



Università della Terza Età "Cardinale Giovanni Colombo" – Milano

A.A. 2023 - 2024

Corso di Astrofisica

Docente : **Adriano Gaspani**

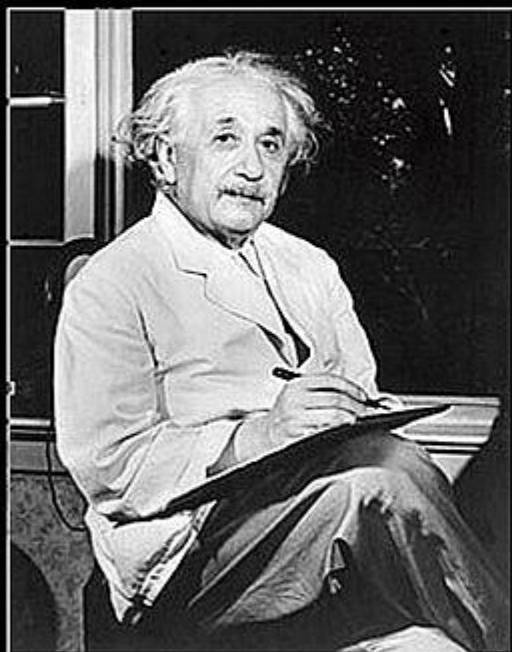
Lezione 4

**Possiamo comprendere
l'Universo?**

I modelli cosmologici attuali

Una questione interessante...

Einstein, rispondendo ad una lettera in cui gli si chiedeva:



“Perché la scienza moderna ... la tradizione di Galileo,..., Newton ... si sviluppò lungo le coste del Mediterraneo e dell’Atlantico, e non in Cina o in qualche altra parte dell’Asia?”

Caro signore, lo sviluppo della scienza occidentale è basato su **due grandi conquiste**, l’invenzione del **sistema logico formale** (nella geometria euclidea) da parte dei filosofi greci, e la scoperta della possibilità di trovare **relazioni causali tramite esperimenti sistematici (Rinascimento)**. Secondo me non si deve restare stupiti che i saggi cinesi non abbiano raggiunto questi risultati. **Il fatto stupefacente è che queste scoperte siano comunque state fatte.**

Sinceramente Vostro,

Albert Einstein

La Cosmologia

La cosmologia studia l'Universo ma allo stesso tempo essa rappresenta una delle discipline più creative e bizzarre della Scienza. I cosmologi spesso si '*divertono*' ad introdurre delle ipotesi, modelli e teorie fantastiche e suggestive, nella maggior parte dei casi non verificabili sperimentalmente, che tentano comunque di dare una spiegazione scientifica sull'origine dell'Universo. Vediamo allora una breve presentazione delle 10 teorie più '*creative*' della cosmologia moderna.

Il modello cosmologico standard

Nel 1929 Edwin Hubble, studiando il redshift di galassie distanti, scoprì che l'Universo si espande, e le galassie si allontanano l'una dall'altra ad una velocità data da un'espressione nota come

legge di Hubble



$$v = H_0 r$$



Edwin Hubble

v è la velocità di recessione della galassia, r la sua distanza dall'osservatore, e H_0 la costante di Hubble (oggi misurata accuratamente $H_0 \cong 70 \text{ km/s/Mpc}$).

NOTA: In realtà il redshift cosmologico non è in senso stretto interpretabile come effetto Doppler, infatti si ottiene facilmente $v > c$ per gli oggetti più distanti.

[1 Mpc \sim 3 milioni di anni luce $\cong 3 \times 10^{19}$ km]

PRINCIPALI ASSUNZIONI IN COSMOLOGIA:

PRINCIPIO COSMOLOGICO

-L'UNIVERSO SU LARGA SCALA E' ISOTROPO ED OMOGENEO

PRINCIPIO COPERNICANO

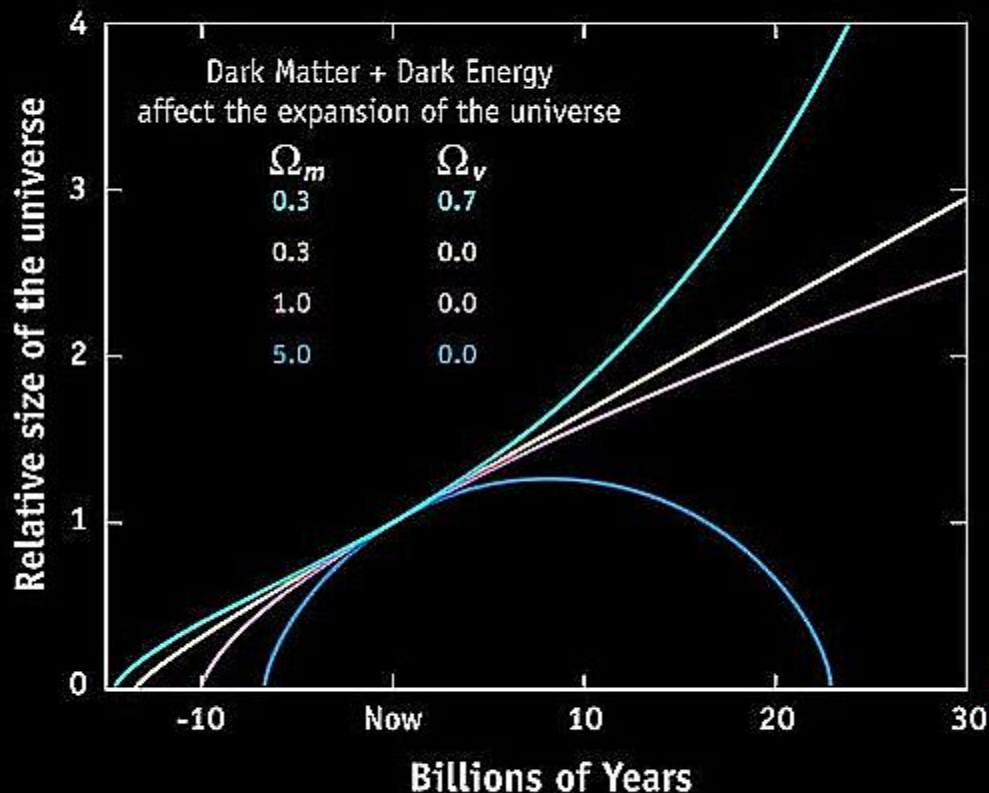
-NON OCCUPIAMO UNA POSIZIONE PRIVILEGIATA NELL'UNIVERSO

-NON ESISTONO POSIZIONI PRIVILEGIATE

IMPLICAZIONI DEL PRINCIPIO COSMOLOGICO

- LA DENSITA' MEDIA DELLA MATERIA E DELL'ENERGIA E' UGUALE IN TUTTO L'UNIVERSO.
- QUALSIASI OSSERVATORE NELL'UNIVERSO PERCEPISCE L'ESPANSIONE NELLO STESSO MODO.
- LA CURVATURA DELL'UNIVERSO E' LA STESSA IN OGNI LUOGO.

EXPANSION OF THE UNIVERSE



IN UN UNIVERSO COMPLETAMENTE
DOMINATO DALLA MATERIA
L'ESPANSIONE E'
REGOLATA DAL RAPPORTO
TRA LA DENSITA' CRITICA (ρ_c)
E LA DENSITA' OSSERVATA (ρ)

$$\Omega = \rho / \rho_c$$

RECENTI OSSERVAZIONI
SEMBRANO CONFERMARE CHE
CIRCA IL 70% DELL'UNIVERSO SIA
COSTITUITO DA UNA STRANA FORMA
DI ENERGIA CHE NE ACCELERA
L'ESPANSIONE

Teoria delle Stringhe e delle Brane

Il nostro Universo potrebbe essere racchiuso in una sorta di gigantesca membrana che fluttua in uno spazio multidimensionale e che ciclicamente va in rotta di collisione con la membrana di un universo parallelo?

Secondo il modello del '*mondo-brana*' della teoria delle stringhe, esistono altre dimensioni spaziali extra dello spazio che sono solamente raggiungibili dai gravitoni mentre noi siamo confinati nel nostro *universo-brana* caratterizzato dalle tre dimensioni a cui siamo abituati.

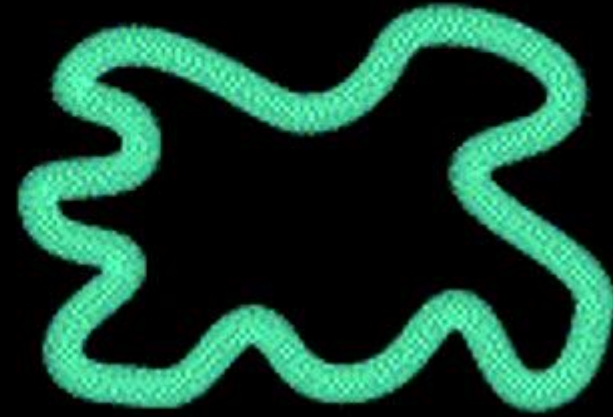
Se guardiamo a fondo dentro la materia troviamo delle.....



**I costituenti ultimi della
materia sono delle
minuscole cordicelle, dette
STRINGHE**



Stringa aperta

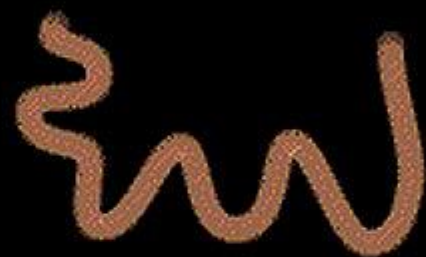


Stringa chiusa

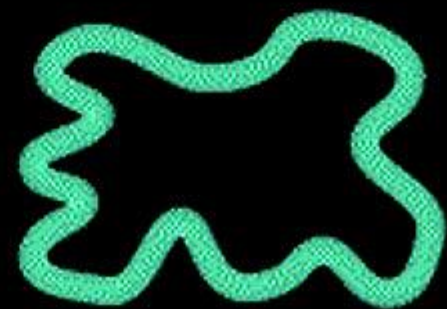
Lunghezza caratteristica 10^{-33} cm

Tra le varie “note” emesse dalla stringa ci sono:

- le particelle del modello standard

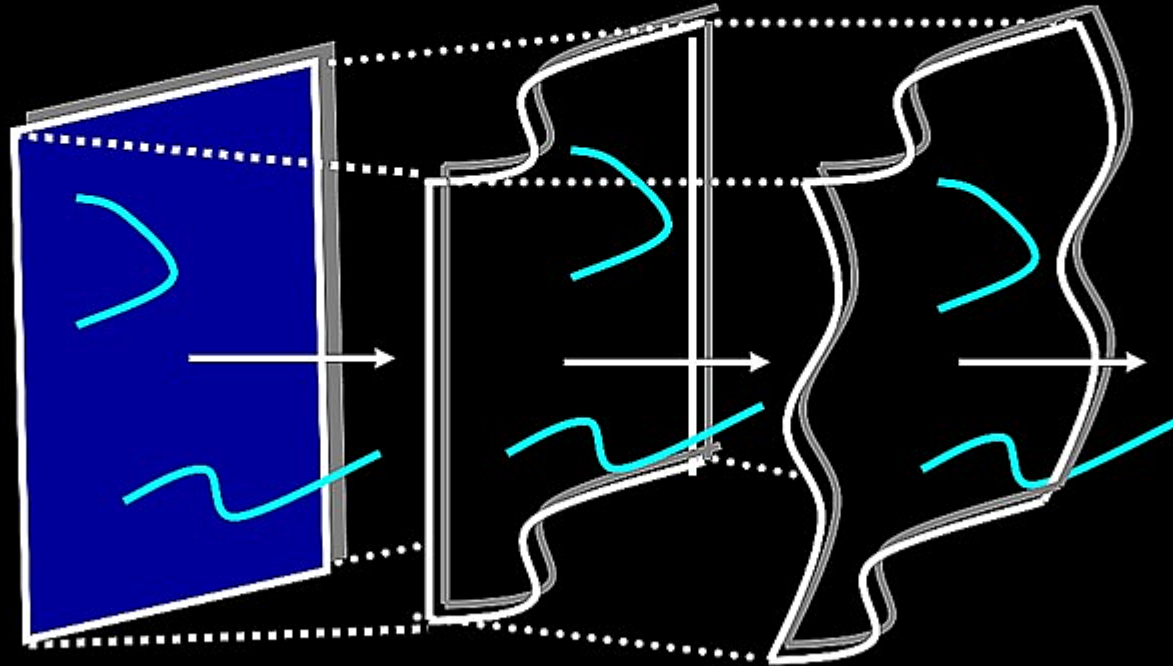


- il gravitone (mediatore della gravità)



p-brane

oggetti estesi p-dimensionali



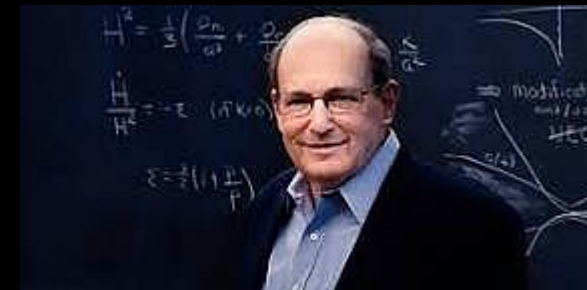
Le D_p -brane sono definite come le superfici a cui si attaccano gli estremi delle stringhe aperte.

Neil Turok dell'Università di Cambridge e Paul Steinhardt dell'Università di Princeton hanno provato a spiegare il Big Bang come conseguenza della collisione di due brane.

Queste collisioni si ripetono e danno luogo ad un nuovo '*big bang*' perciò, se il modello ciclico è corretto, il nostro Universo e gli altri universi potrebbero essere eterni.



Neil Geoffrey Turok (Johannesburg, 16 novembre 1958) è un fisico sudafricano, uno dei massimi esperti di teoria delle stringhe.



Paul J. Steinhardt (Washington, 25 dicembre 1952) è un fisico e cosmologo statunitense, "Albert Einstein Professor of Science" all'Università di Princeton.

Universi multipli

Quando la materia viene compressa fino a raggiungere densità estreme al centro di un buco nero, essa può rimbalzare all'indietro e dar luogo ad un '*nuovo universo neonato*'.

Qui, le leggi della fisica potrebbero essere differenti rispetto a quelle dell'universo da cui si origina e ciò determina una sorta di evoluzione di universi, una idea suggerita da Lee Smolin del Perimeter Institute.

Lee Smolin (New York, 6 giugno 1955) è un fisico teorico statunitense



Gli universi in cui esistono tanti buchi neri produrranno tanti universi neonati e alla fine essi saranno la popolazione dominante del multiverso.

Se poi viviamo in un universo tale da possedere leggi e costanti fisiche che ottimizzano la produzione dei buchi neri, questa rimane una domanda aperta.

Come apparirebbe un buco nero da «vicino»



immagine rifratta del
disco di accrescimento

immagine rifratta del
disco di accrescimento

Multiverso



Lo Spazio-Tempo superfluido

Una delle teorie più avanzate della moderna cosmologia suggerisce che lo spazio-tempo è in definitiva una sostanza superfluida che 'scorre', per così dire, con una viscosità nulla.

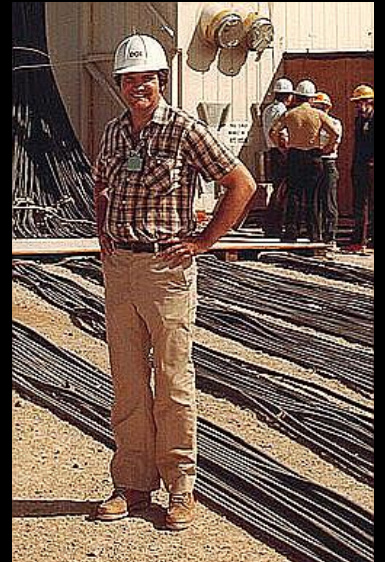
Se l'Universo è dotato di un moto di rotazione, allora lo spazio-tempo superfluido dovrebbe essere caratterizzato da vortici, secondo Pawel Mazur dell'Università della Carolina del Sud e George Chapline del Lawrence Livermore Laboratories.



Questi vortici rappresenterebbero quei '*siti cosmici*' dove si sono formate le prime strutture che hanno successivamente dato luogo alla formazione delle galassie.

Mazur suggerisce che il nostro Universo sarebbe nato dal collasso gravitazionale di una stella dove la combinazione della materia stellare con lo spazio superfluido avrebbero dato luogo all'*Energia Oscura*, quella misteriosa forza che sta causando una accelerazione all'espansione dell'Universo.

George Frederick Chapline Jr. (born May 6, 1942) is an American theoretical physicist,



Il "*nostro Universo*"

Perché il nostro Universo possiede le "*giuste*" leggi della fisica da permettere l'esistenza della vita?

Se le costanti fisiche fossero poche non avremmo più stelle, o materia o e, forse, l'Universo durerebbe solo un battito di ciglia.

Una risposta a questa domanda è il "*principio antropico*": in altre parole, l'Universo che vediamo *deve* ospitare la vita altrimenti noi non saremmo qui ad osservarlo.

Le costanti fondamentali della Fisica

Archimedes' constant		π	3.1415926535897932385...
natural logarithmic base		e	2.718281828...
golden ratio		Φ	1.618033989...
Ramanujan-Soldner constant	μ		1.4513692349...
speed of light in a vacuum		c	$2.99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
gravitational constant		G	$6.67259... \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$
universal gas constant		R	$8.314510... \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Avogadro constant	N_A		$6.0221367... \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann constant	k		$1.380658... \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Stefan-Boltzmann constant		σ	$5.67051... \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
molar volume of ideal gas at STP		V_m	$2.241409... \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
permittivity constant	ϵ_0		$8.85418781762 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
permeability constant		μ_0	$1.25663706143 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$
elementary charge	e		$1.60217733... \times 10^{-19} \text{ C}$
Plank constant		h	$6.6260755... \times 10^{-34} \text{ J s}$
electron mass		m_e	$9.1093897... \times 10^{-31} \text{ kg}$
proton mass		m_p	$1.6726231... \times 10^{-27} \text{ kg}$

...e molte altre...

Di recente, questa idea ha avuto molti consensi perché il modello dell'inflazione cosmica suggerisce che dovrebbero esistere una infinità di universi là fuori e la *teoria delle stringhe* indica che questi infiniti universi devono essere caratterizzati da altrettante infinite leggi fisiche.

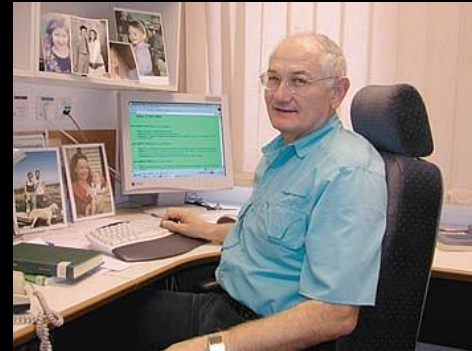
Bisogna, però, dire che molti cosmologi non accettano il *principio antropico* perché da un lato non si tratta di vera e propria scienza e dall'altro non fornisce previsioni che possono essere verificate sperimentalmente.

La Teoria MOND

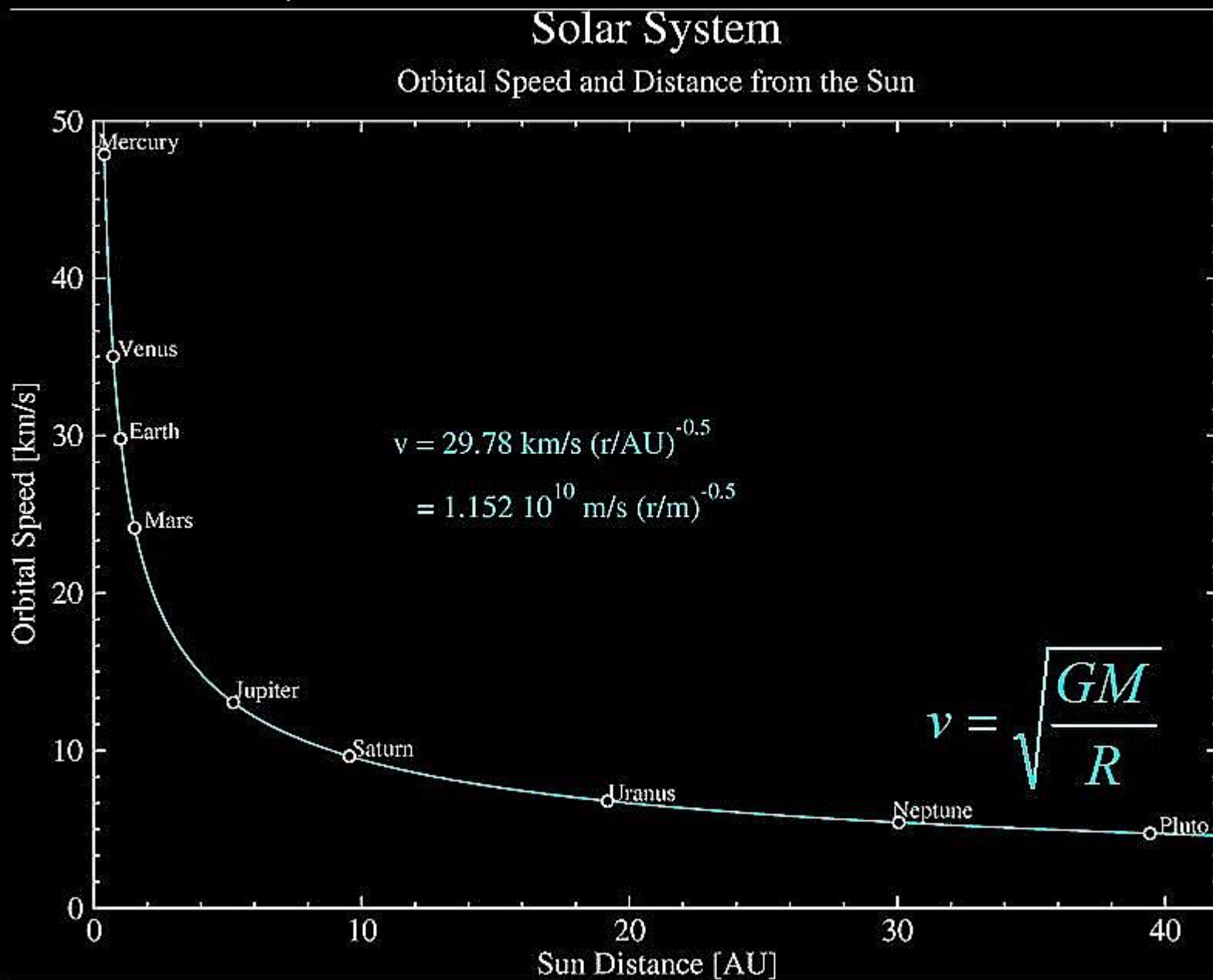
La materia scura potrebbe non essere in definitiva una sostanza fisica ma legata ad un diverso comportamento della forza di gravità.

La teoria MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*), proposta da Mordehai Milgrom, suggerisce che la gravità non diventa più debole con l'aumentare della distanza così come vuole la legge della gravitazione universale.

Mordehai Milgrom (Iasi, 1946) è un fisico israeliano



Solar System Rotation Curve



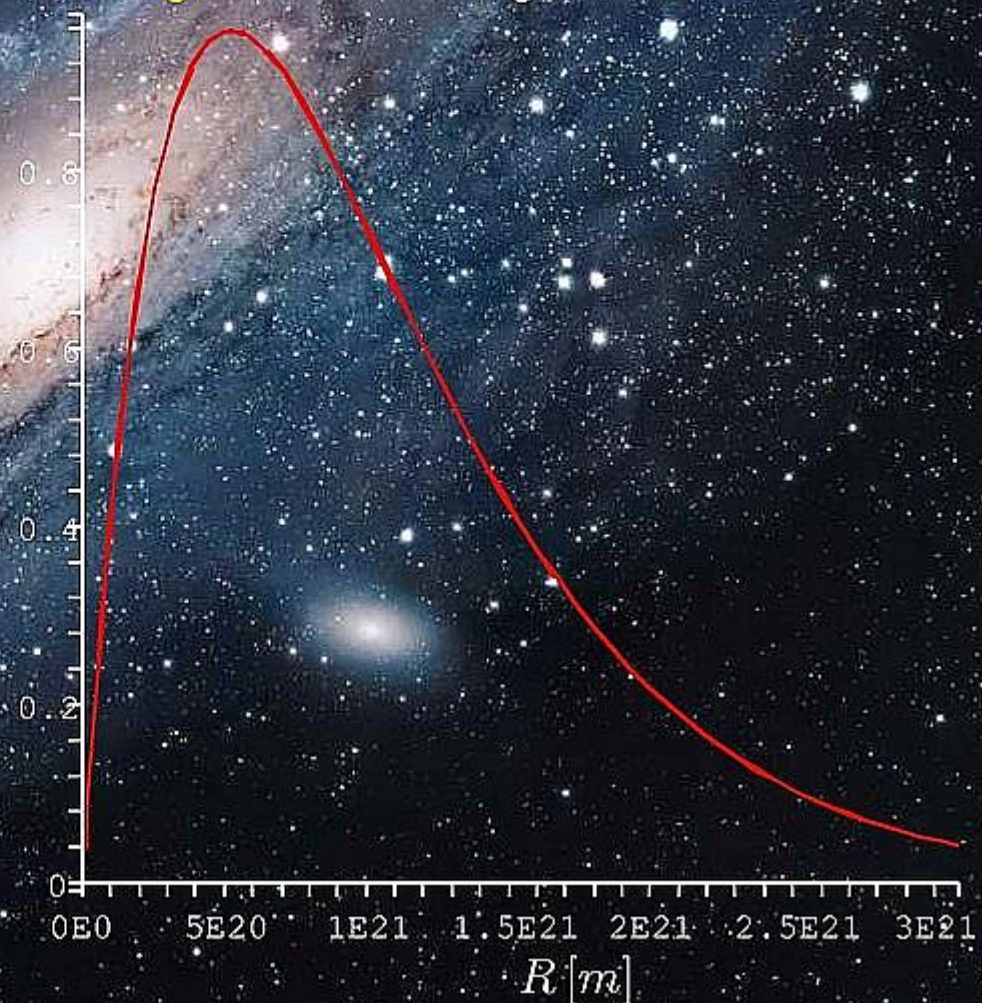
Galaxies

The laws of physics concerning (Newtonian) gravitation seem to be transferrable from laboratory scales to the solar system.

We are confident, they are valid even on larger scales like galaxies.

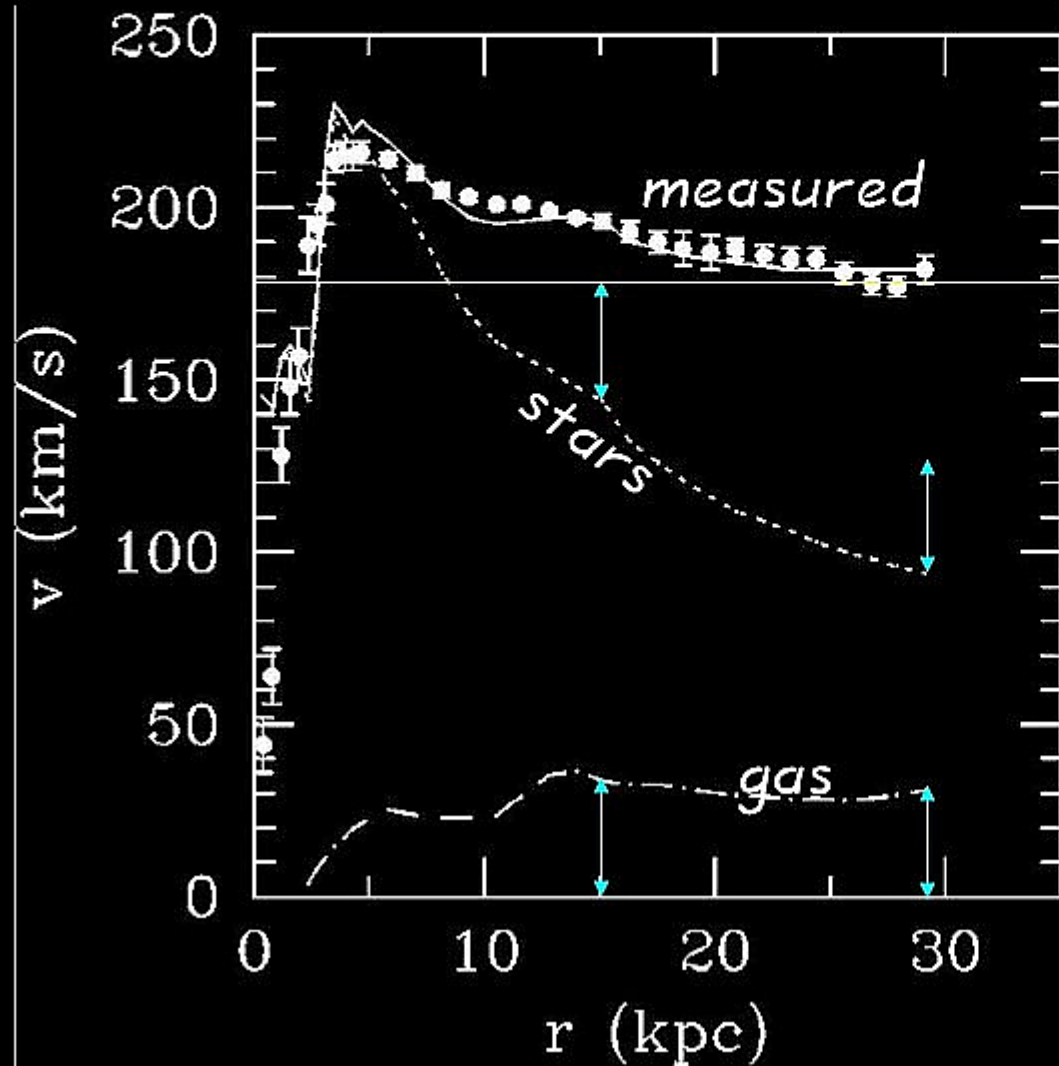
Rotation curve:

$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$



Rotation Curves of Galaxies

Observations *contradict* theoretical predictions.



1. Orbital velocities are too high.

2. Rotation curves stay flat.

$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

„Dark Matter“

MOND

Milgrom (1983)

Modified Newtonian Dynamics

based on Newtonian, *non-relativistic* gravitational theory

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

modification of inertia

$$\mu(x) = \begin{cases} x & \text{if } 0 < x \ll 1 \\ 1 & \text{if } x \gg 1 \end{cases}$$

$$g_N = g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right)$$

modification of gravity

$$F = m \cdot \frac{a^2}{a_0} \quad \text{if } a \ll a_0$$

$$g = \sqrt{g_N a_0} \quad \text{if } g \ll a_0$$

New fundamental constant: $a_0 \approx 1 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s^2}$ (empirical)

$$a_0 \approx \frac{cH_0}{2\pi} = 1.1 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s^2}$$

Might be a coincidence.

MOND

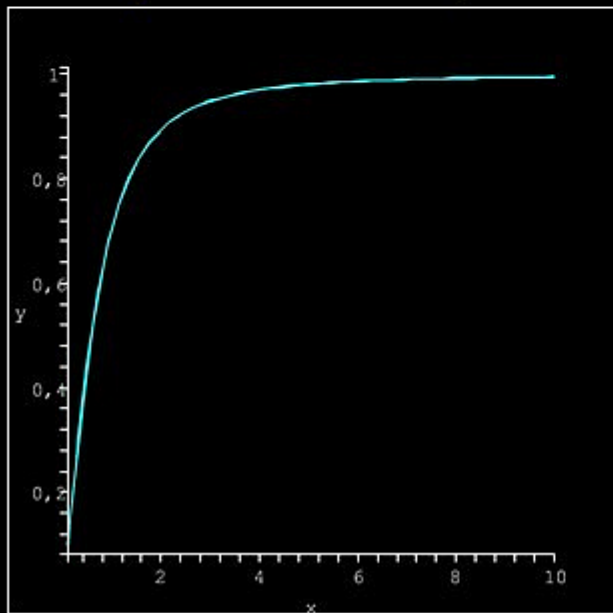
Modified Newtonian Dynamics

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

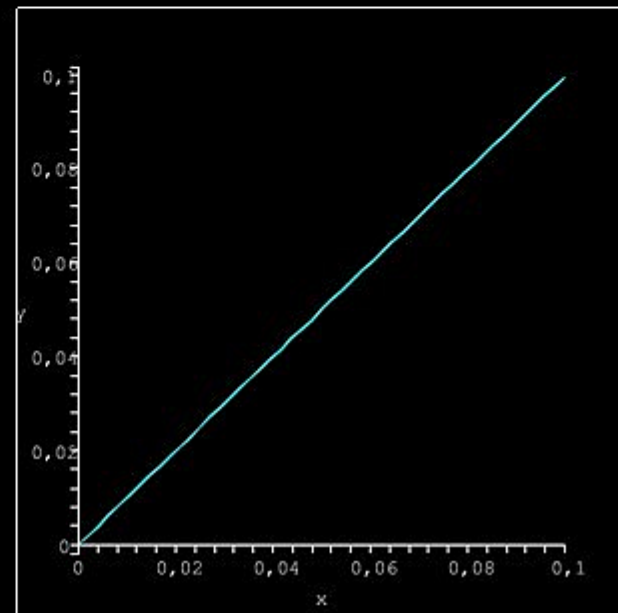
$$g_N = g \cdot \mu\left(\frac{g}{a_0}\right)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} x & \text{if } 0 < x \ll 1 \\ 1 & \text{if } x \gg 1 \end{cases}$$

analytic form of μ unknown, often assumed to be like:



$$\mu(x) = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$$



MOND

Modified Newtonian Dynamics

$$F_g = m \cdot \frac{a^2}{a_0} \quad \text{if} \quad a \ll a_0$$

Gravitational forces in bound systems mostly Newtonian.

$$R_{\text{Mond}} = \sqrt{\frac{GM}{a_0}}$$

Only at large distances from the central mass (e.g. in galaxies), the acceleration declines below a_0 ($R = 11.8$ kpc for $M = 10^{11} M_{\odot}$).

In our solar system, the gravitational acceleration of all planets lies well above a_0 .

But: $a = a_0$ for $R = 7700$ AU \Downarrow Oort Cloud

Rotation Curves with MOND

What is the rotation velocity with MOND, where $g \ll a_0$?

Gravitational acceleration: $g = \sqrt{g_N a_0} = \sqrt{\frac{GMa_0}{R^2}}$

Centrifugal force: $F_c = \frac{mv^2}{R} = m \cdot a$

$$\frac{\sqrt{GMa_0}}{R} = \frac{v^2}{R}$$

$$a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{R}$$

$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$v = (GMa_0)^{1/4}$$

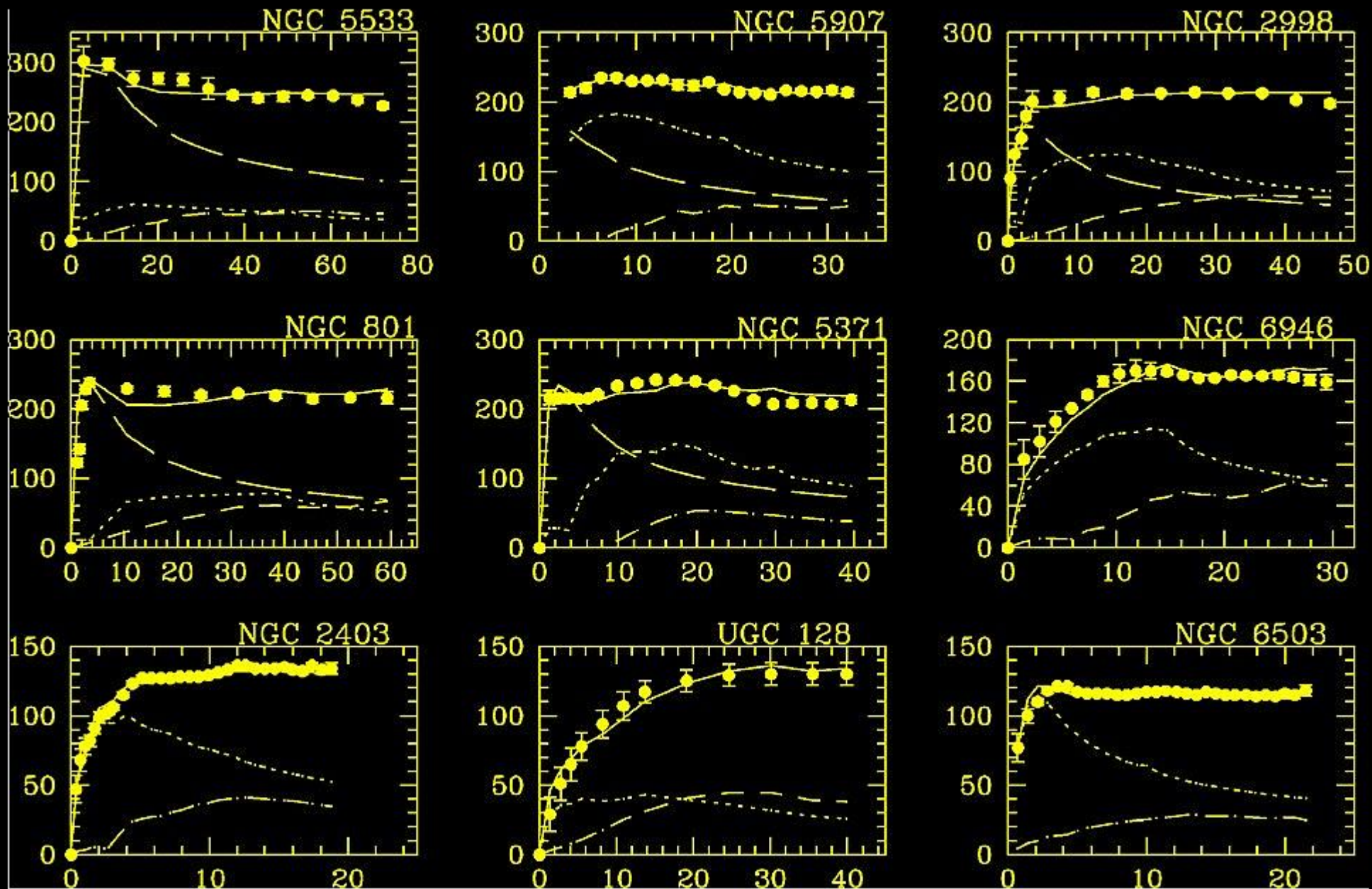
For a given mass, the rotation velocity converges to a constant value.

This is in accord with observations.

$$\Rightarrow v^4 \sim L$$

Tully-Fisher

Rotation Curves with MOND



Questa sorta di '*gravità potente*' potrebbe sostituirsi alla Materia Oscura che tiene unite le galassie e gli ammassi di galassie visto che altrimenti si disperderebbero nello spazio.

Una nuova formulazione della teoria MOND, consistente con le osservazioni, ha raccolto vari consensi da parte degli scienziati nonostante non descriva alcune proprietà della radiazione cosmica di fondo.

Difficulties and Problems with MOND

MOND is derived from classical Newtonian Gravitational Theory, and therefore is incompatible with General Relativity.

Just like Newtons Gravity, MOND cannot give reliable answers to:

- Cosmology
- Relativistic Phenomena



La Quintessenza

Tre misteri della cosmologia moderna potrebbero essere considerati come un tutt'uno.

Dopo la revisione della teoria della relatività generale, un gruppo di fisici hanno trovato una strana sostanza che emerge dalla loro teoria: il cosiddetto “*condensato fantasma*” chiamata anche “*Quintessenza*”.

Questa sostanza è in grado di produrre una forza gravitazionale repulsiva che guida, per così dire, l'inflazione cosmica per poi generare una accelerazione dello spazio che viene attribuita all'Energia Oscura.

In più, se questa sostanza si aggrega può formare la Materia Oscura.

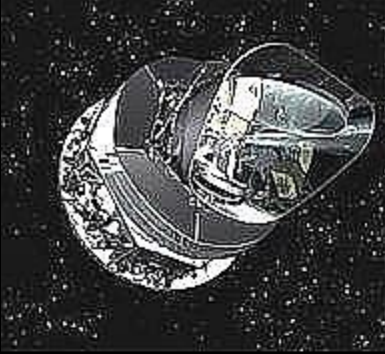
Effetti dell'Energia del Vuoto (Energia Oscura)



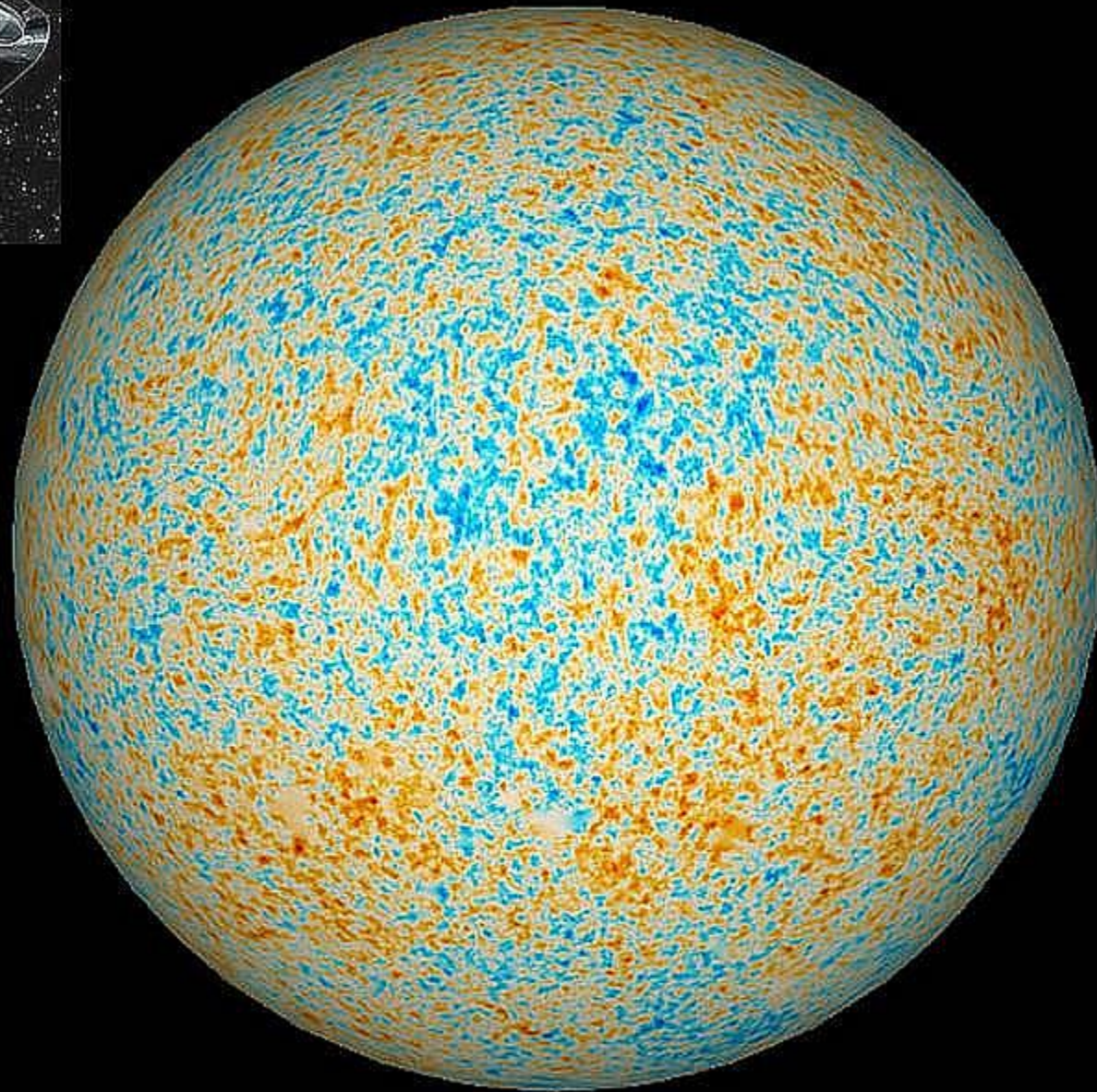
Un Universo piccolo, piccolo

La mappa a '*spot*' della radiazione cosmica di fondo presenta una peculiarità sorprendente: ci sono pochi '*spot*' di grande dimensione.

Una possibile spiegazione è data dal fatto che l'Universo potrebbe essere '*piccolo*', così piccolo che, tornando all'epoca in cui si è originata la radiazione cosmica, non è stato in grado di trattenere, per così dire, questi enormi '*blob*'.



Planck
2018



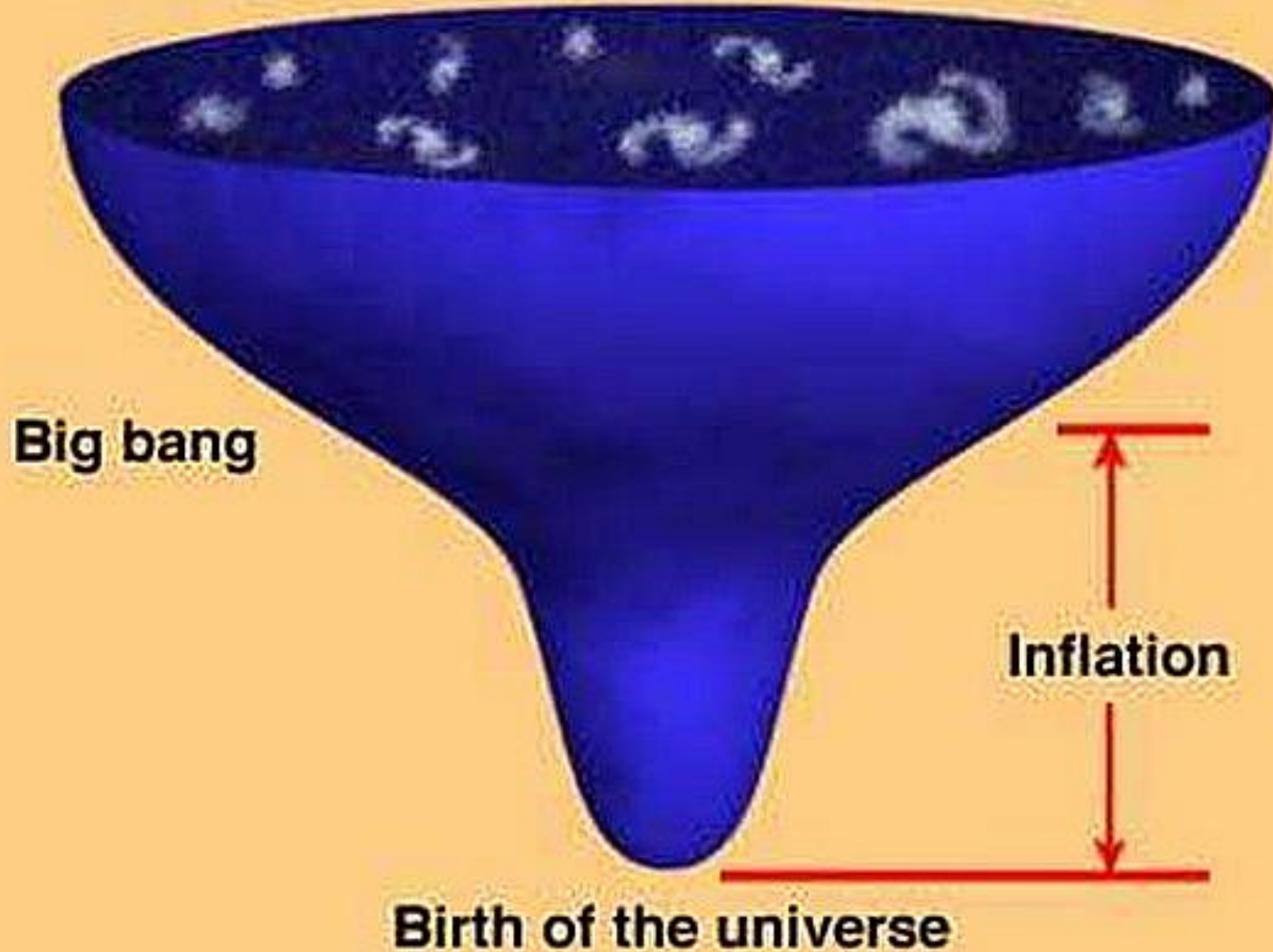
CMB flux (Cosmic Microwaves Background)
anisotropia termica

Se ciò è vero, questo vuol dire che lo spazio si deve essere *'riavvolto'*, in qualche modo, su se stesso.

Ma l'ipotesi più strana è che l'Universo abbia una forma a imbuto.

La curvatura dello spazio piegata all'indietro potrebbe determinare la forma geometrica degli spot di piccole dimensioni facendogli assumere forme più ellittiche come quelle osservate.

Universe according to the inflation theory



Una volta la luce andava più veloce?

Come mai regioni opposte dell'Universo mostrano lo stesso aspetto?

E' un vero e proprio enigma dato che le regioni più distanti dell'Universo osservabile oggi non dovrebbero essere state mai in contatto tra loro.

Anche se andiamo all'inizio del tempo quando queste aree di cielo si trovavano molto vicine tra loro, si pensa che non ci sia stato abbastanza tempo per cui la luce, o forse qualcosa d'altro che ignoriamo, abbia viaggiato da una regione all'altra.

Questo discorso vale anche per la distribuzione della temperatura e della densità.

Si pensa che una soluzione è che la luce si sia propagata molto più velocemente, anche se per ammettere una tale ipotesi dovremmo rovesciare la Teoria della Relatività.

...ma forse no! Nessuno sa come veramente era la situazione nell'Universo primordiale.

I Neutrini sterili

La materia scura potrebbe essere costituita dalle particelle più elusive che siano mai state immaginate: i neutrini sterili.

Si tratta di particelle ipotetiche, più pesanti, insomma una specie di cugini dei normali neutrini che dovrebbero interagire con la materia solo attraverso effetti di tipo gravitazionale, un processo che li rende essenzialmente difficili da rivelare.

Nonostante ciò, i neutrini sterili potrebbero avere le giuste proprietà per formare la cosiddetta materia scura "*tiepida*" e muoversi con velocità dell'ordine di qualche chilometro al secondo.

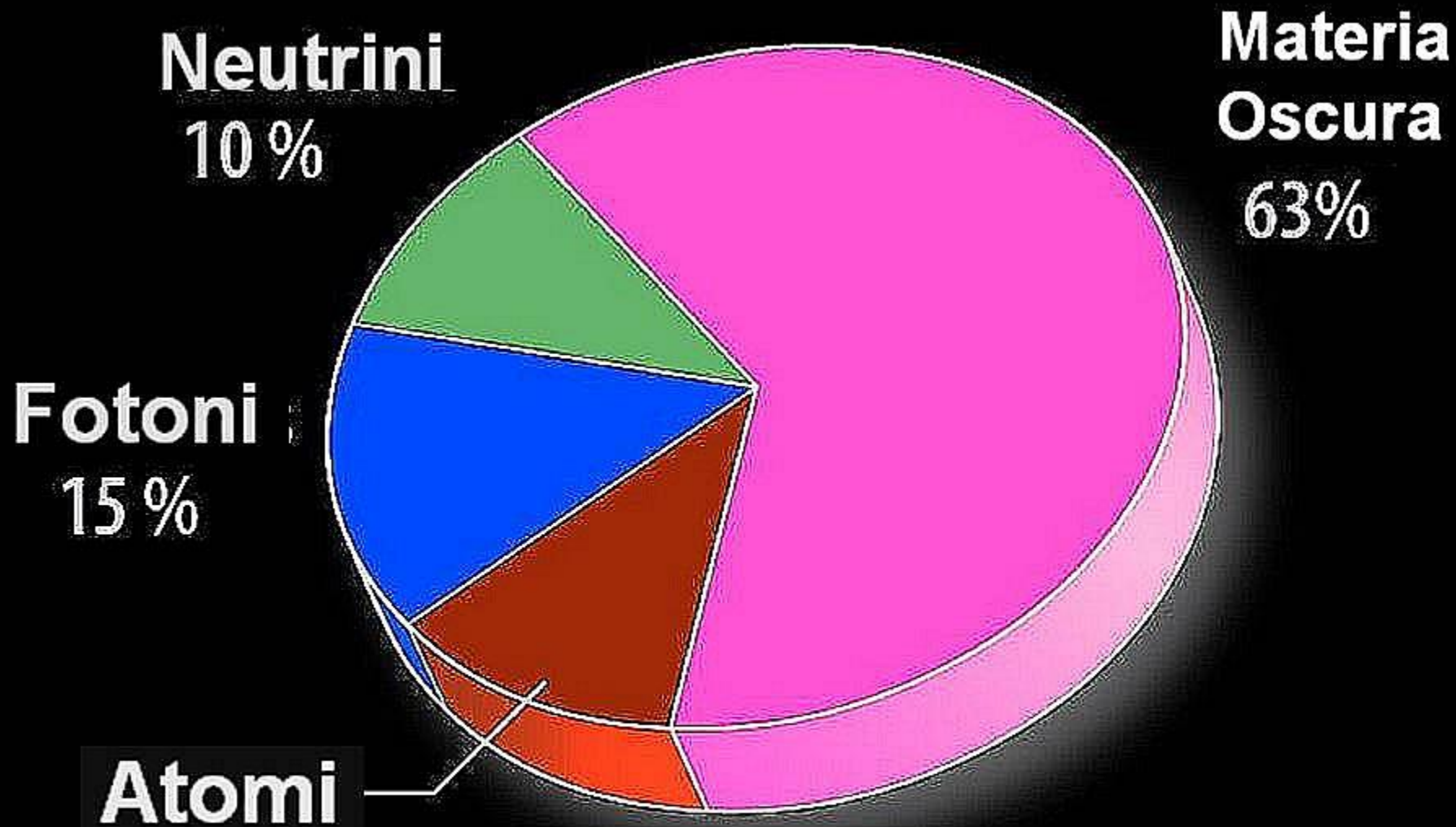
Queste particelle *esotiche* potrebbero poi aver aiutato, per così dire, la formazione delle stelle e dei buchi neri nell'Universo primordiale e potrebbero essere la causa che spinge le stelle di neutroni a girovagare attorno alla nostra galassia.

L'Universo è una simulazione?

Forse, il nostro Universo non è reale.

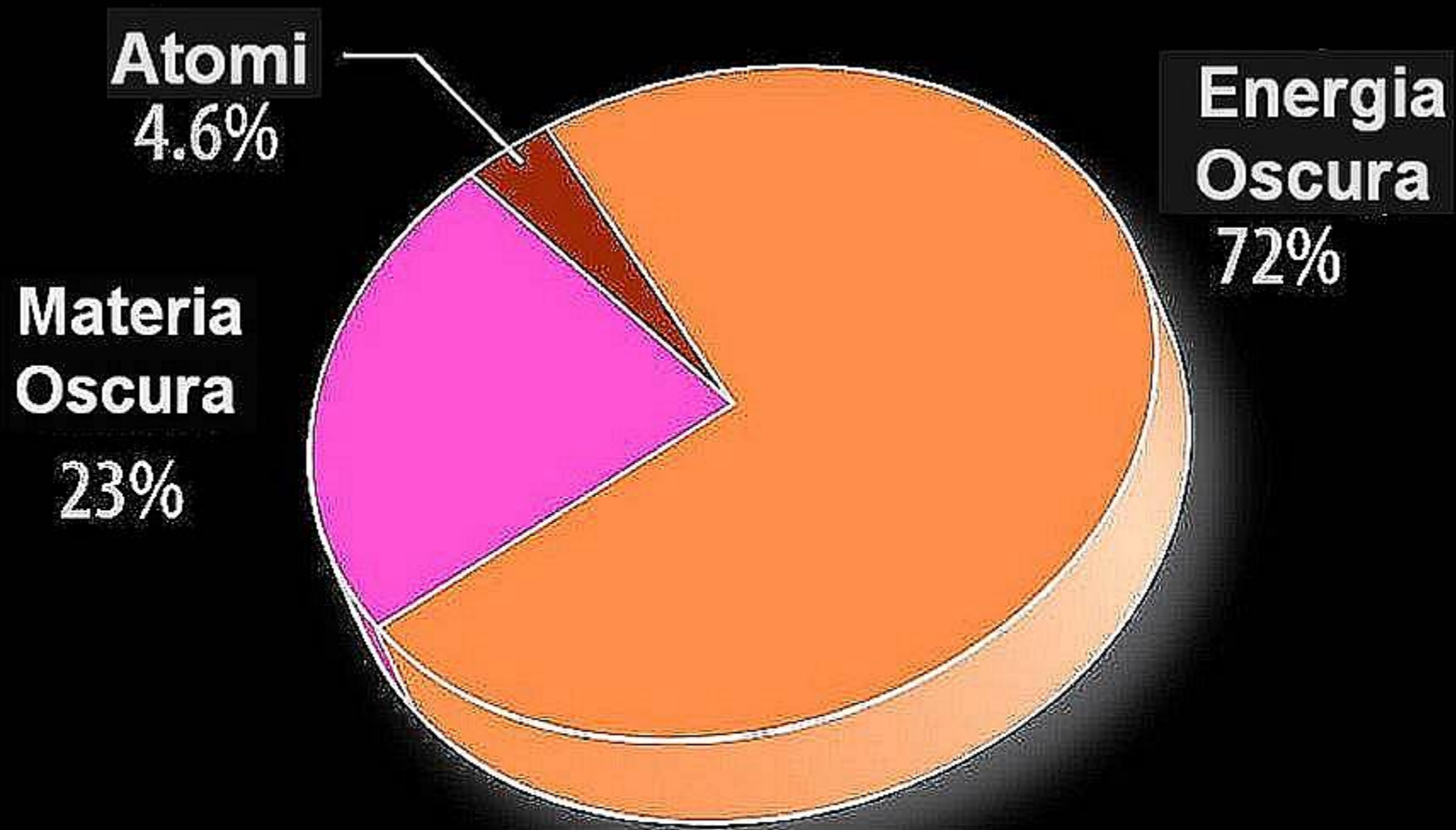
Il filosofo Nick Bostrom ha suggerito una ipotesi in base alla quale noi viviamo all'interno di una simulazione creata al computer.

Insomma, gli universi sarebbero delle simulazioni e dunque noi siamo abbastanza fortunati a vivere all'interno di una di esse.



13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)

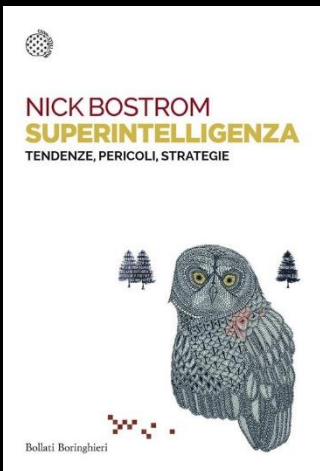


Oggi

Ma allora, tutte le stranezze cosmologiche, come la Materia Oscura o l'Energia Oscura, sono semplicemente degli artefatti creati apposta per mascherare alcune inconsistenze che sono presenti nella simulazione?



Nick Bostrom (10 marzo 1973) è un filosofo svedese, noto per le sue riflessioni sul cosiddetto rischio esistenziale dell'umanità e sul principio antropico.



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

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 :

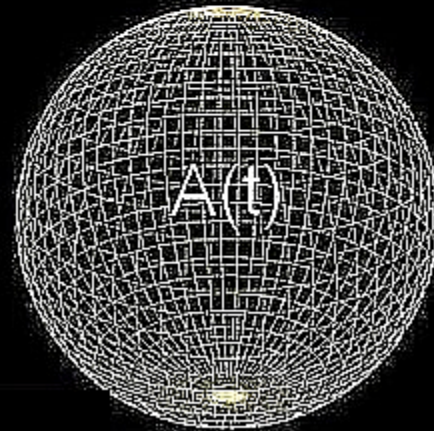
$$T = \frac{\hbar}{2\pi \cdot c \cdot k_B} \cdot a \quad (\text{Legge di Unruh})$$

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:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \quad (\text{Legge di Newton})$$

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:

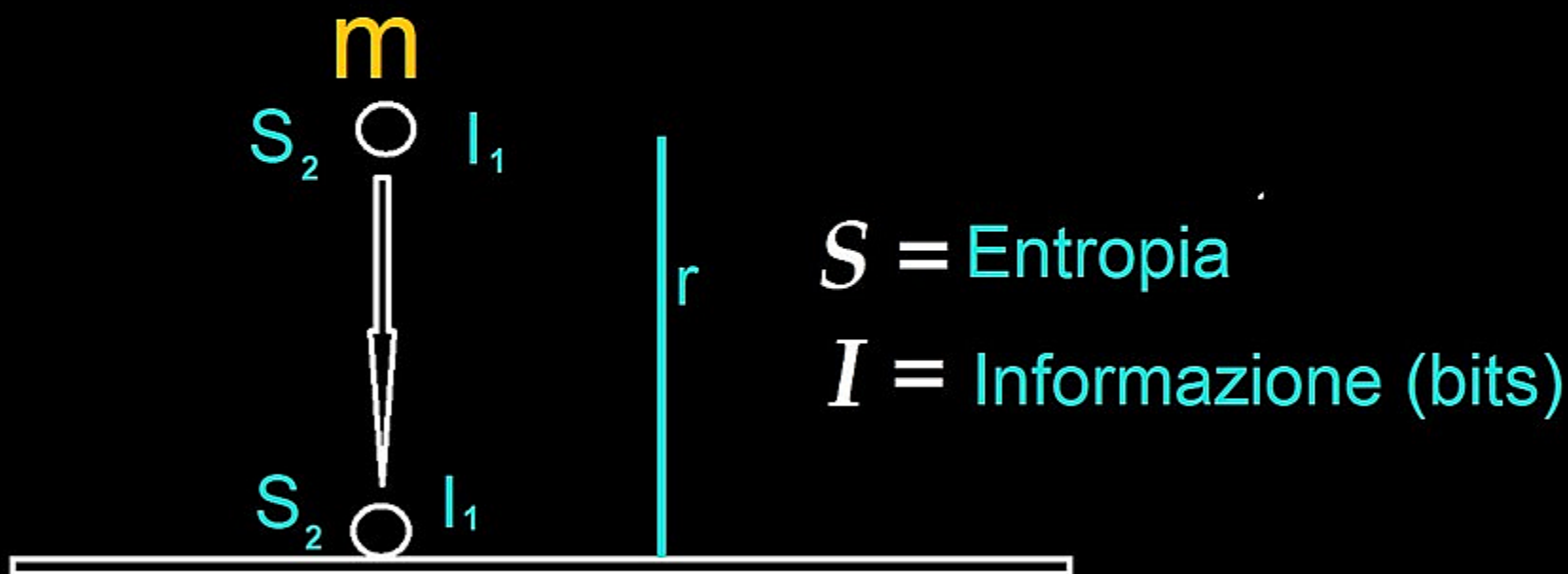
$$S = k_B \cdot \log_2(I)$$

dove:

S = Entropia

I = Informazione (bits)

Quando un corpo cade...



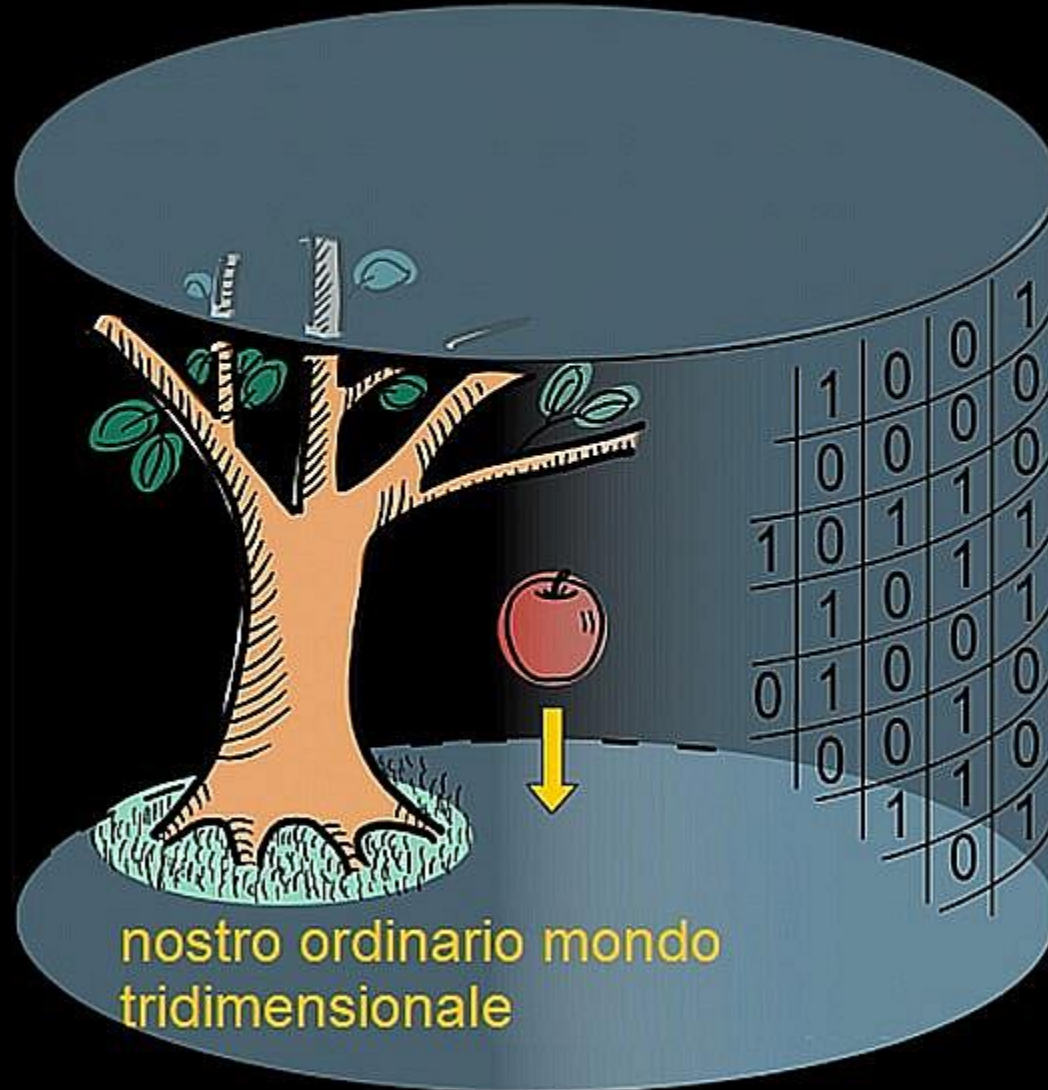
$$S = k_B \cdot \log_2(I)$$

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.

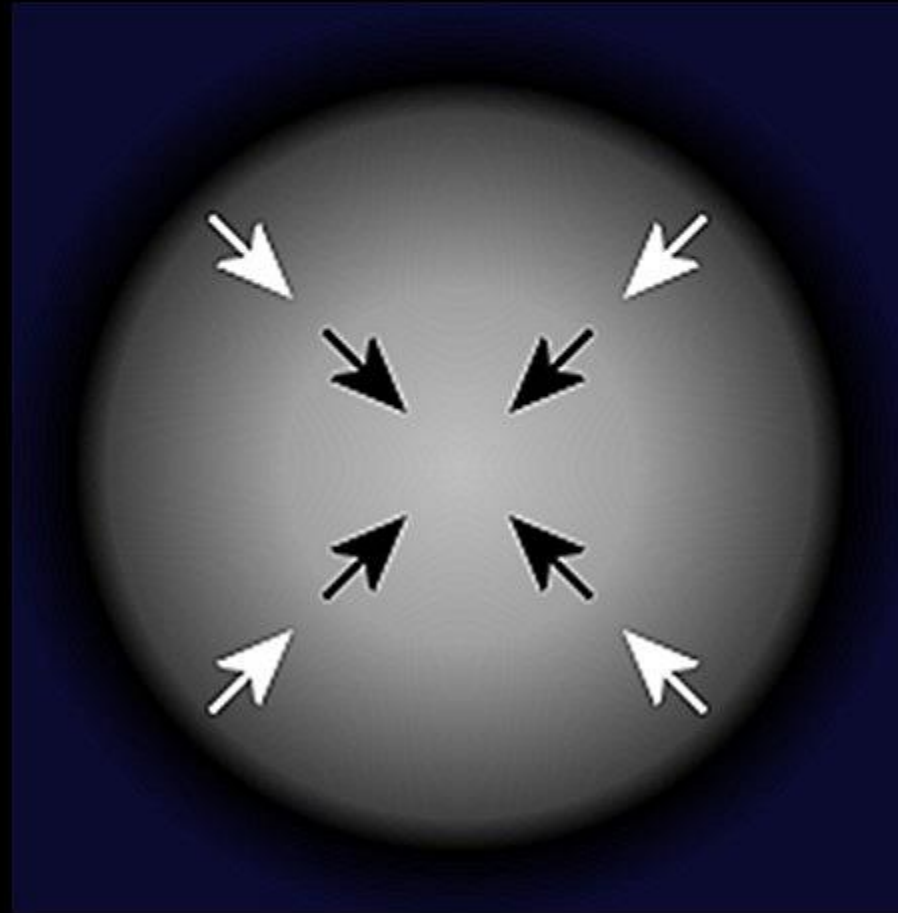
La Gravità corrisponde ad una variazione dell'Informazione nel Campo Informativo locale.

Gravità Entropica



Campo Informativo
Entropia
Informazione

Un collasso gravitazionale produce un aumento di Entropia...



Quindi...

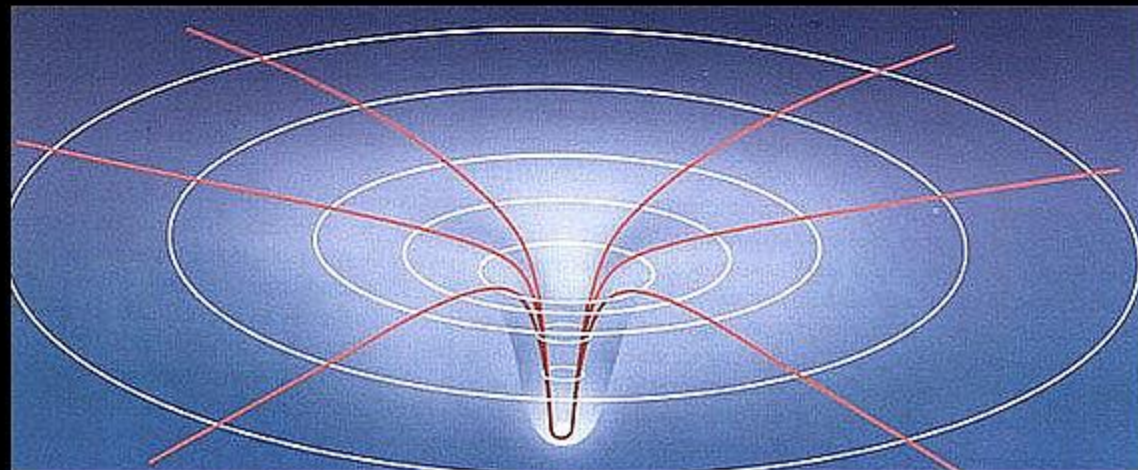


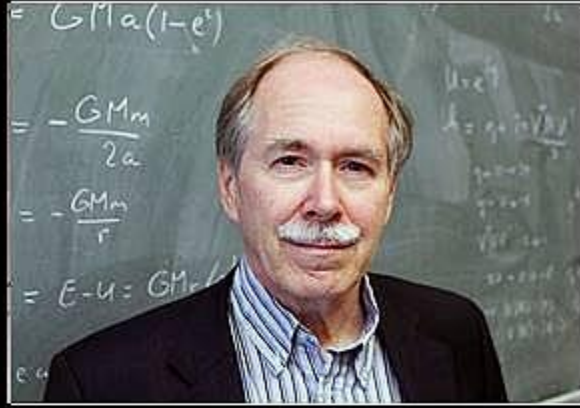
Le stelle si formano con un collasso gravitazionale.

Le stelle muoiono con un collasso gravitazionale...

L'Entropia sempre aumenta.....

l'Informazione sempre aumenta...





Gerardus (Gerard) 't Hooft



Leonard Susskind

Nel 1993 Gerard 't Hooft e Leonard Susskind proposero il

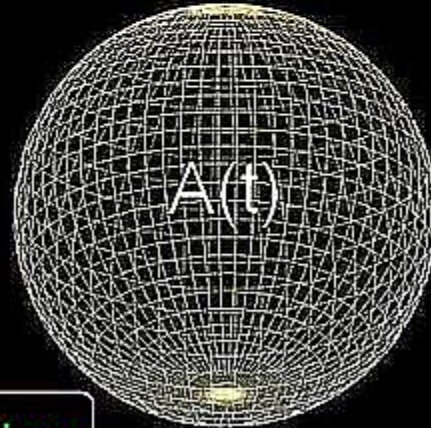
"Principio Olografico"

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

Il Principio Olografico

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

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



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

valore massimo

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

Universo \Rightarrow BH

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

Universo bidimensionale

