



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 19

La Teoria della Gravità Entropica

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 $\tau\rho\omicron\pi\eta$ (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.

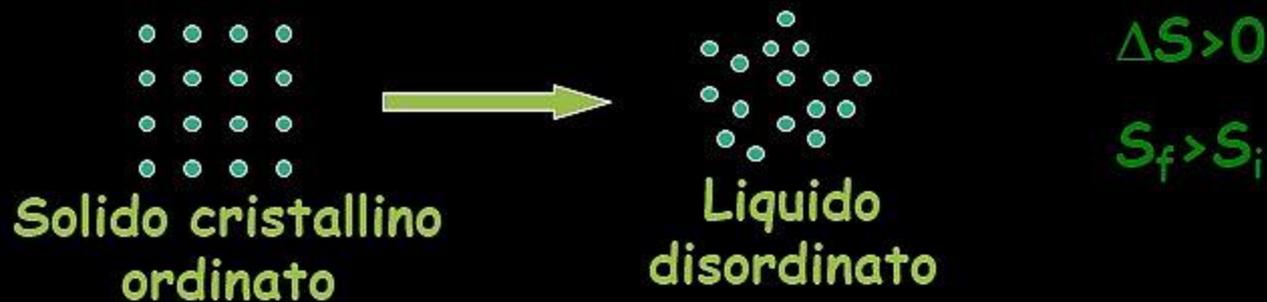
Entropia e II° principio della termodinamica

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 **joule/°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
- calcolare la somma di tutti gli addendi $\frac{\Delta Q_i}{T_i}$ per tale trasformazione

...La costante additiva!!!!

- L'entropia, come tutte le funzioni di stato, è definita a meno di una costante additiva.
- Spesso si prende come stato di riferimento S_0 con entropia nulla quello in cui si trova un cristallo perfetto, costituito da atomi identici fra loro, che si trova alla temperatura di 0°K.

$$S(A) = S_0 + \left(\sum_0^A \frac{\Delta Q_i}{T_i} \right)_{0 \rightarrow A}^{rev}$$

L'entropia di un sistema isolato

Consideriamo un sistema chiuso ed isolato che non abbia scambi di energia e/o materia con l'esterno e supponiamo che questo sistema sia diviso in due sottosistemi S_1 e S_2 che possono interagire fra loro.

Si può dimostrare che, se in questo sistema hanno luogo solo trasformazioni reversibili, l'entropia rimane costante. Infatti ogni scambio di calore assorbito dal sottosistema S_1 deve essere prodotto dal sottosistema S_2 e viceversa.

Quindi nella sommatoria che definisce la variazione di entropia si trovano termini uguali ed opposti, quindi:

$$S_1(B) - S_1(A) + S_2(B) - S_2(A) = 0.$$

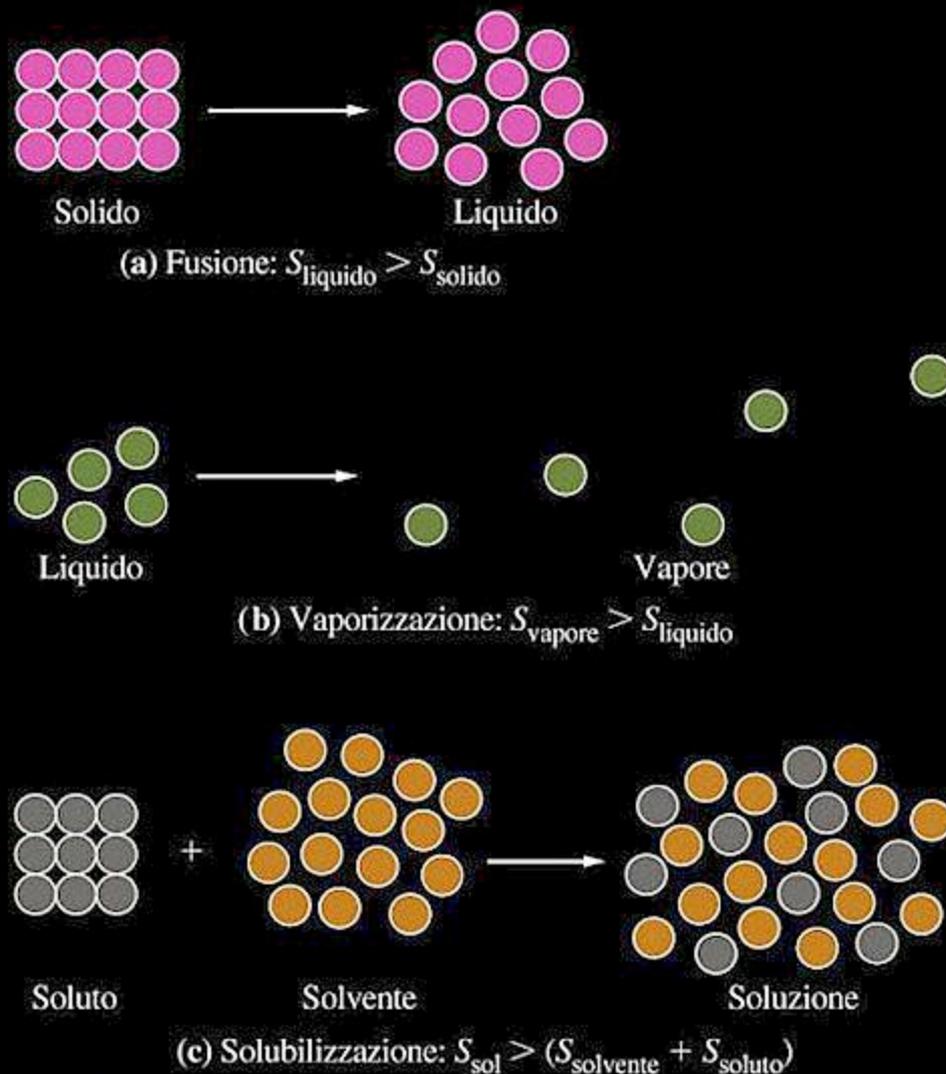
Quindi...

Pertanto, sommando i termini positivi ΔS_i , necessari per compiere le trasformazioni irreversibili che avvengono fra i due sottosistemi, si ottiene una **variazione totale di entropia** che è **sempre positiva**.

L'entropia aumenta anche quando l'energia è scambiata sotto forma di lavoro e non di calore. Ogni trasformazione che avviene in un sistema isolato provoca in esso una variazione di entropia pari a: $\Delta S \geq 0$

(=0 solo per trasformazioni reversibili)

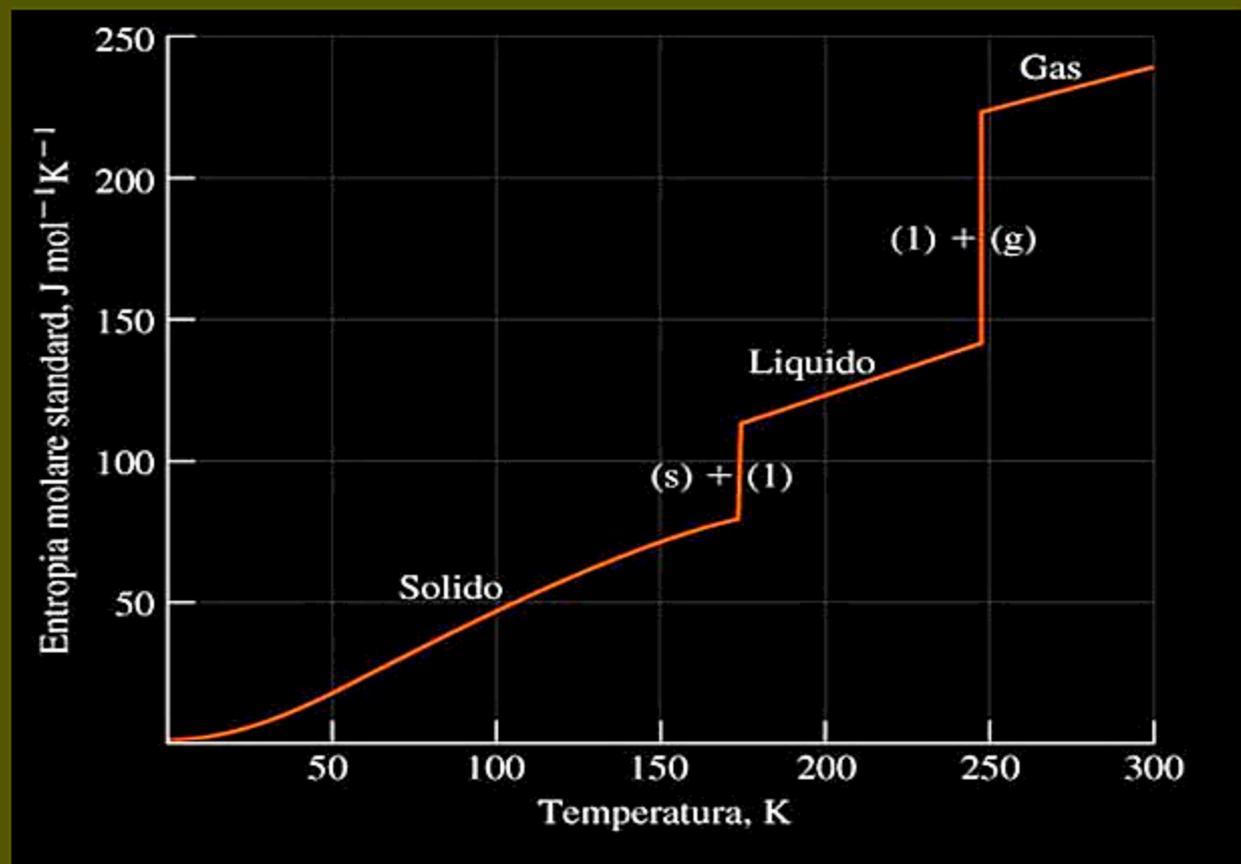
Qualche esempio... di aumento di Entropia



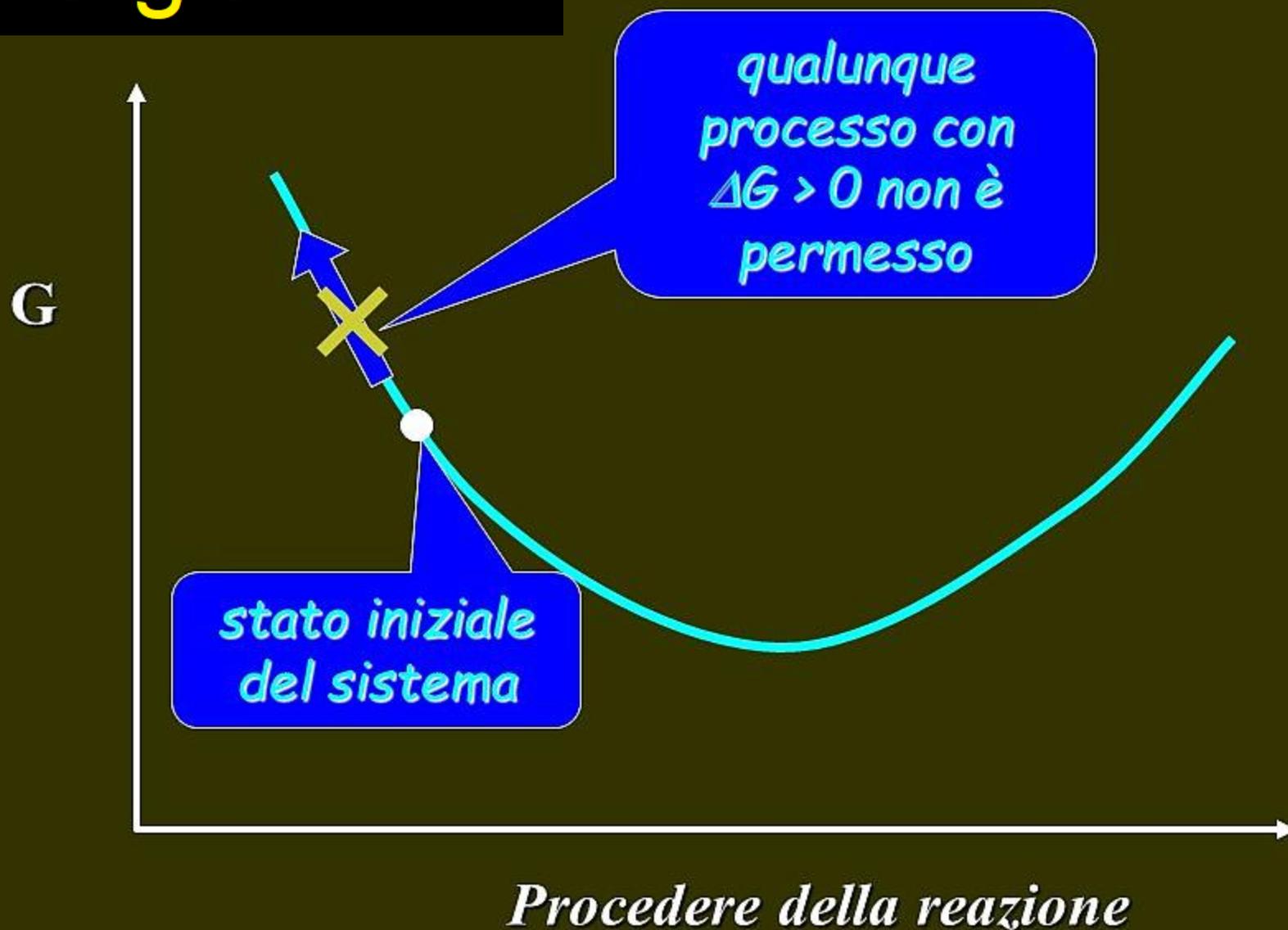
▲ **FIGURA 20-5** Tre processi in cui l'entropia aumenta

Ognuno dei processi indicati – (a) la fusione di un solido, (b) l'evaporazione di un liquido e (c) lo sciogliersi di un soluto – portano ad un aumento di entropia. Per la parte (c) la generalizzazione lavora meglio per soluzioni di nonelettroliti in cui non esistono forze ione-dipolo.

La seguente figura mostra come varia l'entropia di una sostanza con la temperatura



Energia



Energia



Energia



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.

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

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 $299\,792\,458 \quad \text{m s}^{-1}$

L'entropia di un sistema non isolato

- In un sistema non isolato Ω_1 l'entropia può diminuire (ad es. nell'interno di un frigo dove l'acqua si trasforma in ghiaccio, perché il calore è sottratto $Q < 0$, quindi $\Delta S < 0$);
- La diminuzione può avvenire solo a spese dell'energia fornita ad un sistema Ω_2 formato dal motore, dal sistema elettrico, dalle serpentine e dal fluido.
- Si dimostra che l'entropia del sistema Ω_2 aumenta in misura maggiore o uguale rispetto alla diminuzione di entropia di Ω_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, umentandone l'entropia

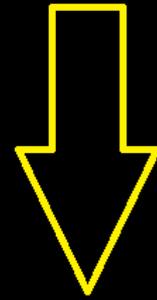
Il terzo principio della termodinamica

- 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)*

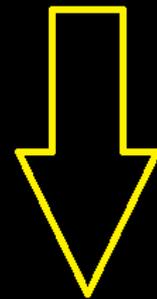


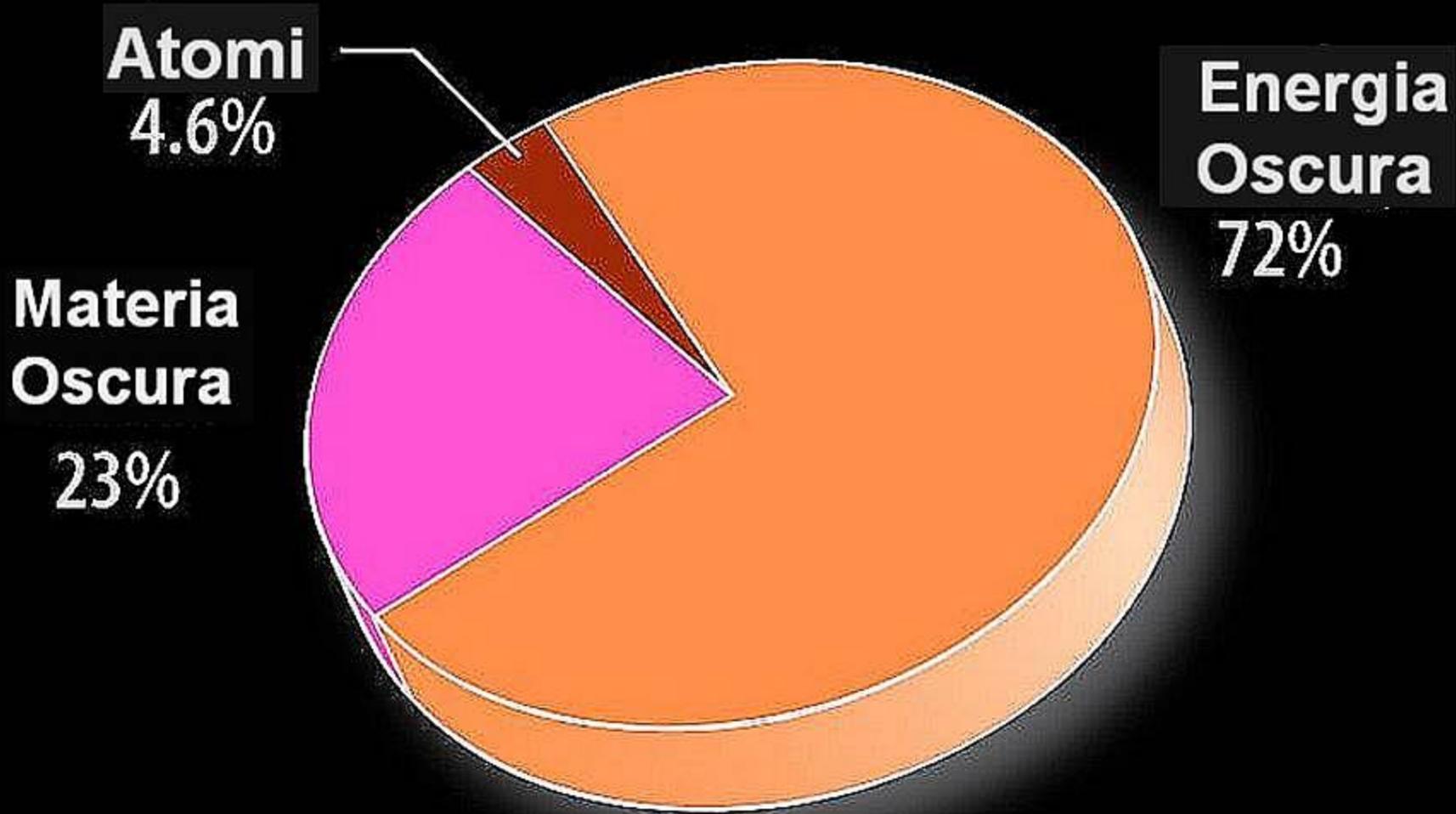
13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)



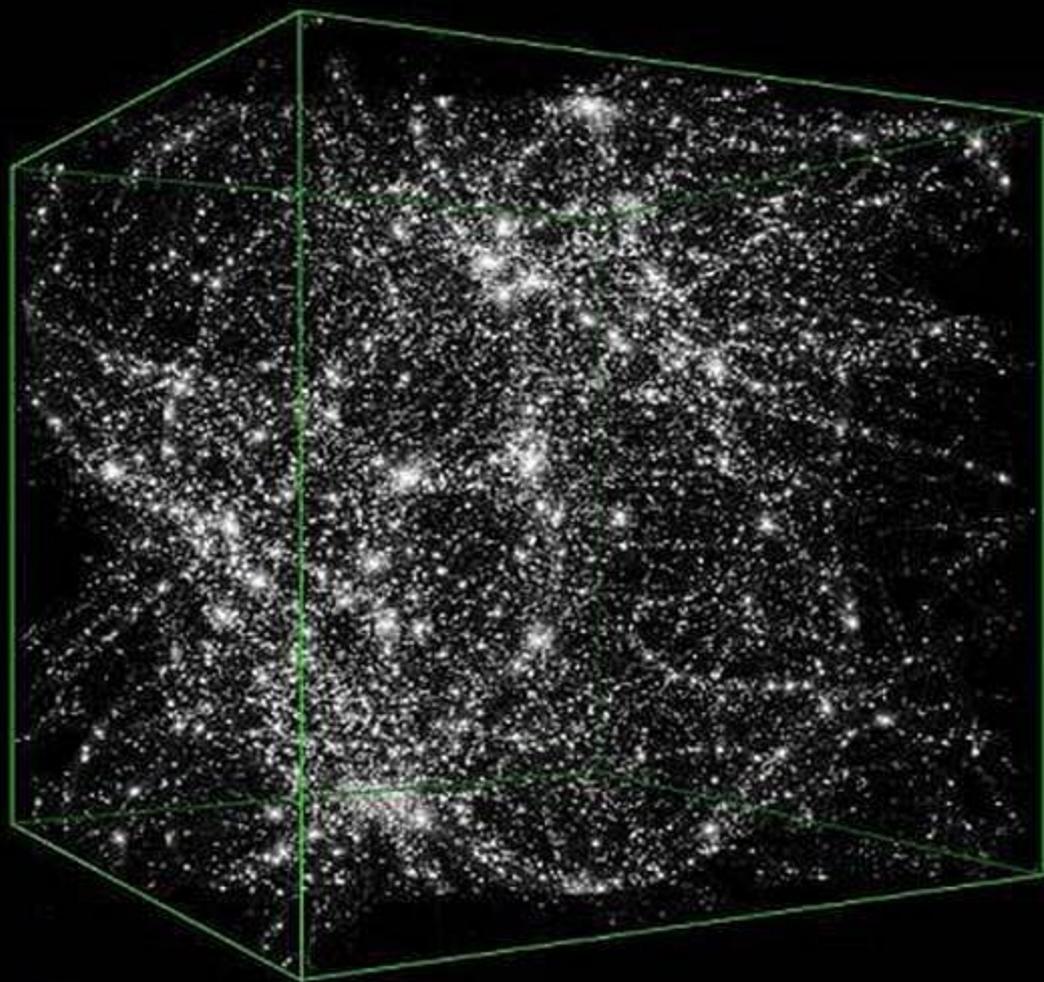
**Un aumento di Entropia
verificatosi negli ultimi
13.72 miliardi di anni...**





Oggi

Struttura dell'Universo



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".

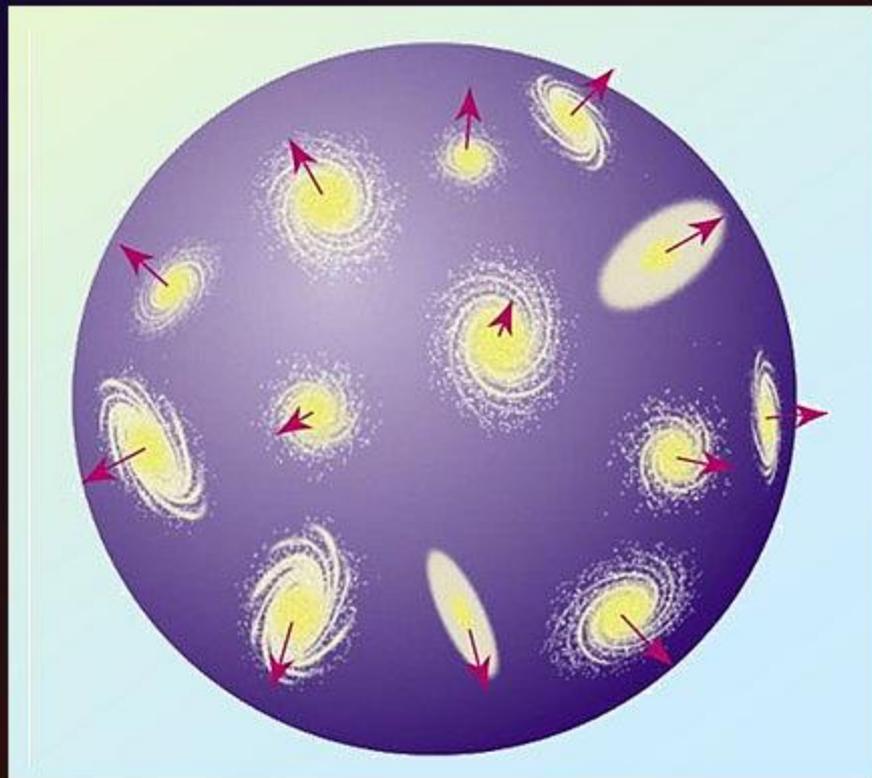
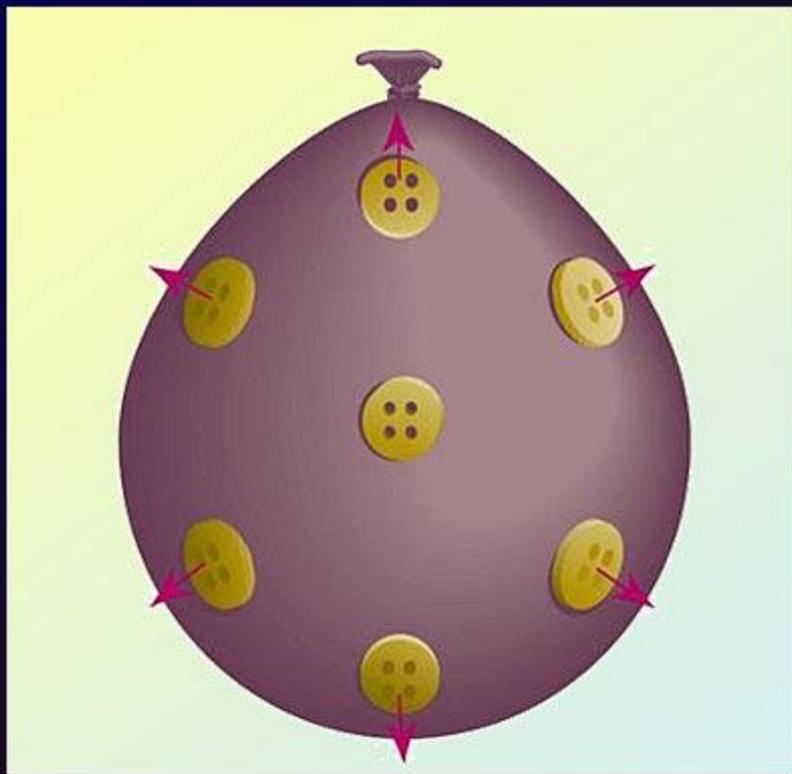
Vi sarà un tempo in cui non vi sarà più energia disponibile.

La temperatura dell'universo sarà uniforme:

Questa è La Morte Termica

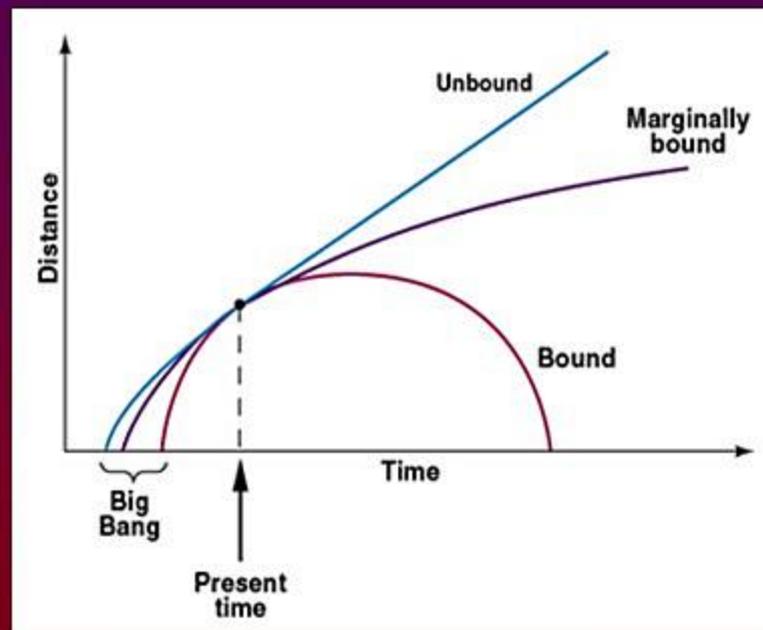
L'Universo in espansione

- 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



Qual'è il fato dell'Universo?

- L'Universo, si espanderà per sempre?
 - Dipende dalla densità dell'Universo
 - Troppo grande: **Big Crunch** $\Omega_0 > 1$
 - Universo chiuso
 - Troppo piccola: **Big Freeze**
 - Universo aperto $\Omega_0 < 1$
 - La densità critica separa gli scenari
- Ω_0 è il rapporto tra la densità reale e quella critica.



Qual'è il fato dell'Universo?

I Cosmologi ritengono che $\Omega_0 < 0.3$



Universo Aperto: Big Chill

*L'entropia continuerà ad aumentare
l'Universo tenderà all'equilibrio termico
fino a raggiungere 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 ∞ : *l'Universo contiene fotoni, neutrini, elettroni e positroni.*

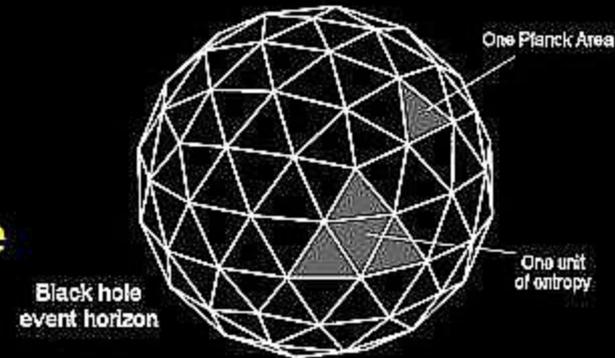
Arriva la Morte Termica

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 descrive
l'Informazione contenuta
in un sistema:**

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

I_{BH} = informazione

S_{BH} = Entropia

k = costante di Boltzmann

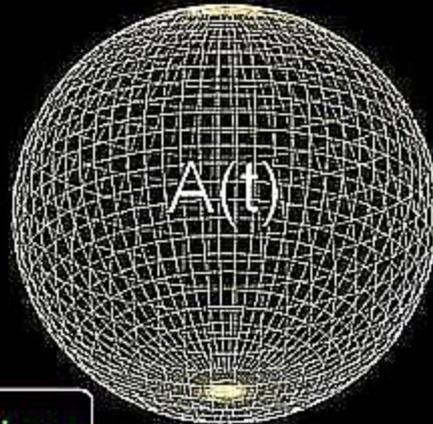
**E' possibile applicare la
definizione di Entropia di
Beckenstein - Hawking
all'intero Universo.**

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

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

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

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).

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:

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

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

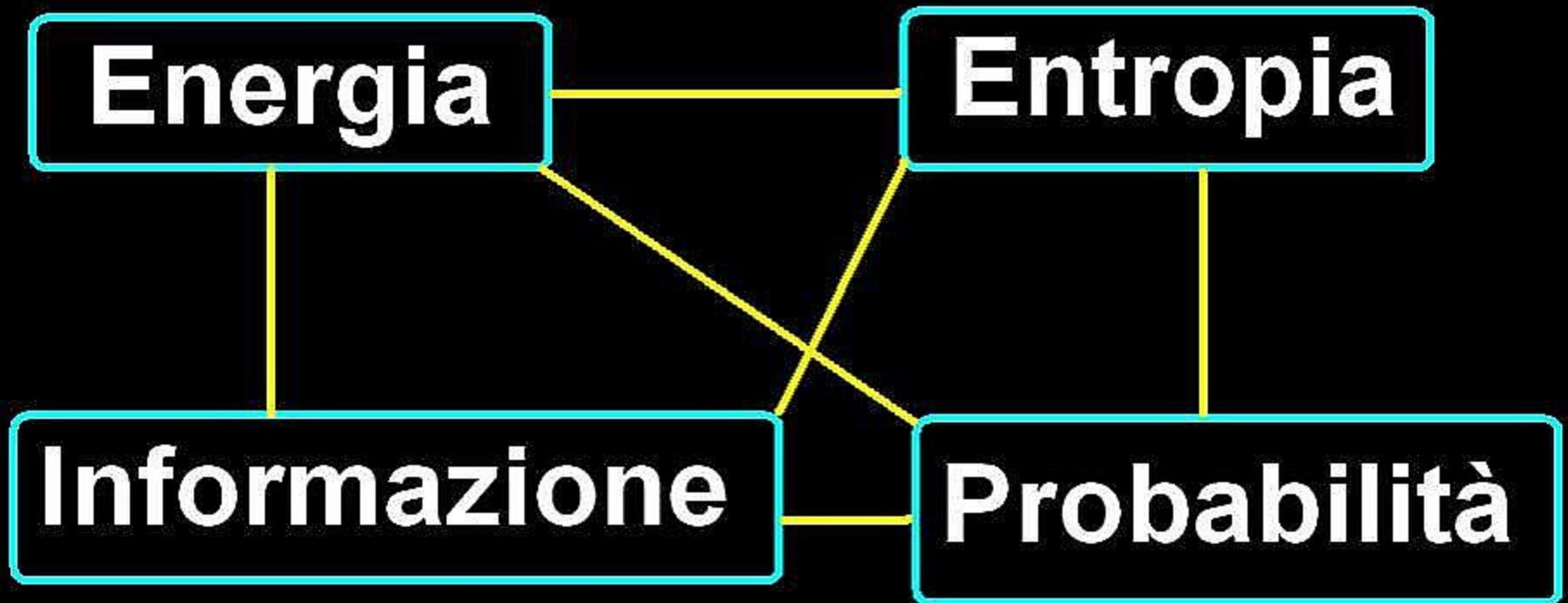
\hbar = Costante di Plank ridotta

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

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

Densità dell'Energia Oscura

Corrispondenze



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

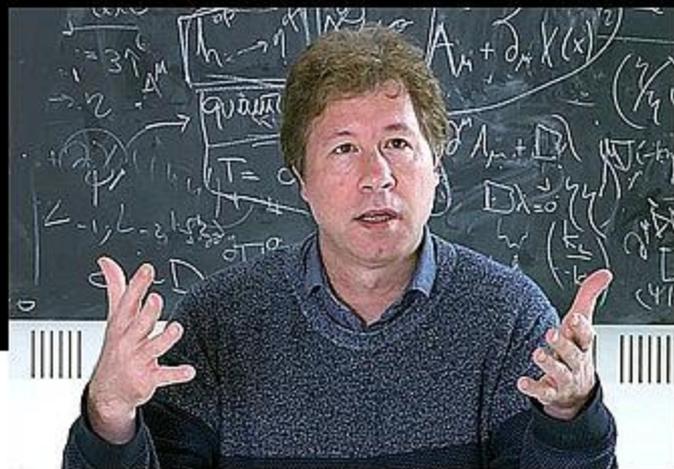
On the Origin of Gravity and the Laws of Newton

Erik Verlinde[□]

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 gravitation is not fundamental. The origin of gravity is identified as entropic.



Erik Verlinde

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:

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

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

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

Data una regione di spazio-tempo limitata da un guscio di area A , il numero N di bits di informazione in essa contenuti è dato da:

$$N = \frac{A}{\ell_{\text{P}}^2} \quad \text{bits}$$

dove ℓ_{P} è la lunghezza di Planck così definita:

$$\ell_{\text{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

Allora:

$$N = \frac{A \cdot c^3}{\hbar \cdot G} \quad \text{bits}$$

La corrispondente Energia E sarà data da:

$$E = \frac{1}{2} N \cdot k_B \cdot T$$

dove:

k_B è la costante di Boltzmann.

T è la temperatura

L'Energia può essere espressa anche come:

$$E = M \cdot c^2$$

e la temperatura T di una particella di massa M che si muove nello spazio vuoto con accelerazione a :

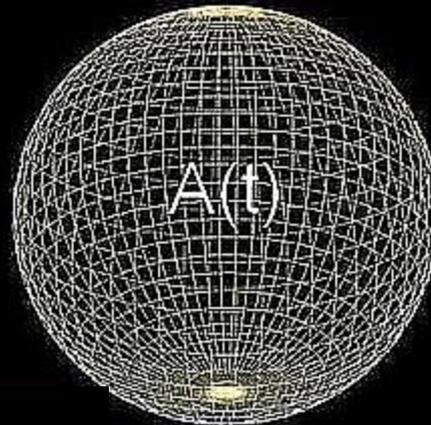
$$T = \frac{\hbar}{2\pi \cdot c \cdot k_B} \cdot a \quad (\text{Legge di Unruh})$$

Ricordiamo che:

$$F = m \cdot a$$

e poniamo:

$$A = 4\pi \cdot r^2$$



e quindi:

$$F = m \cdot \frac{4\pi \cdot c}{\hbar} \cdot \frac{E}{N}$$

e poi:

$$F = m \cdot \frac{4\pi \cdot c^3}{\hbar} \cdot \frac{M}{N}$$

cioè:

$$F = m \cdot 4\pi \cdot \frac{G \cdot M}{A}$$

e alla fine:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

(Legge di Newton)

Notiamo che il numero di bits N di informazione è uguale al numero di gradi di libertà del sistema considerato, quindi:

$$N = \frac{2 \cdot E}{k_B \cdot T} \quad \text{bits}$$

e:

$$N = \frac{A}{\ell_P^2} \quad \text{bits}$$

Ricordiamo che:

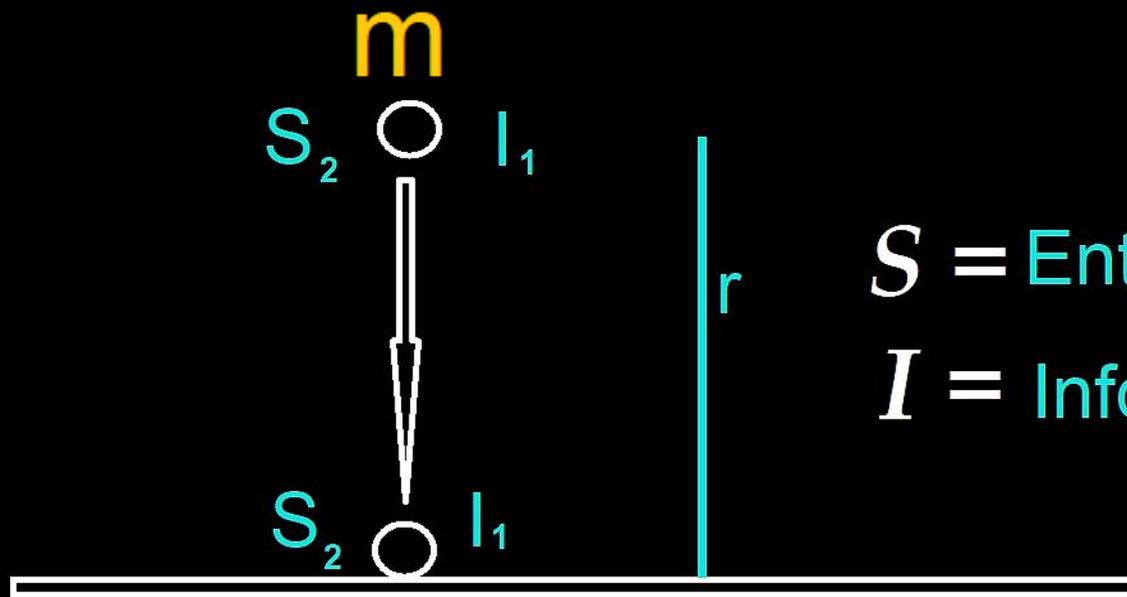
$$S = k_B \cdot \log_2(I)$$

dove:

S = Entropia

I = Informazione (bits)

Quando un corpo cade...



S = Entropia

I = Informazione (bits)

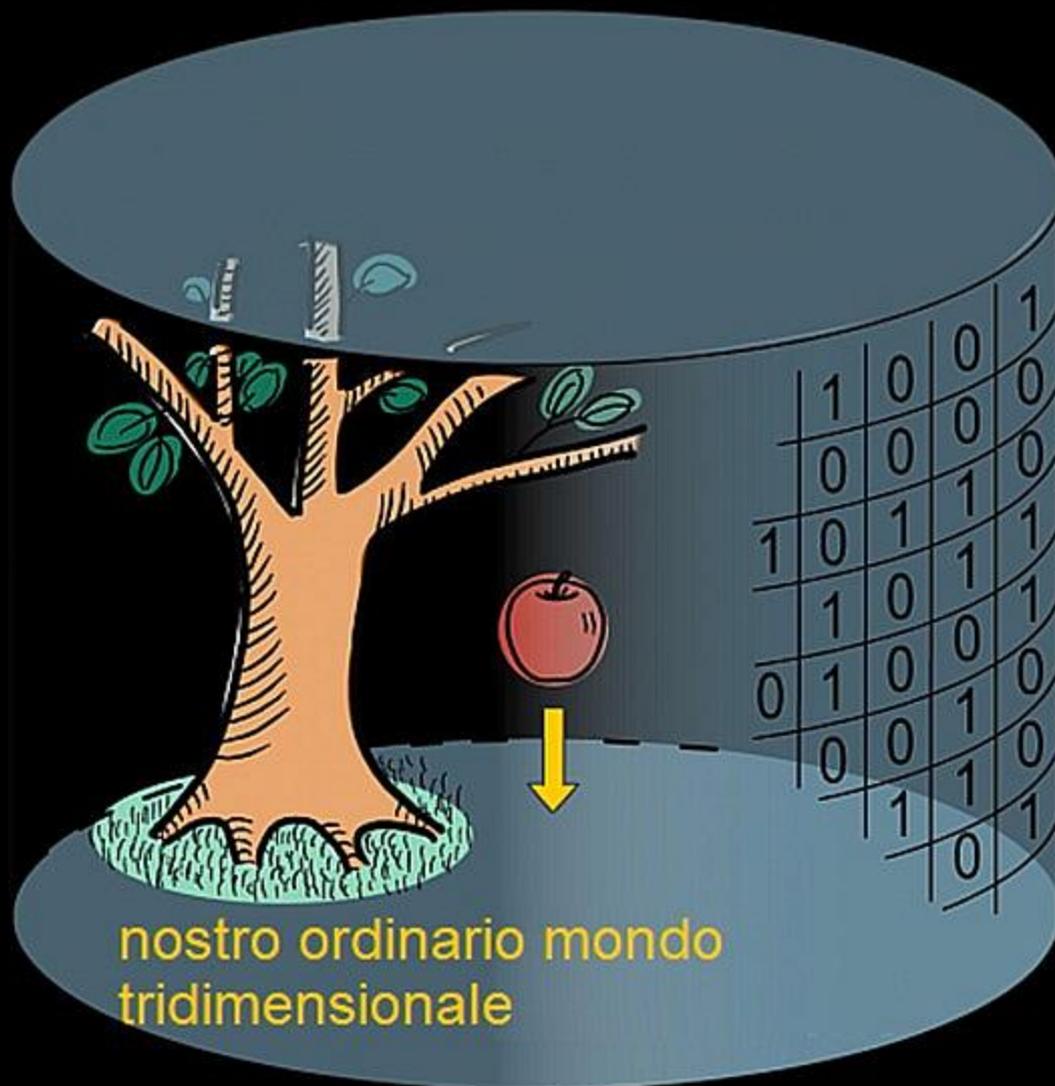
$$S = k_B \cdot \log_2(I)$$

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.

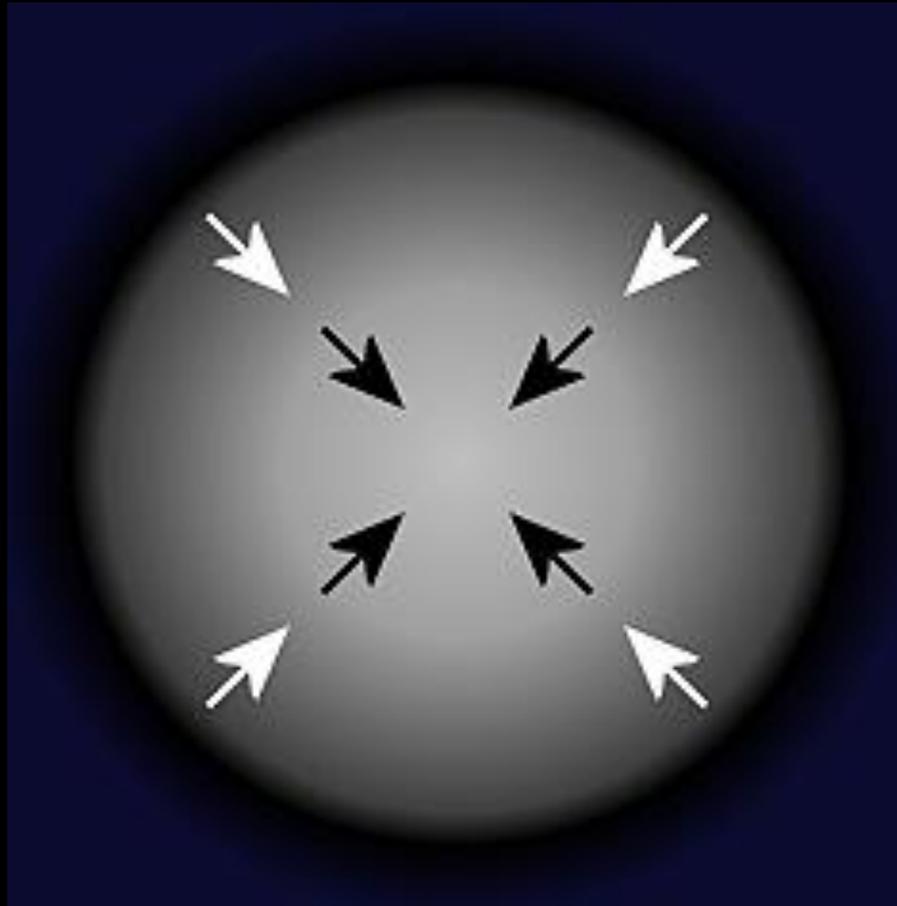
La Gravità corrisponde ad una variazione dell'Informazione nel Campo Informativo locale.

Gravità Entropica



Campo Informativo
Entropia
Informazione

Un collasso gravitazionale produce un aumento di Entropia...



Quindi...

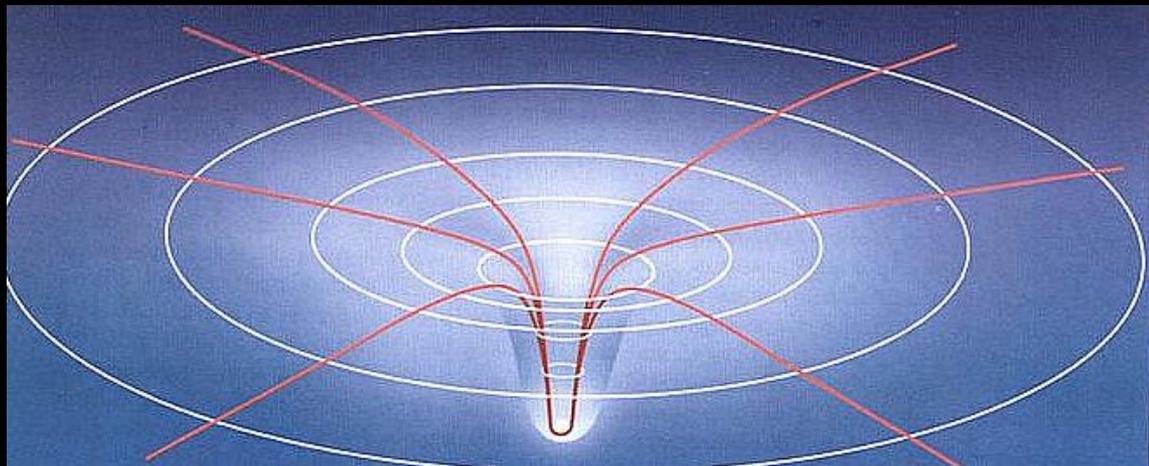


Le stelle si formano con un collasso gravitazionale.

Le stelle muoiono con un collasso gravitazionale...

L'Entropia sempre aumenta.....

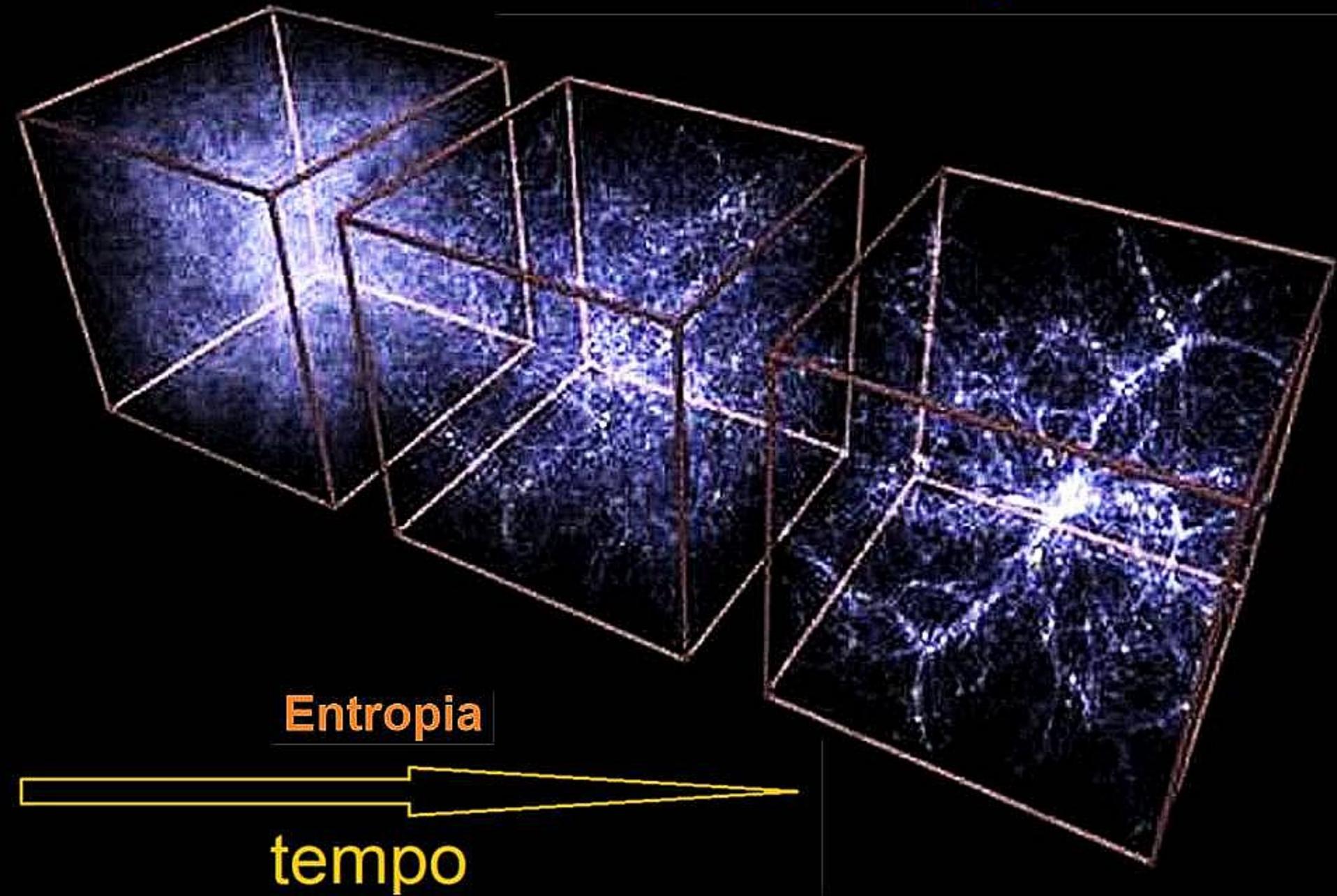
l'Informazione sempre aumenta...



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).

Effetti dell'Energia Oscura



Quanta informazione ha acquisito
l'Universo fino ad ora?

Il risultato è:

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

10^{122} bits è la massima informazione
codificabile nell'Universo

Forza / Gravità Entropica

<p>Forza Entropica</p>	$F_{\Theta} \Delta x = T \Delta S$ $F_{\Theta} = -\frac{G k_B^2}{c^4} \frac{\Theta_1 \Theta_2}{r^2}$ $F_{\Theta} = \frac{k_B^2}{\hbar c} \Theta_1 \Theta_2 \equiv \frac{\pi \mu_0}{\alpha c^2} \Theta_1 \Theta_2$	$F_{\Theta} = -k_B^2 \frac{\Theta_1 \Theta_2}{4\pi r^2}$	$F_{\Theta} = -k_B^2 \frac{\Theta_1 \Theta_2}{r^2}$
<p>Gravità Entropica - proposto da Erik Verlinde e Ted Jacobson</p>	$F_{\Phi} = \frac{F_N}{N} = \frac{F_N 4\pi r^2 \Theta}{l_P^2 T_{urub}} = m \frac{4\pi c}{\hbar} \frac{E}{N} = m \frac{4\pi c^3}{\hbar} \frac{M}{N} = m 4\pi \frac{GM}{r^2} = G \frac{mM}{r^2}$ $N = \frac{A_{BH}}{l_P^2} = \frac{4\pi r^2}{l_P^2} = \frac{4\pi r^2 c^3}{\hbar G}$ $F_{\Phi} = \frac{F_{\Theta}}{F_e} = -\frac{G k_B^2}{c^4 k_e} \frac{\Theta_1 \Theta_2}{q_1 q_2}$ $F_{\Phi} = \frac{\Phi^2 F_{\Theta}}{F_N} = \frac{k_B^2}{G} \frac{\Theta_1 \Theta_2}{m_1 m_2}$ $F_{\Phi} = -\frac{k_B^2}{k_e} = \frac{\Theta_1 \Theta_2}{q_1 q_2}$		

Unità di Planck

Dimensione	Formula	versione di Lorentz-Heaviside ^{[8][9]}	Versione gaussiana ^{[10][11]}	Valore di Lorentz-Heaviside ^{[12][13]}	Valore nel Sistema Internazionale gaussiano ^[14]
<u>Lunghezza di Planck</u>	Lunghezza [L]	$l_P = \sqrt{\frac{4\pi\hbar G}{c^3}}$	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$5,729475 \cdot 10^{-35} \text{ m}$	$1,616255(18) \cdot 10^{-35} \text{ m}$
Massa di Planck	Massa [M]	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{4\pi G}}$	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$6,139608 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$	$2,176434(24) \cdot 10^{-8} \text{ kg}$
Tempo di Planck	Tempo [T]	$t_P = \sqrt{\frac{4\pi\hbar G}{c^5}}$	$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$1,911147 \cdot 10^{-43} \text{ s}$	$5,391247(60) \cdot 10^{-44} \text{ s}$
Carica di Planck	Carica elettrica [Q]	$q_P = \sqrt{\varepsilon_0 \hbar c}$	$q_P = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 \hbar c}$	$5,290818 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,875545956(41) \cdot 10^{-18} \text{ C}$
Temperatura di Planck	Temperatura [Θ]	$\Theta_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{4\pi G \hbar_B^2}}$	$\Theta_P = \frac{m_P c^2}{\hbar_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G \hbar_B^2}}$	$3,996674 \cdot 10^{31} \text{ K}$	$1,416784(16) \cdot 10^{32} \text{ K}$

L = lunghezza, M = massa, T = tempo, Q = carica, Θ = temperatura.

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

$$c = \frac{l_P}{t_P}$$

$$G = \frac{l_P^3}{m_P t_P^2}$$

$$\hbar = \frac{m_P l_P^2}{t_P}$$