFE'*

- **Entropia, strutture dissipative, attrito, calore ci permettono di:**
  - Stare in piedi ma anche seduti, senza scivolare o rimbalzare
  - Di giocare a calcio
  - Mettere in moto l'auto, anche quella elettrica
  - Accendere un computer
  - Cascare senza rimbalzare
  - Lanciare un sasso nella sabbia
  - .....
- **L'energia si conserva sempre.**
  - Una parte si trasforma in calore (movimento molecolare)
  - L'entropia aumenta. L'energia degrada verso forme meno utilizzabili
  - Abbiamo sempre bisogno di una fonte a più bassa entropia

È l'entropia, non l'energia, a trascinare il mondo. *Carlo Rovelli, L'ordine del tempo, cap.11*

# ENTROPIA – ‘ALLA RICERCA DI FONTI DI BASSA ENTROPIA’

Fonte	Canale	Stato finale	Commento
 <p>Struttura ordinata e stabile</p>	 <p>Combustione</p>	 <p>Prodotti della combustione</p>	<p>Stato più disordinato Maggiore entropia</p>
 <p>Due componenti</p>	 <p>Miscelazione di latte e caffè</p>	 <p>Cappuccino</p>	<p>Gusto disordinato Il sapore dell'entropia</p>
<p>quiz</p>			

Legna e aria sono in uno stato metastabile che può durare a lungo. L'apertura del canale avviene all'accensione del fuoco

# *ENTROPY IN UNIVERSE* 'A CURRENT RESEARCH THEME'

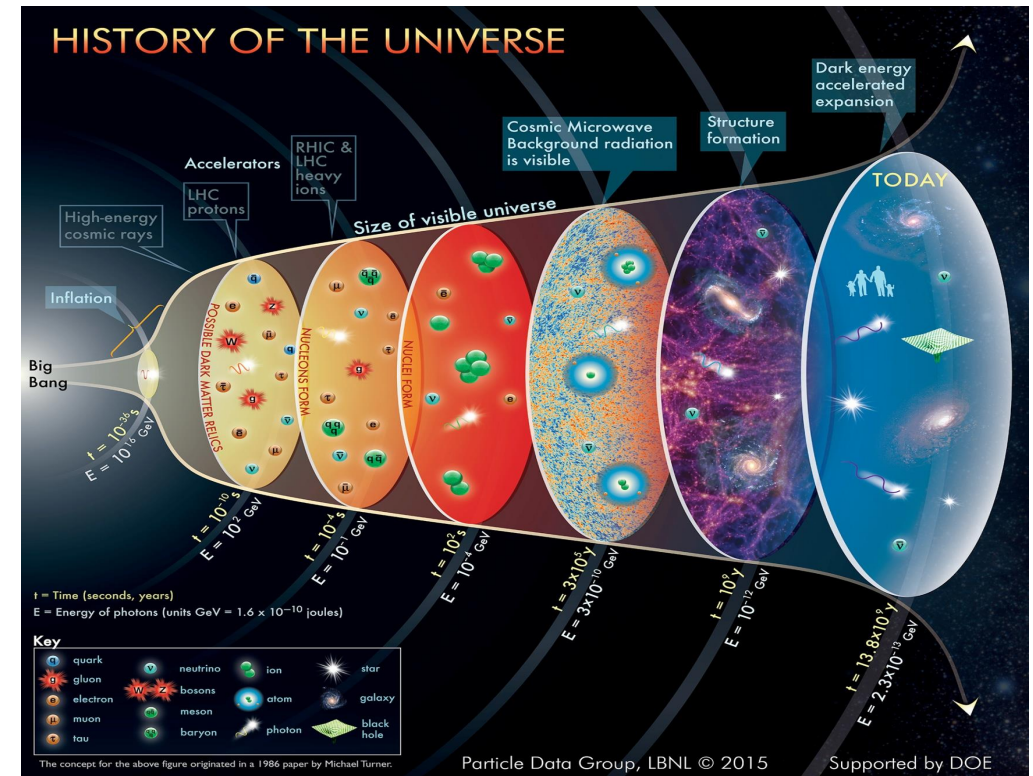
## **Entropy in Universe is a controversial item:**

- Roger Penrose in Road to Reality. *Chapter 27 The Big Bang and its thermodynamics legacy*. 2004
- David Wallace. *Gravity, entropy and cosmology: in search of clarity*. June 2009
- Charles H. Lineweaver, Chapter 22 The Entropy of the Universe and the Maximum Entropy Production Principle
  - <https://www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/Chapter22Lineweaver.pdf>
- Carlo Rovelli, Meaning and Intentionality = Information + Evolution. Nov 2016
  - <https://arxiv.org/abs/1611.02420>
- Carlo Rovelli, Where was past low entropy?. Feb. 2019
  - <https://arxiv.org/abs/1812.03578>
- Carlo Rovelli, Memory and entropy. Mar. 2020
  - <https://arxiv.org/abs/2003.06687>
- Arturo Tozzi, James F. Peters, Entropy balance in the expanding Universe; a novel perspective. Mar. 2019
- -----
- -----
- <https://www.youtube.com/watch?v=vbYeAaCloiM>

# ENTROPIA E EVOLUZIONE UNIVERSO 'A CURRENT RESEARCH THEME'

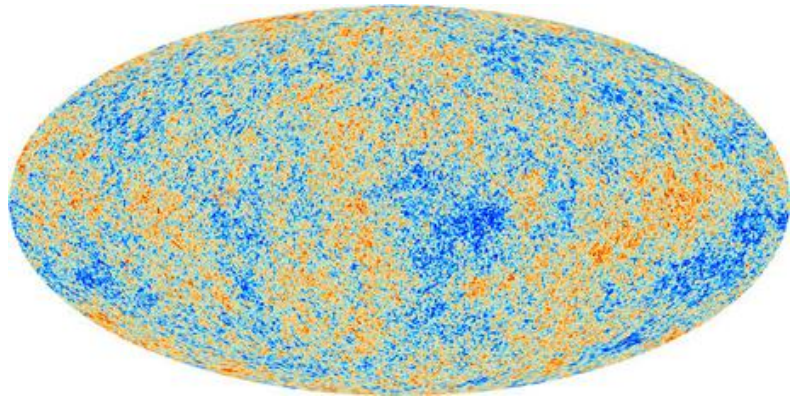
## Il problema:

- Se l'universo nasce in uno stato di equilibrio termico, ovvero con un massimo di entropia (ovvero a entropia costante), come è possibile la crescita dell'entropia prevista dalla seconda legge della termodinamica e la formazione di strutture galassie, stelle, pianeti, piante, animali?

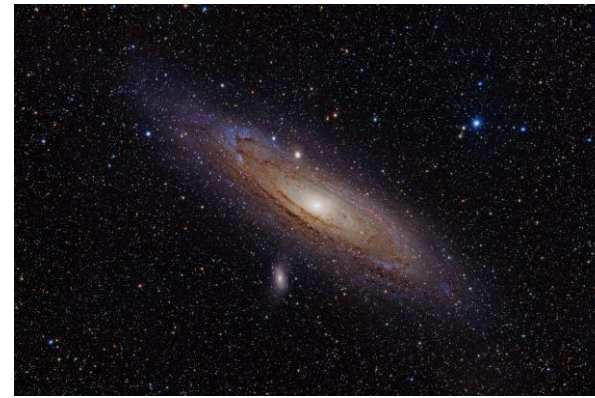




# VERY SIMPLE SYSTEM CLASSIFICATION



Near thermal equilibrium



Far from thermal equilibrium  
Non adaptative



Far from thermal equilibrium  
Adaptative

Entropy in place

Information recorded DNA  
Traces, Memory, History

# ENTROPY – EVERYWHERE

Field	Equation	Definition	Unit	Comment	Date
Information theory	$H(X) = - \sum_{x \in X}^n p_i(x) \log_2 p_i(x)$ <p>Nota</p>	Entropy of Information's source (Shannon)	bit	Entropy is a measure of uncertainty. Message reduce entropy	Shannon 1949
Statistical Mechanics	$H = \sum_k n_k \log_e n_k$ $H = \int dx p(x) \log_e p(x)$	Entropy of a system (Boltzmann)	Number	Boltzmann's H theorem If molecular chaos then $\frac{dH}{dt} \leq 0 : S = -kH$	Boltzmann 1872
Statistical Mechanics	$S = -kH$ $S = -k \ln W$	Boltzmann's Entropy (system with equal probability state)	J/K	Entropy never decrease	Boltzmann 1894: 'Entropy is related to missing information'
Quantum Mechanics	$S(\rho) = -\text{tr}(\rho \log_e \rho)$	Entropy		John von Neumann Entropy	John von Neumann 1932
Thermodynamics	$dS = \frac{dQ}{T}$ $S_B - S_A \geq \int_A^B \frac{dQ}{T}$	Second Law of Thermodynamics	J/K	Entropy never decrease	Clausius 1851 1865

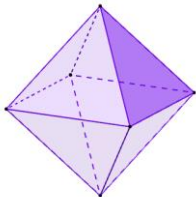
Nota: H ha un massimo quando le  $p_i$  sono uguali. Se il sistema si mescola verso uno stato equiprobabile H cresce. Seconda legge?

# ENTROPY – INFORMATION VIEW SHANNON

Object – The System	The State	Entropy	Bit
Dado	Faccia (6) $p=1/6$	$H(X) = - \sum_{x \in X}^n p_i(x) \log_2 p_i(x)$	2,585 - 3 -
Ottaedro	Faccia (8) $p=1/8$	$H(X) = - \sum_{x \in X}^n p_i(x) \log_2 p_i(x)$	- 3 -
Sfera	Quadranti (8) $p=1/8$	$H(X) = - \sum_{x \in X}^n p_i(x) \log_2 p_i(x)$	- 3 -
Ottaedro iperbolico	'Faccia' (8) $p=1/8$	$H(X) = - \sum_{x \in X}^n p_i(x) \log_2 p_i(x)$	- 3 -



$$x = -1,1: y = -1,1: z = -1,1$$



$$|x|^1 + |y|^1 + |z|^1 = 1$$



$$x^2 + y^2 + z^2 = 1$$



$$x^{2/3} + y^{2/3} + z^{2/3} = 1$$

# ENTROPIA – MICROSCOPIC VIEW BOLTZMANN - GIBBS



Object – The System	The State	Description
<i>Una particella</i>	6 grandezze $\mathbf{q}, \mathbf{p}$	Lo stato della particella è rappresentato da un vettore a 6 componenti Ovvero un punto in uno spazio (continuo) a 6 dimensioni
<i>Sistema <math>N</math> particelle</i>	$6N$ grandezze $\mathbf{q}, \mathbf{p}$	Lo stato della particella è rappresentato da un vettore a $6N$ componenti Ovvero un punto in uno spazio (continuo) a $6N$ dimensioni. <b>Phase Space</b> L'evoluzione del stato del sistema è la traiettoria del punto nel tempo $t$
	Stato Macroscopico	Descritto da grandezze macroscopiche $P, V, T$ Corrisponde a una pluralità di stati microscopici. <b>Insieme statistico</b>
	Densità Statistica	Definita da $\rho(\mathbf{q}, \mathbf{p}) d^{3N} \mathbf{q} d^{3N} \mathbf{p}$ (Una nuvoletta nello spazio delle fasi)
	Grandezza Fisica (Osservabile)	Media Statistica dell'osservabile $\langle O \rangle = \int O(\mathbf{q}, \mathbf{p}) \rho(\mathbf{q}, \mathbf{p}) d^{3N} \mathbf{q} d^{3N} \mathbf{p}$
	Ipotesi Ergodica	La media temporale dell'osservabile è uguale alla media statistica (sistema caotico) $\langle \bar{O} \rangle = \int O(\mathbf{q}, \mathbf{p}) dt = \langle O \rangle$
Stato Macroscopico Termodinamico ( $E, V, N$ )	$W(E, V, N)$ numero di microstati corrispondenti	$W(E, V, N) = \int \rho(\mathbf{q}, \mathbf{p}) d^{3N} \mathbf{q} d^{3N} \mathbf{p}$
	<b>ENTROPIA</b>	<b><math>S(E, V, N) = k_B \ln W(E, V, N)</math></b>
	Funzione additiva	$S = S_1 + S_2 = k_B \ln(W_1 W_2) = k_B (\ln W_1 + \ln W_2)$



# ENTROPIA – MICROSCOPIC VIEW

Object – The System	The State	Discrete Variable System - Description
A	$N_A$ Numero di stati	Ogni singolo stato è descritto un insieme discreto di valori di grandezze fisiche
B	$N_B$ Numero di stati	Ogni singolo stato è descritto un insieme discreto di valori di grandezze fisiche
(A,B)	$N_A \times N_B$ stati	Prodotto tensoriale degli stati dei due sistemi
$S_{AB} = S_A + S_B$	$S = \log_2(N_A \times N_B) *$	Sistemi con correlati. (Altrimenti $S_{AB} < S_A + S_B$ ! <i>Mutual Information</i> )

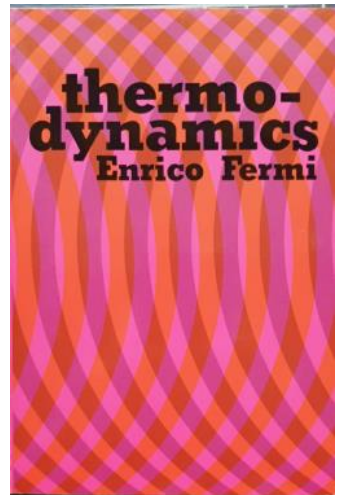
## Esempio di Prodotto Tensoriale

Cappuccino  
Caffè x Latte



Uno stato del sistema Macroscopico Cappuccino ha un numero di combinazioni di microstati equivalenti per quello stato pari a  $W$  (N. modi di combinazioni)  
Il movimento delle molecole mescola sempre di più i due componenti (caos molecolare)  
L'Entropia, proporzionale al logaritmo di  $W$ , cresce perché cresce il numero  $W$   
Descrizione microscopica (Microcanonica) della Seconda Legge della Termodinamica  
Il sistema tende all'equilibrio termico ( $T$  temperatura uniforme). Maggiore disordine.  
 $S$  tende a un massimo per il sistema (isolato)

\* A meno di una costante





# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## Un esempio - Il Plasma

Insieme di Particelle cariche – Ioni, elettroni, fotoni (radiazione elettromagnetica)

La meccanica statistica classica normalmente tratta atomi, molecole non interagenti

La meccanica statistica del Plasma deve tenere conto della presenza della radiazione elettromagnetica

Plasma	Componenti	Esempi		Entropia
Insieme di particelle cariche	Ioni, elettroni e fotoni Interazione elettromagnetica Radiazione elettromagnetica	Il cuore di una stella (Sole) L'Universo ante ricombinazione La ionosfera	La radiazione aggiunge gradi di libertà. Aumenta la temperatura	Barioni $Nk[\ln V + (3/2) \ln T]$ Fotoni $(4/3)\sigma VT^3$

Plasma Entropia (J/K)					
		Sole Core	Sole superficie	Universo osservabile	
Densità	Kg/m3	1,50E+05	1,40E+03	4,18E-16	4,18E-28
z				10000	0
				7000 anni	oggi
N	number	8,97E+31	8,37E+29	8,92E+79	8,92E+79
V	m3	1	1	3,57E+68	3,57E+80
T	K	1,57E+07	5,80E+03	2,73E+04	2,725
Entropia materia		3,08E+10	1,50E+08	2,13E+59	2,30E+59
Entropia radiazione		3,90E+06	1,97E-04	7,28E+66	7,28E+66

Universo osservabile	Grandezza	in
Barioni	$10^{80}$	n
Volume	$3,6 \cdot 10^{80}$	m <sup>3</sup>
Temperatura (circa -270 °C)	2,275	K
Entropia materia barionica	$1,6 \cdot 10^{82}$	k
Entropia Fotoni CMB	$5,3 \cdot 10^{89}$	k
Entropia Neutrini (fondo)	$3,7 \cdot 10^{89}$	k

Il Plasma è globalmente neutro. Cariche elettriche positive e negative. Fotone neutro e privo di massa

# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## La nube galattica

Insieme di Particelle (Idrogeno e Elio neutri)

La meccanica statistica classica normalmente tratta atomi, molecole non interagenti

La meccanica statistica delle Nubi deve tenere conto della presenza della forza e radiazione gravitazionale

Nube	Componenti	Esempi		entropia
Insieme di molecole neutre	Idrogeno, Elio Interazione gravitazionale	Nubi intergalattiche Nubi intra galattiche	La radiazione (onde gravitazionali) è molto debole. <i>Trascurabile!</i>	Barioni $Nk[\ln V + (3/2) \ln T]$ Fotoni $(4/3)\sigma VT^3$

The Big Bang and its thermodynamic legacy §27.8

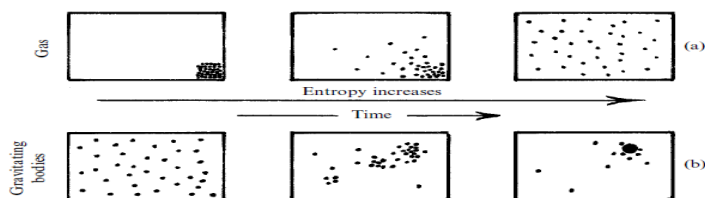


Fig. 27.10 Increasing entropy, with increasing time, left to right. (a) For gas in a box, initially all tucked in one corner, entropy increases as the gas starts to spread itself throughout the box, finally reaching the uniform state of thermal equilibrium. (b) With gravity, things tend to be the other way about. An initial uniformly spread system of gravitating bodies represents a relatively low entropy, and clumping tends to occur as the entropy increases. Finally, there is a vast increase in entropy as a black hole forms, swallowing most of the material.

- Una nube di particelle non interagenti diffonde e aumenta la sua entropia
- L'interazione gravitazionale può fare collassare la nube
- Se la massa di una certa regione supera un certo limite la nube si contrae
- Il processo è a reazione positiva. La contrazione aumenta l'attrazione.
- La nube tende a collassare. Aumentano pressione e temperatura.
- Ovvero aumenta il valore negativo dell'energia gravitazionale.
- Quindi aumenta l'energia cinetica, ovvero la temperatura.
- L'entropia diminuisce per la contrazione e aumenta per la temperatura
- Il centro della regione raggiunge la temperatura di decine di milioni di K
- Una piccola percentuale di atomi di idrogeno per effetto tunnel penetrano la barriera del potenziale elettrico coulombiano tra i protoni
- Inizia il processo di fusione di Idrogeno in Elio. Il neutrino rallenta il processo.
- Forza gravitazionale e pressione si equilibrano. Il processo si stabilizza

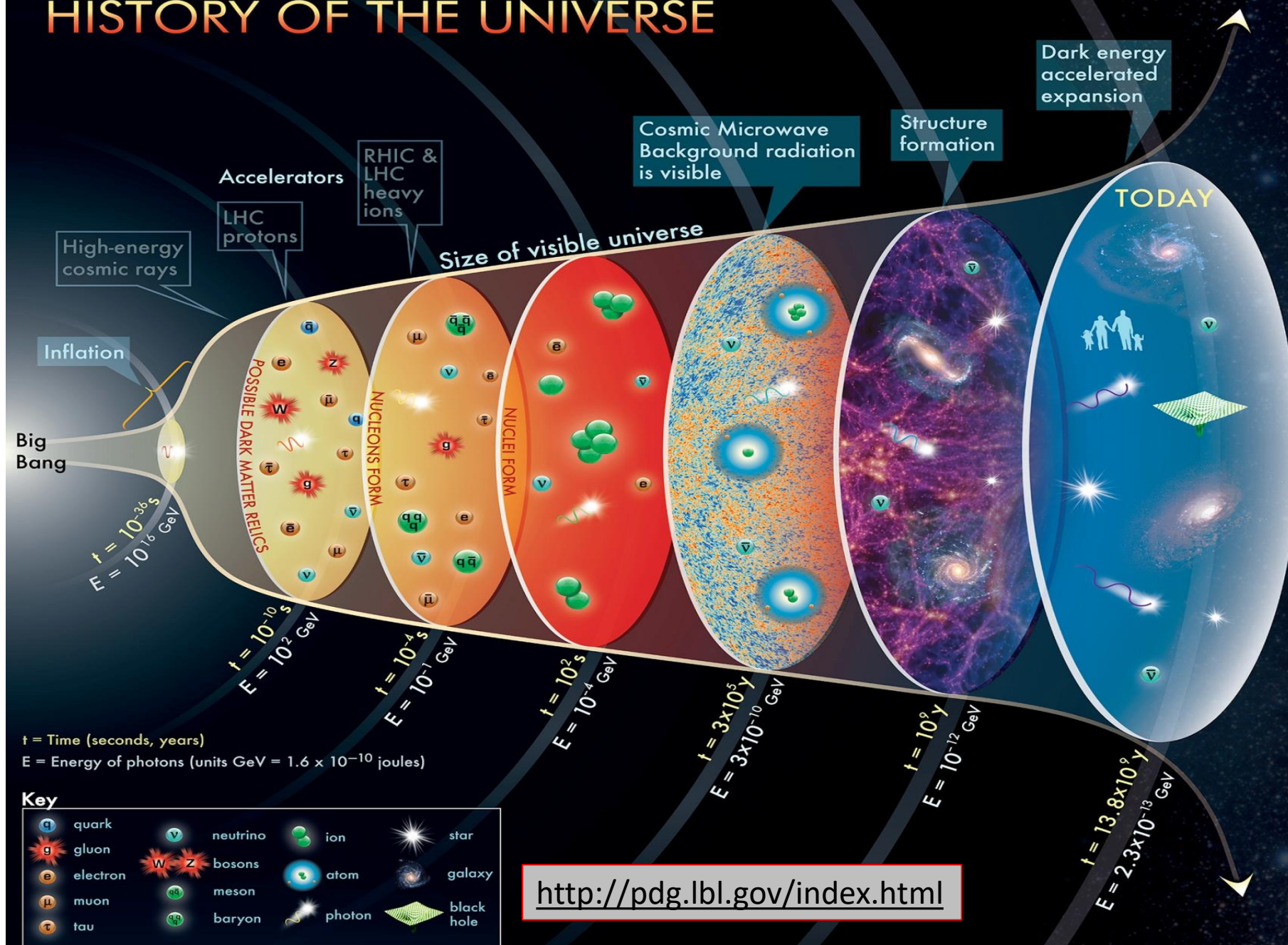
*E nata una stella!*

La nube intergalattica è 'carica gravitazionalmente'. Solo cariche positive, le masse, che si attraggono. (Deformazione spazio tempo)



Quando? Più o meno.

# HISTORY OF THE UNIVERSE



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## La formazione di una stella. Il gioco dell'entropia.

**Primo passo: Il Collasso.** Passo passo a partire da una nube diffusa di Idrogeno e Elio

$$\text{Barioni } Nk[\ln V + (3/2) \ln T]$$

$$\text{Fotoni } (4/3)\sigma VT^3$$

Prendiamo una regione sferica in una nube di particelle neutre soggette alla forza gravitazionale

- *Se la dimensione è tale che la massa supera un certo valore, la regione tende a crollare.*

In altri termini se la velocità della particelle di materia è superiore alla velocità di fuga, diffonde via

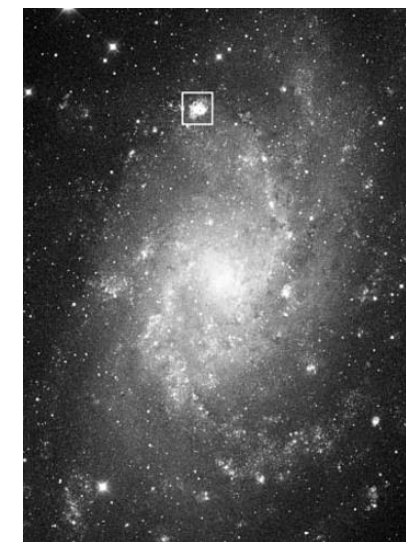
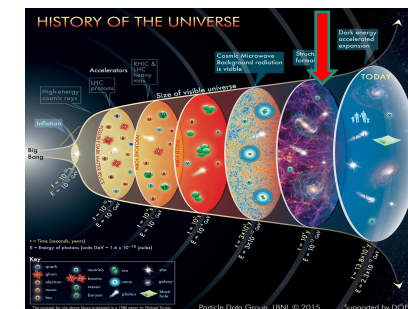
- *Il volume relativo a queste particelle aumenta e quindi aumenta l'entropia*

Se la velocità della particella è inferiore alla velocità di fuga, viene attratta verso il centro gravitazionale. Inizia il collasso

- *La contrazione diminuisce il volume e quindi diminuisce l'entropia.*
- *La contrazione aumenta l'energia cinetica del sistema. Aumenta la temperatura.*
- *L'entropia aumenta con T e prevale sulla diminuzione dovuta alla diminuzione del volume*
- *Viene irradiata energia elettromagnetica. Viene liberato calore nello spazio.*
- *(calore specifico negativo!)\**

Il collasso, grazie alla relatività generale, non si fermerebbe, malgrado l'aumento della temperatura e della pressione

- *Catastrofe gravo-termica*
- *L'entropia aumenta*



\* Ricordiamo che l'energia termica è dovuta alla velocità delle particelle e agli urti. Gli urti creano una eccitazione del livello energetico (stato quantico) dell'atomo o della molecola. Il livello eccitato ritorna a uno stato più basso emettendo fotoni (visibile, infrarosso, microonde...)

# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## La formazione di una stella. Il gioco dell'entropia.

**Secondo passo: L'accensione.** Passo passo a partire da una nube diffusa di Idrogeno e Elio

$$\text{Barioni } Nk[\ln V + (3/2) \ln T]$$

$$\text{Fotoni } (4/3)\sigma VT^3$$

Si potrebbe formare un buco nero? Non ancora

- *Temperatura e pressione possono innescare la reazione di fusione dell'Idrogeno in Elio*

Per la fusione dei nuclei di Idrogeno, è necessaria una temperatura di  $10^{10}$  K (10 Miliardi di gradi Kelvin)

- *Barriera coulombiana tra protoni. I neutroni sono nei nuclei di Elio, indisponibili. E solo  $10^7$  K! (10 Milioni di Kelvin)*

La distribuzione statistica della velocità dei protoni, permette a un protone ogni miliardo, di penetrare la barriera

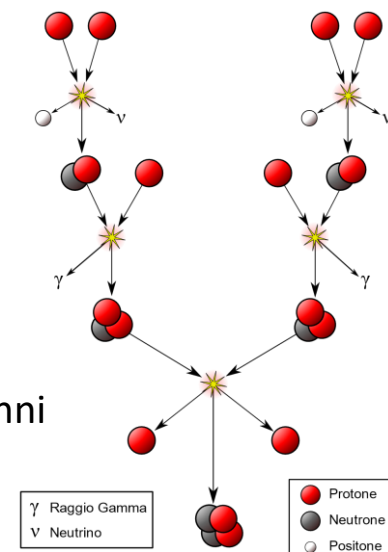
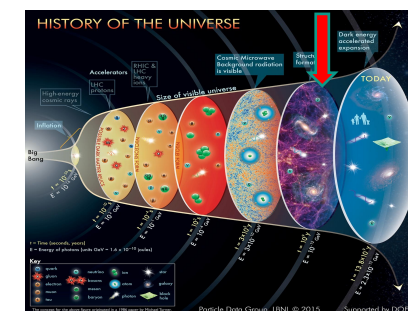
- *Effetto tunnel! L'idrogeno residuo dopo i primi tre minuti dell'Universo rientra splendidamente in gioco*

La reazione di fusione tra i nuclei di Idrogeno in elio libera circa 1% della massa

- *Il primo passo della fusione di due protoni genera un nucleo di Deuterio  $^2\text{H}$ , un positrone e un neutrino*
- *La prima reazione è quindi mediata dall'interazione debole, tramite l'emissione del neutrino*
- *L'interazione debole rallenta la velocità di fusione. (No esplosione. Grazie Neutrino. Sei la nostra salvezza!)*
- *Deuterio e idrogeno formano  $^3\text{He}$  + fotone. Poi due nuclei di  $^3\text{He}$  + formano un nucleo di Elio e due di Idrogeno*
- *Reazione esotermica. Entropia aumenta per la radiazione elettromagnetica, ma diminuisce per minore N*

La formazione della stella dura una decina di milioni di anni. La stella splende per diversi miliardi di anni

- *Grazie al carattere non esplosivo del primo passo della reazione*
- *E al serbatoio di bassa entropia della coppia Idrogeno Elio generati nei primi tre minuti dell'Universo*



La fonte di entropia. Idrogeno e Elio formati nei primi tre minuti dell'Universo. BBN (Big Bang Nucleosynthesis)



# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## La formazione di una stella. Il gioco dell'entropia.

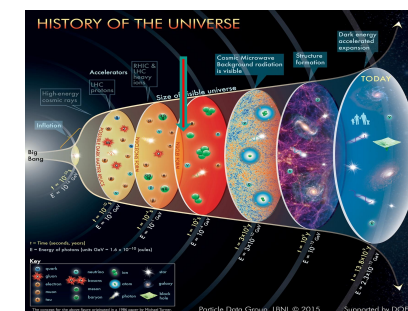
**Terzo atto: L'origine.** Un Passo Indietro: i primi tre minuti, anzi 15, dell'Universo

$$\text{Barioni } Nk[\ln V + (3/2) \ln T]$$

$$\text{Fotoni } (4/3)\sigma VT^3$$

Stato dell'universo a 1 secondo

- $t < 1 \text{ sec}$  Protoni e neutroni (formati a  $t=10^{-4} \text{ sec}$ ), in equilibrio grazie a neutrini/antineutrini (interazione debole)
- $t$  circa 1 sec velocità espansione supera velocità interazione. Neutrini liberi. Protoni e neutroni freeze.
- $(n/p = 1/5 \text{ circa})$ . Temperatura circa  $10^{10} \text{ K}$ . Protoni, Neutroni Elettroni, Positroni e Fotoni
- Energia fotoni 3 MeV. (La coppia Elettrone Positrone si crea e si distrugge, equilibrio)
- I protoni potrebbero fondersi per i primi 5 secondi. La temperatura scende a 5 miliardi K. Poco tempo

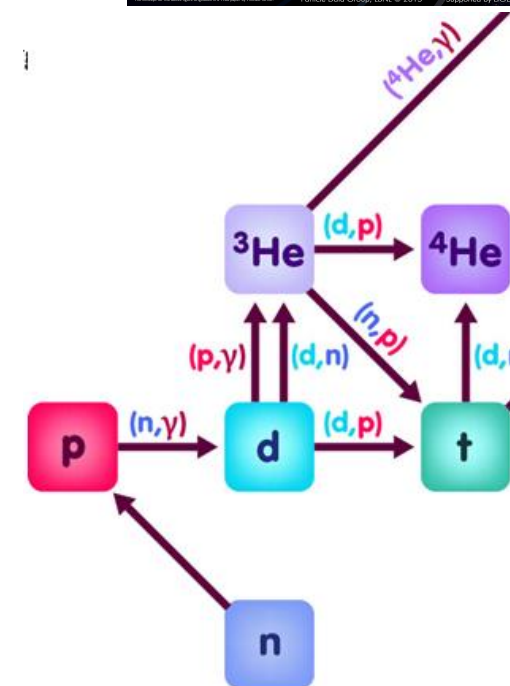


Il canale più facile è la fusione di Protone e Neutrone, in Deuterio (Binding energy 2,2 MeV)

- Fusione protone neutrone in deuterio mediata da interazione forte. Reazione veloce
- Nei primi tre minuti i neutroni vengono legati nei nuclei di Deuterio.
- Altrimenti in 15 minuti la metà dei neutroni sarebbero decaduti in protoni, elettroni e anti neutrino
- Ulteriori reazioni di fusione deuterio + deuterio, deuterio + protone, ....
- Stato finale 24% elio 76% idrogeno (in massa). 1 nucleo di elio ogni 12 di idrogeno.  $(n/p = 1/7 \text{ circa})$

Il gioco dell'entropia

- Inizio  $< 1 \text{ sec}$ . Numero particelle 16 (2 n 14 p circa).  $T = 10^{10} \text{ K}$
- Fine 10 minuti. Numero particelle 13.  $T = 5 \cdot 10^8 \text{ (circa)}$ .
- L'entropia dell'insieme Idrogeno Elio diminuisce! Circa  $2 \cdot 10^{81}$  (Serbatoio bassa entropia!).
- Energia di legame per nucleone 7 MeV tra elio e idrogeno. Circa 1% viene liberata in fotoni
- L'entropia dei fotoni emessi compensa la diminuzione dovuta alla formazione dell'elio (stima 10 volte)
- L'entropia dei fotoni nell'Universo è 7 ordini di grandezza superiore a quella dei barioni



# ENTROPIA E EVOLUZIONE UNIVERSO 'LA SOLUZIONE?'

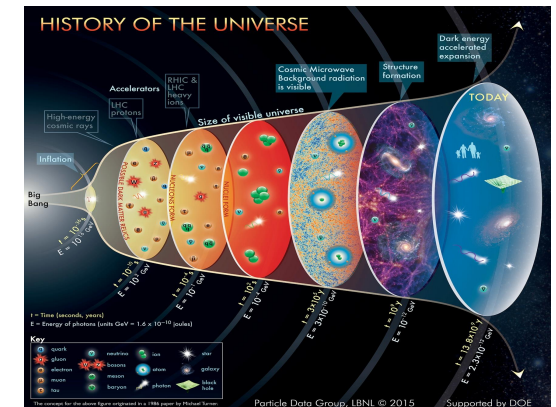
## Il problema:

- Se l'universo nasce in uno stato di equilibrio termico, ovvero con un massimo di entropia (ovvero a entropia costante), come è possibile la crescita dell'entropia prevista dalla seconda legge della termodinamica e la formazione di strutture galassie, stelle, pianeti, piante animali.

## La soluzione?

- t circa 1 sec velocità espansione supera velocità interazione! (KEY POINT)*
- I barioni non riescono a mantenere l'equilibrio termodinamico*
- L'universo va «out of equilibrium».*
- Processo irreversibile. Aumenta l'entropia*
- Rapporto Idrogeno e Elio si stabilizza. La fusione si ferma (15 min)*
- Da 500 milioni di anni in poi li ritroviamo nelle nubi*
- Le nubi collassano e si accendono le stelle*
- La fusione nucleare completa la trasformazione di Idrogeno in Elio*
- Il ciclo si chiude con l'aumento di entropia*
- Trasformazione irreversibile*

## Il gioco del cilindro e del pistone



# WHERE WAS PAST LOW-ENTROPY?

Una riflessione di Carlo Rovelli

The most common metastable systems in the universe are the large clouds of hydrogen. Why are they metastable? Because the protons forming them can fuse into helium, and since this is an irreversible process, helium is a much higher entropy state of its protons than hydrogen. There are potential barriers for protons to fuse into helium, that make hydrogen a metastable state. But there are processes that can overcome these potential barriers. A large hydrogen cloud has also a slow gravitational instability that makes it progressively clump [8], emitting heat but also increasing pressure and temperature<sup>1</sup> at its center until the potential barrier preventing hydrogen to fuse into helium becomes insufficient. Hydrogen starts burning, further increasing temperature, and a channel for rapid increase of entropy is open: a star is born.

A star like the sun is a strongly irreversible phenomenon. It produces vast amounts of photons full of free energy, that impact the Earth and fuel a huge amount of irreversible phenomena on the Earth surface, including the entire biosphere. Hence the entire irreversibility of life can be traced to the low entropy of the initial metastable hydrogen clouds.

How could the the protons in the hydrogen clouds be in a low-entropy state, if the matter content of the early universe was in thermal equilibrium, as it seems to be, according to standard cosmology [2]?

The answer is precisely the fact that the expansion of the universe has been too fast for equilibrium to keep up. When the volume was small, hydrogen and helium where in thermal equilibrium, as the standard cosmological model indicates, but then the expansion of the universe became too fast for the long hydrogen-to-helium thermalization time at lower temperatures, and the hydrogen remained trapped in a low-entropy metastable state. This is the low entropy fuelling the majority of the irreversible phenomena we see, including life.

Carlo Rovelli, Where was past low entropy?. Feb. 2019  
<https://arxiv.org/abs/1812.03578>

# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## La formazione di una stella. Il gioco dell'entropia.

$$\text{Barioni } Nk[\ln V + (3/2) \ln T]$$

Quarto atto: La morte e resurrezione della stella. Un Passo avanti

### Fine di una stella

Dopo alcuni miliardi di anni l'Idrogeno si è trasformato in Elio.

- Si spegne la reazione di fusione. Diminuisce temperatura e pressione. La stella collassa per la gravitazione
- Temperatura e Pressione crescono e si innesca la fusione dell'Elio, in Berillio e poi in Carbonio e Ossigeno
- Gli strati più esterni si espandono. Si forma una Gigante Rossa
- Quando terminano le reazioni di fusione, il nucleo di carbonio e ossigeno diventa inerte
- Il collasso riprende violento. Una grande esplosione, Si crea una **nebulosa planetaria**
- Al centro rimane una **Nana Bianca**.  $T$  25.000K, (record 250.000K). Densità 1 tonnellata per  $\text{cm}^3$
- Il collasso è impedito dal Principio di Esclusione di Pauli. Gas degenerare di elettroni (Fermi, fermioni, ....)

Se la massa residua supera il limite di Chandrasekhar

- Il principio di esclusione per i livelli elettronici non è sufficiente a reggere la forza gravitazionale
- Il collasso riprende violento. Una grande esplosione. Si crea una **Supernova**
- Elettroni e protoni si fondono in neutroni. Ancora il principio di esclusione per i fermioni (neutroni)
- Al centro si forma una **Stella di Neutroni**. Pulsar, Magnetostar, .....
- Temperatura 1 milione di gradi. Densità 200 Milioni di tonnellate per  $\text{cm}^3$

E l'entropia? Un aumento di  $10^{16}$ !

Perché stiamo parlando di nane bianche, stelle di neutroni? Next



Nebulosa Orione



Sirio A e B



Nebulosa Granchio



# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## La formazione di una stella. Il gioco dell'entropia.

Quinto: La fine. THE BLACK HOLE. L'ultimo Passo

$$S_{BH} = \frac{4 k_B \pi G M^2}{c \hbar}$$

$$T = \frac{\hbar c^3}{8 k_B \pi G M}$$

Buco nero non rotante  
Vedi Appendice A

### Fine di una stella

Se la massa residua supera il limite di circa tre masse solari

- Il principio di esclusione per i fermioni (neutroni) non è sufficiente a reggere la forza gravitazionale
- Il collasso non ha ostacoli. Si crea una **Buco Nero**
- Neanche la radiazione elettromagnetica riesce a uscire.
- L'entropia della radiazione resta intrappolata dentro l'orizzonte degli eventi.

Applicando la meccanica quantistica (o meglio la QFT) allo spaziotempo deformato del Black Hole

- Si calcolano Temperatura e Entropia del Buco nero . (Bekenstein - Hawking)
- L'entropia è proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi. Un valore enorme. Per tre masse solari  $10^{62}$  J/K
- Se due buchi neri si fondono, l'Entropia del buco nero risultante è maggiore. Per tre masse solari ciascuno, S aumenta di  $2 \cdot 10^{79}$
- La Temperatura del Black Hole scende a circa  $10^{-6}$  K!

Table 22.1 Entropy [k] of the various components of the observable universe

Black holes	$S_{BHs} \sim 3.1 \times 10^{104}$
Cosmic microwave background photons	$S_{photons} \sim 5.4 \times 10^{89}$
Cosmic neutrinos	$S_{neutrinos} \sim 5.2 \times 10^{89}$
Dark matter	$S_{DM} \sim 2 \times 10^{88}$
Cosmic graviton background	$S_{gravitons} \sim 6.2 \times 10^{87}$
Interstellar medium and intergalactic medium	$S_{ISMIGM} \sim 7.1 \times 10^{81}$
Stars	$S_{stars} \sim 9.5 \times 10^{80}$

L'entropia dell'Universo è  
contenuta nei buchi neri

Circa  $10^{15}$  più grande del CMB



# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

*La formazione di una stella. Il gioco dell'entropia.*

**Quinto: La fine. THE BLACK HOLE.** L'ultimo Passo

$$S_{BH} = \frac{4 k_B \pi G M^2}{c \hbar}$$

$$T = \frac{\hbar c^3}{8 k_B \pi G M}$$

Vedi Appendice A

## Fine di una stella

Se la massa residua supera il limite di circa tre masse solari

- Il principio di esclusione per i livelli energetici dei neutroni non è sufficiente per fermare il collasso gravitazionale
- Il collasso non ha ostacoli. Si crea una **Buco Nero**
- Neanche la radiazione elettromagnetica riesce a uscire. L'energia e la materia precedenti resta intrappolata dentro l'orizzonte degli eventi.

Applicando la meccanica quantistica (o meglio la relatività) si può stimare l'entropia e la temperatura del Black Hole

- Si calcolano Temperatura e Entropia del Buco Nero
- L'entropia è proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi. Per tre masse solari  $10^{62}$  J/K
- La Temperatura del Black Hole scende

**Table 22.1** Entropy [k] of the various components of the universe

Black holes	$S_{BHs} \sim 3.1 \times 10^{104}$
Cosmic microwave background photons	$S_{photons} \sim 5.4 \times 10^{89}$
Cosmic neutrinos	$S_{neutrinos} \sim 5.2 \times 10^{89}$
Dark matter	$S_{DM} \sim 2 \times 10^{88}$
Cosmic graviton background	$S_{gravitons} \sim 6.2 \times 10^{87}$
Interstellar medium and intergalactic medium	$S_{ISMIGM} \sim 7.1 \times 10^{81}$
Stars	$S_{stars} \sim 9.5 \times 10^{80}$

**White hole?**

*L'entropia dell'Universo è contenuta nei buchi neri*

Circa  $10^{15}$  più grande del CMB

# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA GRAVITAZIONALE'

## *Dalla Stella al Pianeta. Il gioco dell'entropia.*

**Sesto atto: L'entropia della Terra.** Un Passo di lato

Bilancio energetico ed entropico del sistema Sole - Terra

- *Temperatura Sole 5800 K (corpo nero)*
- *Temperatura Terra 288 K (Media corpo nero, ....)*
- *Flusso energia entrante uguale flusso energia uscente.*
- *Entropia pari a rapporto tra energia e temperatura.*
- *L'entropia uscente è circa 20 volte quella entrante!*
- *Per ogni fotone solare vengono emessi circa 20 'fotoni terrestri'*

La Sintesi Clorofilliana

- *La reazione comporta diminuzione di entropia (della Pianta)*
- *la variazione di entropia è  $\Delta S = -182 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  (fonte Treccani)*

I prodotti della sintesi clorofilliana

- *Cibo per gli animali*
- *Zuccheri per il nostro cervello*
- *Legna per i camini*
- *.....*

Bilancio Entropico Sole Terra (per sec)			
		Sole	Terra
T (K)		5800	288
Flusso Energia (J/mq)		342	342
Flusso Entropia (J/K mq)		0,06	1,19



...gine che contiene animale, tavolo, vetro, tenendo

# ALLA RICERCA DELLA 'ENTROPIA UMANA'

## *Dal Pianeta all'uomo. Il gioco dell'entropia.*

**Sesto atto: Le Tracce degli esseri umani.** Due Passi di lato.

Lo sviluppo della vita intellettuale e culturale

- *I sistemi sociali generano un patrimonio di conoscenza (cultura, valori..) nell'essere cosciente*
- *Il processo crea stati ordinati nelle strutture cerebrali, nei mezzi, nelle opere, nei libri, nei manufatti (Tracce)*
- *Separazione tra traccia e ambiente. Lungo tempo di termalizzazione, (out of equilibrium).*

Le Tracce: memorie, scritti, immagini, impronte sulla Luna, (bit fisici, ...)

- *Principio di Landauer. La cancellazione di un bit (o il restore) richiede un minimo di energia pari a  $E = kT \ln 2$* 
  - Teoricamente un computer a temperatura ambiente potrebbe commutare un miliardo di bit al secondo con solo 2,85 picowatt.
  - La legge di Moore prevede di raggiungere questo limite tra il 2030 e il 2035.
  - L'unico modo per superare questo limite secondo Charles H. Bennett è lo sviluppo di nuove tecnologie, come il computer quantistico

Le opere d'arte

- *La creatività dell'artista crea una struttura, l'opera, con minimo di entropia*
- *L'opera potenzialmente rimane in uno stato stabile (o metastabile)*
- *La comunicazione (visione, ascolto, ..) genera nuovi stati, tracce, nel sistema 'essere cosciente'*
- *L'interazione crea stati 'ordinati' nella memoria (neuroni, sinapsi), generando entropia nell'ambiente e un minimo negli organi*

La fine fisica

- *L'entropia del corpo, per la prima volta, cresce.*
- *L'entropia delle tracce rimane fissa. Le tracce sono in uno stato metastabile con l'ambiente. Le tracce sono un fenomeno irreversibile*

\* Landauer, Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process, IBM Journal of Research 1961

Traces of the past ...We remember the past, not the future... Carlo Rovelli, Memory and Entropy, Mar. 2020!

## IL PENSIERO DI UN AMICO

Gli Esseri Umani sono una struttura organizzata di atomi, molecole, cellule, tessuti, organi da cui *emergono* capacità quali pensiero, emozioni, ragione, creatività che lasciano tracce nei ricordi, nelle opere d'arte, negli scritti, nel pensiero.



In fisica, **l'emergenza** è usata per descrivere una proprietà, legge o fenomeno che si manifesta su scala macroscopica (nello spazio o nel tempo), ma non a livello microscopico, al di là del fatto che un sistema macroscopico può essere considerato come un grande insieme di sistemi microscopici.

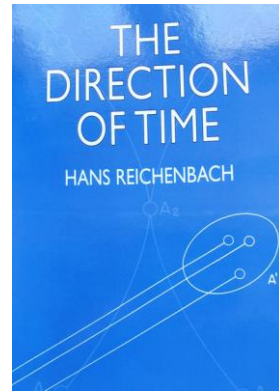




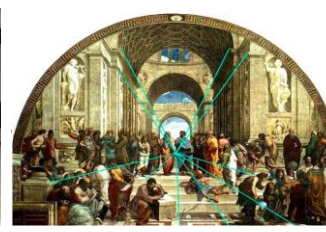
## E IL TEMPO? COS'È? COME SI MISURA? PRIMA, DOPO, INTERVALLO

Il modello cosmologico attuale su grande scala prevede un parametro universale,  $t$

- i fenomeni avvengono in modo da determinare l'incremento dell'entropia del sistema Universo se aumenta  $t$
- L'espansione dell'universo e l'aumento di entropia permettono la formazione di strutture organizzate
- Le strutture organizzate permettono di identificare un prima e un dopo tramite la formazione di tracce
- Il parametro  $t$  e le dimensioni spaziali definiscono la metrica del campo gravitazionale
- Tutti gli altri campi (Modello Standard) agiscono su questa base (Manifold, Background Independence)
- Il Sistema nel suo insieme sembra rispettare una coerenza logica interna
- Le strutture coscienti percepiscono: (perspectical view)
  - Una freccia del tempo coerente con il Sistema, (aumento dell'entropia)
  - Un ricordo del passato, una previsione del futuro
  - Nell'ascolto della musica: un prima, un dopo, una variazione
  - Lo sviluppo di tracce (libri opere d'arti, immagini, ricordi)



Dubito ergo cogito..... cogito ergo sum.



# RIFERIMENTI

Salvatore Aglieri Rinella

[s.aglieri@gmail.com](mailto:s.aglieri@gmail.com)

Mobile 335464614

## Libri e articoli consultati

- Claude e. Shannon, The Mathematical Theory of Communication
- Thomas M. Cover Joy A. Thomas, Elements of Information Theory
- Asher Peres, Quantum Theory Concepts and Methods
- Roger Penrose, The Road to Reality
- Charles H. Lineweaver, Paul C. W. Davies, Michael Ruse, Complexity and the Arrow of Time
- Charles H. Lineweaver, Chapter 22 The Entropy of the Universe and the Maximum Entropy Production Principle
  - <https://www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/Chapter22Lineweaver.pdf>
- Carlo Rovelli, Meaning and Intentionality = Information + Evolution <https://arxiv.org/abs/1611.02420>
- E.W Kolb, M.S. Turner, The Early Universe
- David Wallace. *Gravity, entropy and cosmology: in search of clarity.* June 2009
- Carlo Rovelli, Where was past low entropy?. Feb. 2019 <https://arxiv.org/abs/1812.03578>
- Carlo Rovelli, Memory and entropy. Mar. 2020 <https://arxiv.org/abs/2003.06687>
- Fred i. Dretske, Knowledge and the flow of information, 1979
- John D Ramshaw. The Statistical Foundations of Entropy (Statistical Physics Complexity) .



Q/A





# ENTROPIA E INFORMAZIONE DI UN BUCO NERO (NON ROTANTE)

Sulla base di teoremi di Hawking sui buchi neri, Bekenstein congetturò che l'entropia di un buco nero fosse proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi.

Il numero di stati corrisponde alla discretizzazione dell'area in aree elementari di Planck.

Hawking calcola il coefficiente  $\frac{1}{4}$ .

$$S_{BH} = \frac{4 k_B \pi G M^2}{c \hbar}$$

$$T = \frac{\hbar c^3}{8 k_B \pi G M}$$

Raggio di Schwarzschild	$r_s = \frac{2GM}{c^2}$	
Area orizzonte degli eventi	$A = 4\pi r_s^2 = \frac{16\pi G^2 M^2}{c^4}$	
Lunghezza di Planck	$l_P = \sqrt{G\hbar/c^3}$	
Entropia Bekenstein-Hawking	$S_{BH} = \frac{k_B A}{4 l_P^2}$	$S_{BH} = k_B \frac{16\pi G^2 M^2}{c^4} \frac{c^3}{4G\hbar} = 4 \frac{k_B \pi G M^2}{c \hbar}$
Temperatura	$T = \frac{E}{S} = \frac{GM^2}{r} \frac{c \hbar}{4 k_B \pi G M^2}$	$T = \frac{E}{S} = \frac{GM^2}{2GM} c^2 \frac{c \hbar}{4 k_B \pi G M^2} = \frac{\hbar c^3}{8 k_B \pi G M}$
Information inside a sphere Bekenstein Upper Bound In Bit (radius R)	$I_B = \log_2 n \leq \frac{2\pi G M^2}{c \hbar \ln 2}$	$I_B = \log_2 n \leq \frac{2\pi E R}{c \hbar \ln 2}$