



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

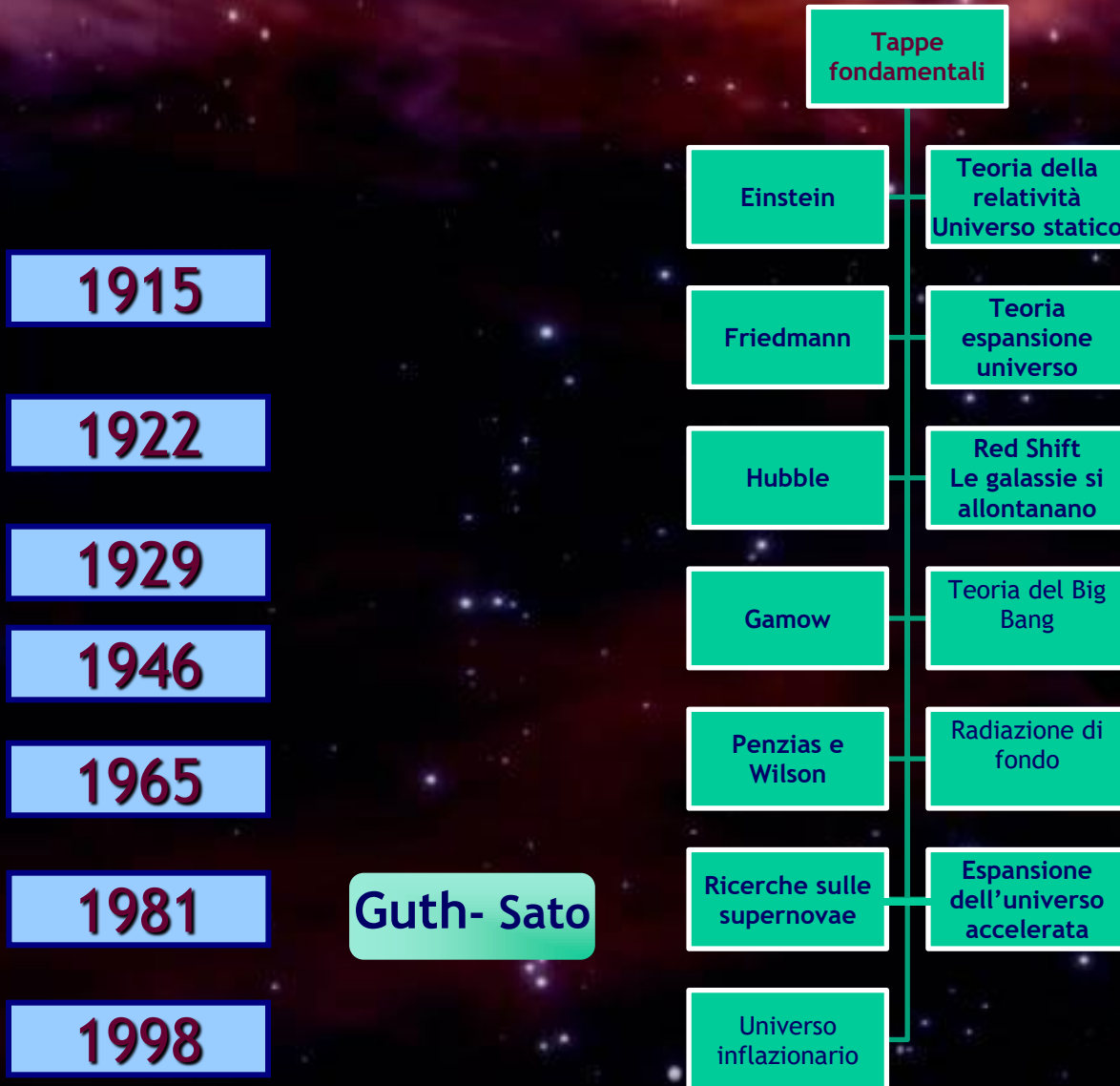
Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

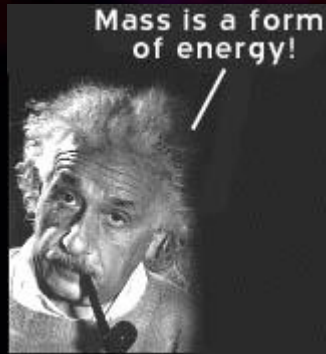
Lezione 5

La Dinamica dell'Espansione  
dell'Universo: l'Inflazione

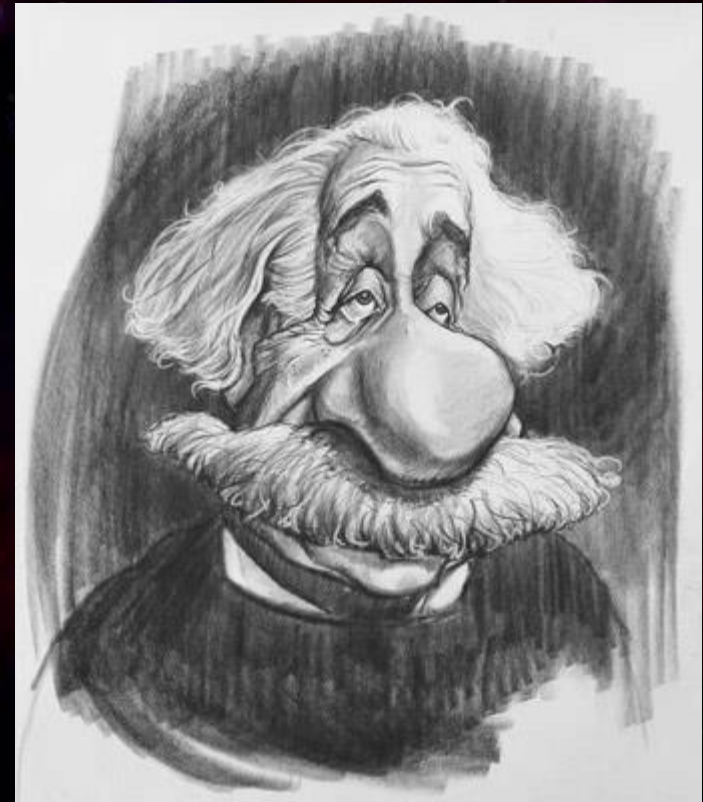
# Cronologia delle scoperte



# Il grande non-errore di Einstein



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



# Il grande non-errore di Einstein

- Fu un errore di Albert Einstein a dare il via allo studio sulle origini dell'universo. Fino agli inizi del secolo, le leggi della meccanica classica di Isaac Newton prevedevano che il tempo scorresse sempre e ovunque a una velocità fissa e che lo spazio si estendesse all'infinito in modo uniforme.
- Si credeva insomma in un cosmo infinito e immutabile,
- e non si vedeva la necessità di speculare su un inizio e un'evoluzione dell'universo.

# La staticità dell'universo

- ❖ Nel 1916, Einstein pubblicò la teoria della relatività generale e provò ad applicarla alla struttura dell'universo, concludendo che il cosmo si va contraendo sotto l'azione delle forze gravitazionali esercitate da galassie, stelle ecc.
- ❖ Ma poiché all'epoca si pensava che l'universo fosse perenne e immutabile, Einstein aggiunse nella sua teoria una "costante cosmologica", che creava una forza repulsiva in grado quindi di opporsi alla contrazione dell'universo.

# Equazione di Einstein classica:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

# Equazione di Einstein modificata:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^2} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

$\Lambda$  = costante cosmologica

Questo implica che:

$$\rho_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{8\pi G} c^2$$

$\rho_{\Lambda}$  = densità di energia oscura  
(energia del vuoto)



La pressione  $p$  sarà quindi:

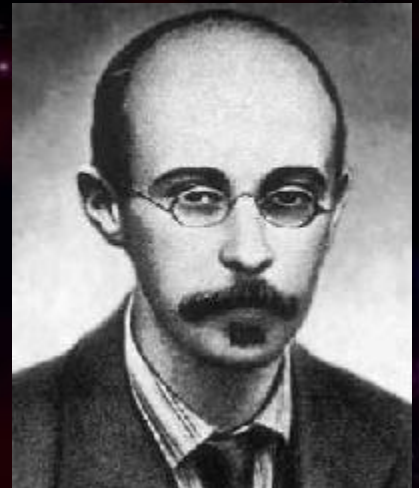
$$p = - \rho_{\Lambda} c^2$$

che essendo negativa è  
antigravitazionale

...fa espandere l'Universo.

# La teoria di Friedmann

- ❖ *L'uomo che scoprì l'espansione dell'Universo*
- ❖ La teoria di Einstein fu poi perfezionata da un giovane matematico russo, **Aleksandr Aleksandrovich Friedmann** (1888-1925), che ipotizzò tre possibilità a proposito dell'evoluzione dell'universo in base alla densità della materia che contiene.



# Equazioni di Friedmann

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

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

$a$  = Raggio dell'Universo (fattore di scala)

$\dot{a}$  = Velocità di espansione

$\ddot{a}$  = Accelerazione dell'espansione

$\rho$  = Densità media della materia

$p$  = Pressione

$c$  = Velocità della luce

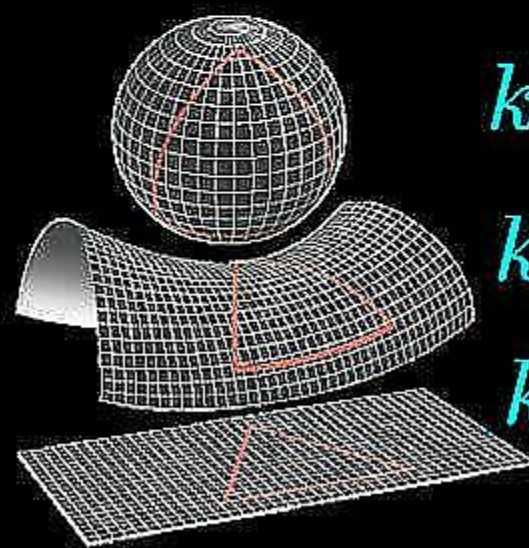
$G$  = Costante di Gravitazione Universale

$\Lambda$  = Costante cosmologica

$k$  = Parametro di curvatura



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



$k=+1$

$k=-1$

$k=0$

# La teoria di Friedmann

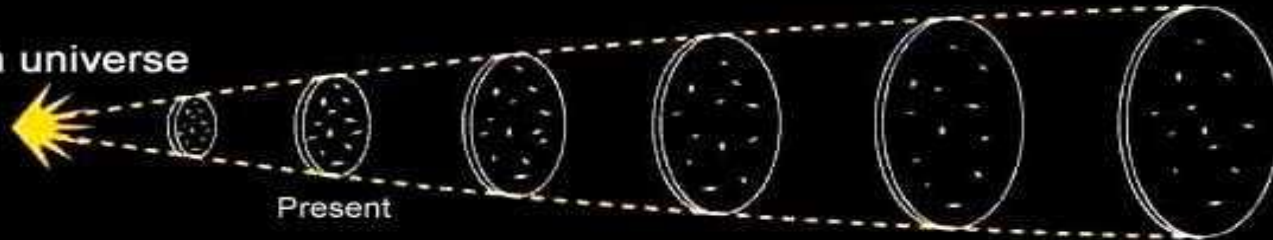


- ❖ un universo in continua espansione,
- ❖ uno che a un certo punto cessa di espandersi e comincia a contrarsi,
- ❖ un altro ancora che continua a espandersi ma di poco e a velocità moderata.

# La teoria di Friedmann

## Open universe

Big Bang



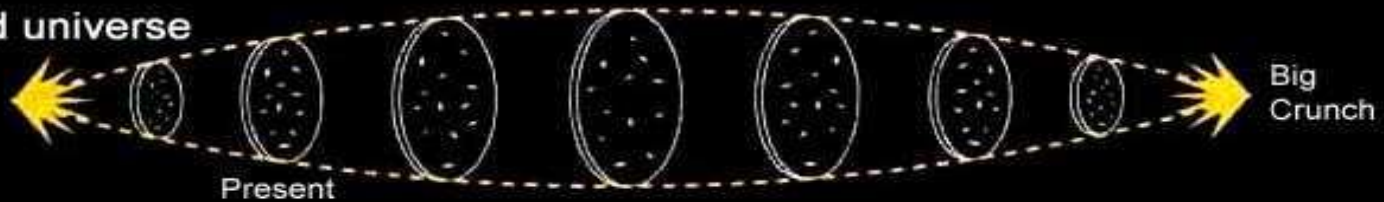
## Flat universe

Big Bang



## Closed universe

Big Bang



# Il Red Shift

Nel 1929, l'astronomo americano Edwin Hubble mostrò che l'universo è in espansione. Misurando la distanza che ci separa da galassie lontane, provò a stabilire a quale velocità si stessero allontanando.

Telescopio di Hubble



# L' "effetto Doppler"

Pensate a quando passa un'ambulanza e il suono della sirena diventa da più acuto più grave: è l'"effetto Doppler", dovuto alle variazioni della lunghezza delle onde a seconda della distanza della fonte sonora.

# L' "effetto Doppler"

sorgente  
in avvicinamento



sorgente  
ferma



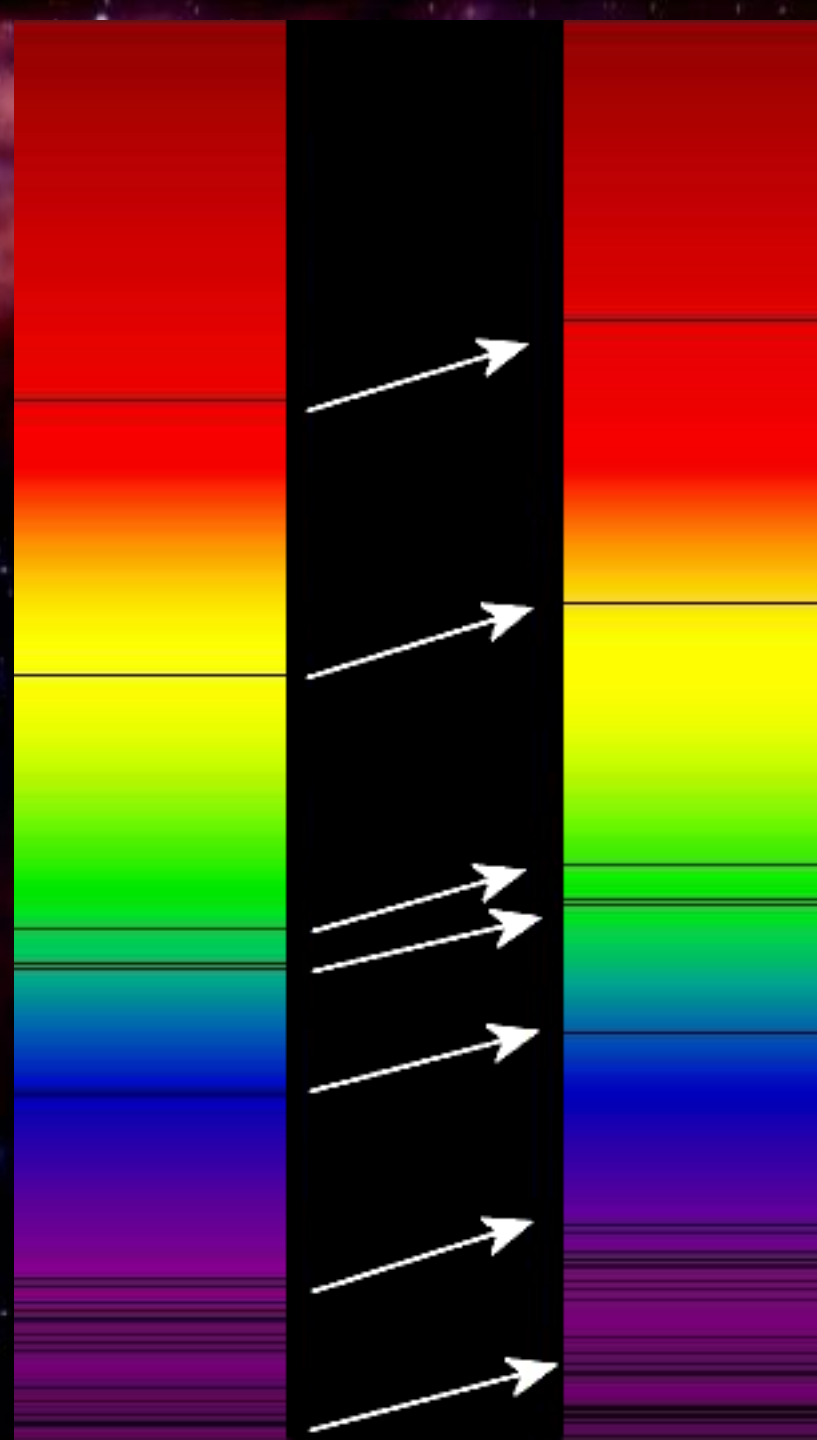
sorgente  
in allontanamento





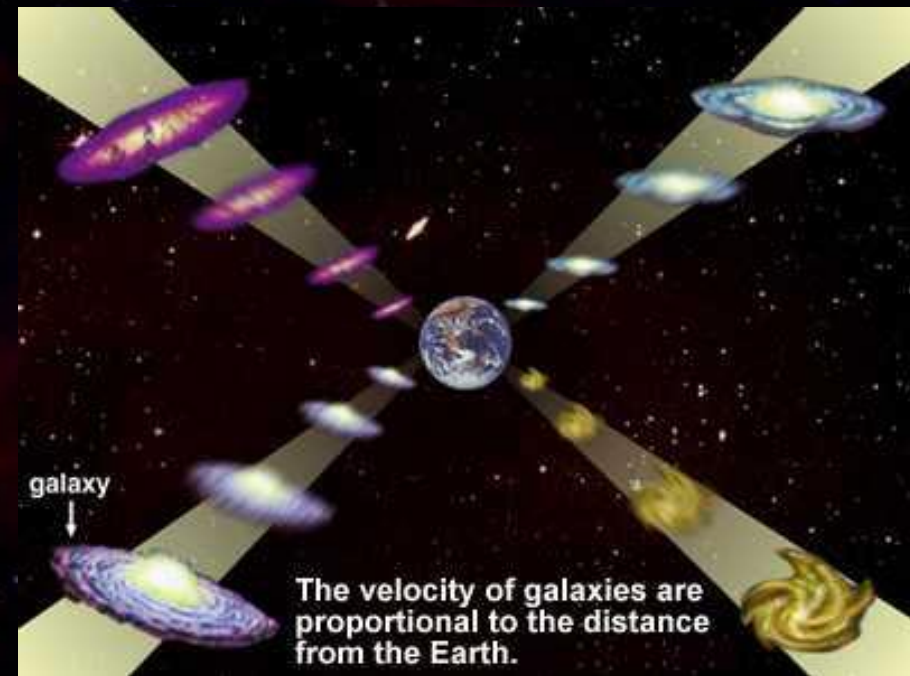
# Spostamento verso il rosso

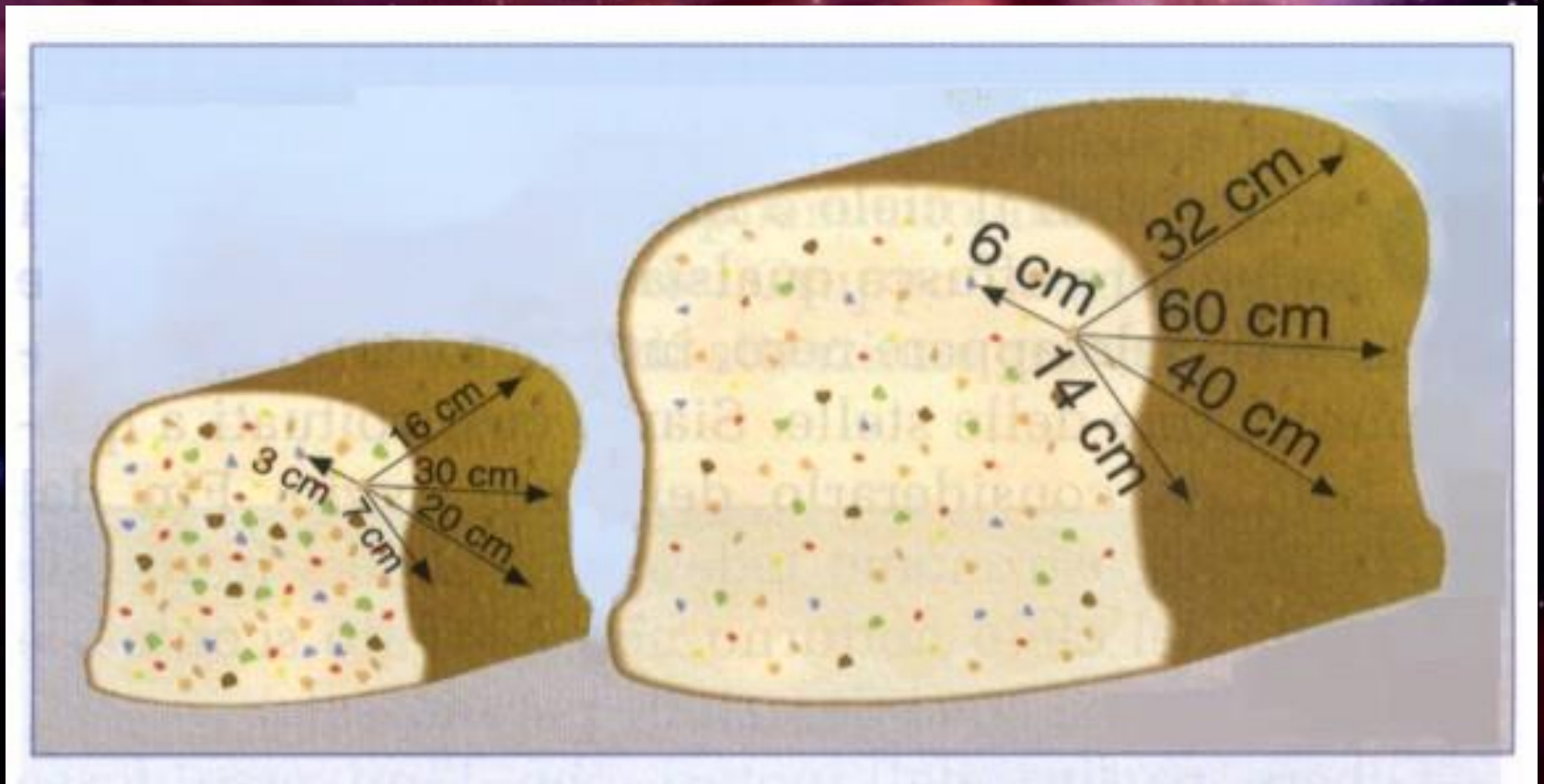
- Un stella in avvicinamento presenta uno spostamento della sua luce verso lunghezze d'onda più corte (blueshift)
- Una stella in allontanamento presenta uno spostamento della sua luce verso lunghezze d'onda più elevate (redshift)
- La maggior parte delle galassie sembrava fuggire dalla Via Lattea



# La Legge di Hubble e l'Universo in espansione

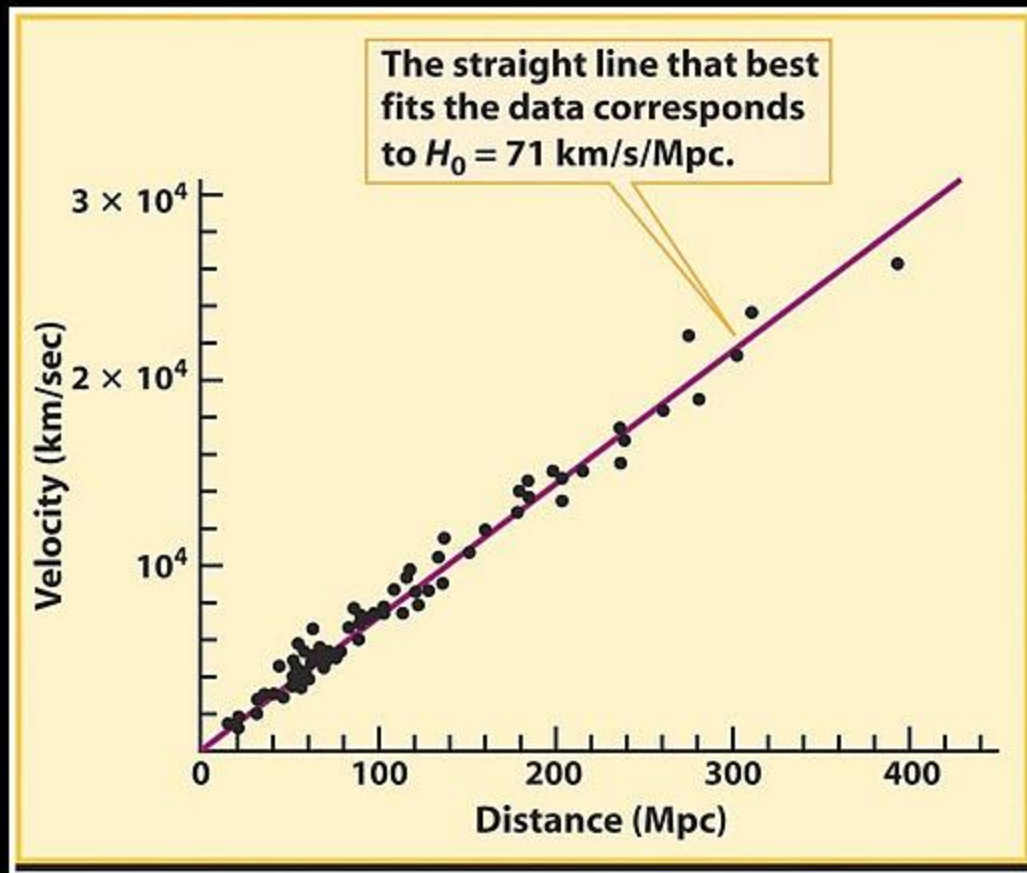
le galassie si allontanano a una velocità maggiore quanto più sono lontane: ciò significa che l'universo si sta espandendo





La lievitazione di un panettone rappresenta un modello per l'espansione dell'universo

La velocità di allontanamento tra i canditi è proporzionale alla loro distanza



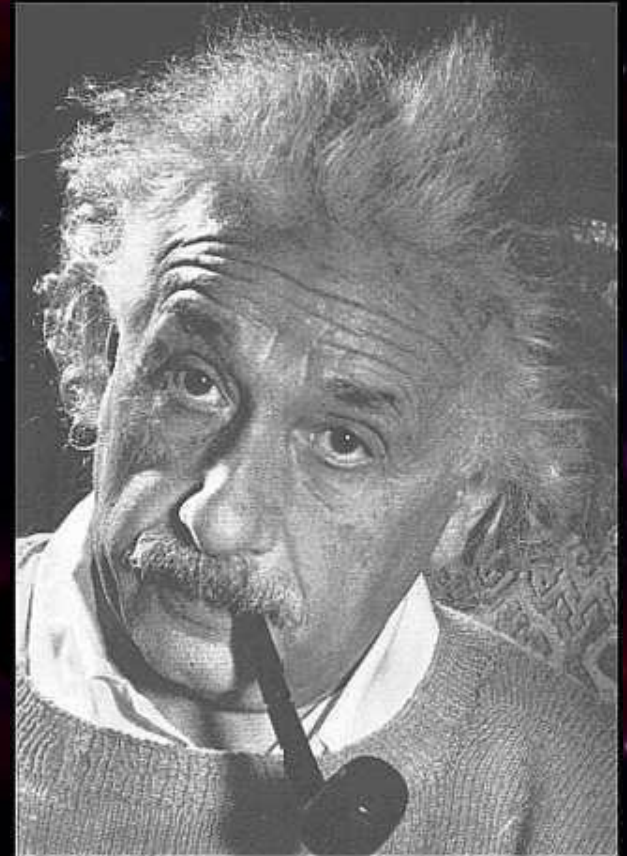
**NEL 1929 EDWIN HUBBLE  
SCOPRE L'ESISTENZA DI UNA  
RELAZIONE LINEARE TRA  
IL REDSHIFT E LA DISTANZA  
DELLE GALASSIE.**

**LE GALASSIE SI ALLONTANANO  
RECIPROCAMENTE AD UNA  
VELOCITA' PROPORZIONALE ALLA  
LORO DISTANZA**

**LEGGE DI HUBBLE**  
 **$v = H_0 D$**

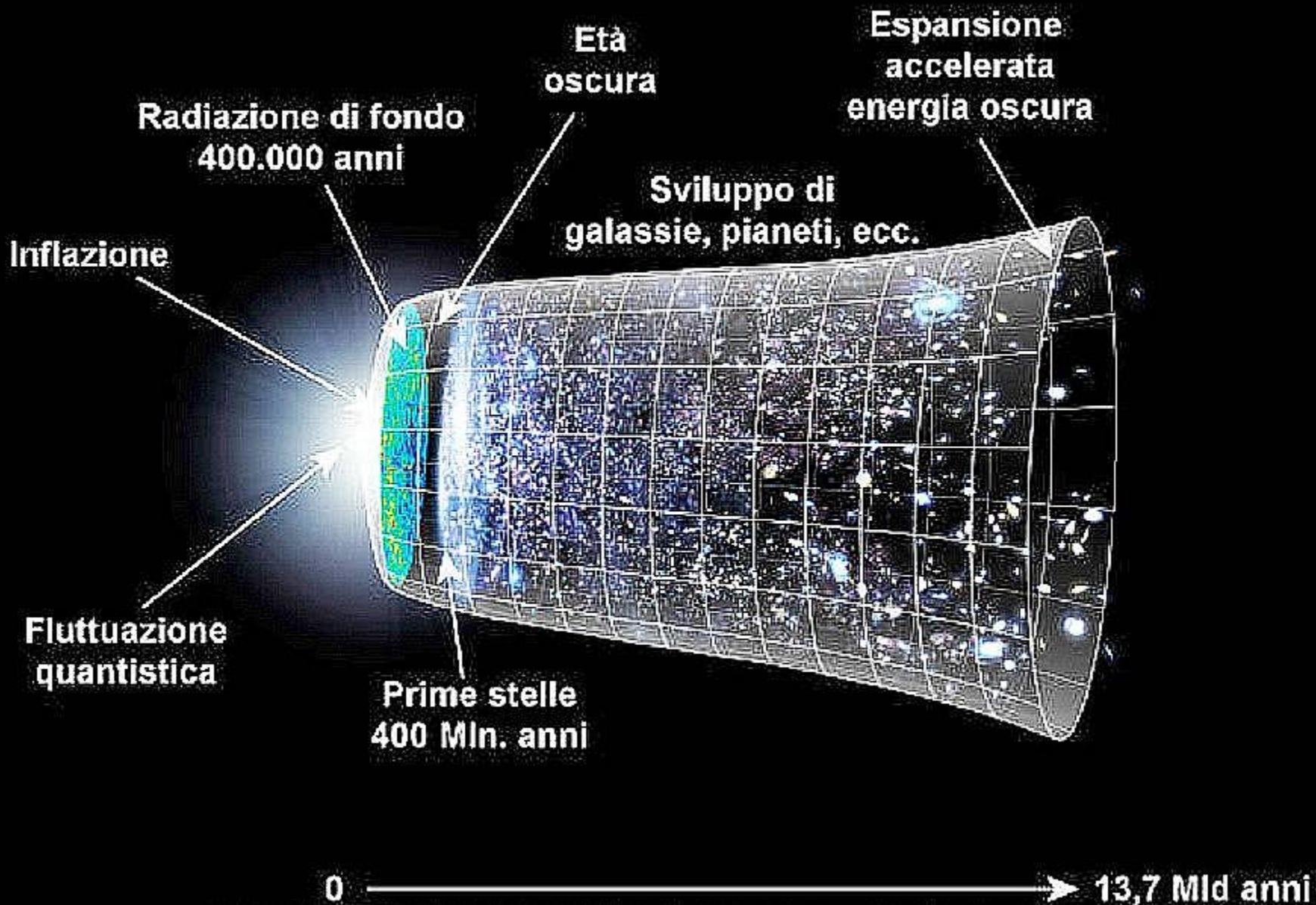
**COSTANTE DI HUBBLE**  
 **$H_0 = 71 \text{ (Km/s)/Mpc}$**

- Quando Einstein seppe di questo risultato definì "il più grande errore della sua vita" la propria teoria sulla costante cosmologica sull'universo immutabile.



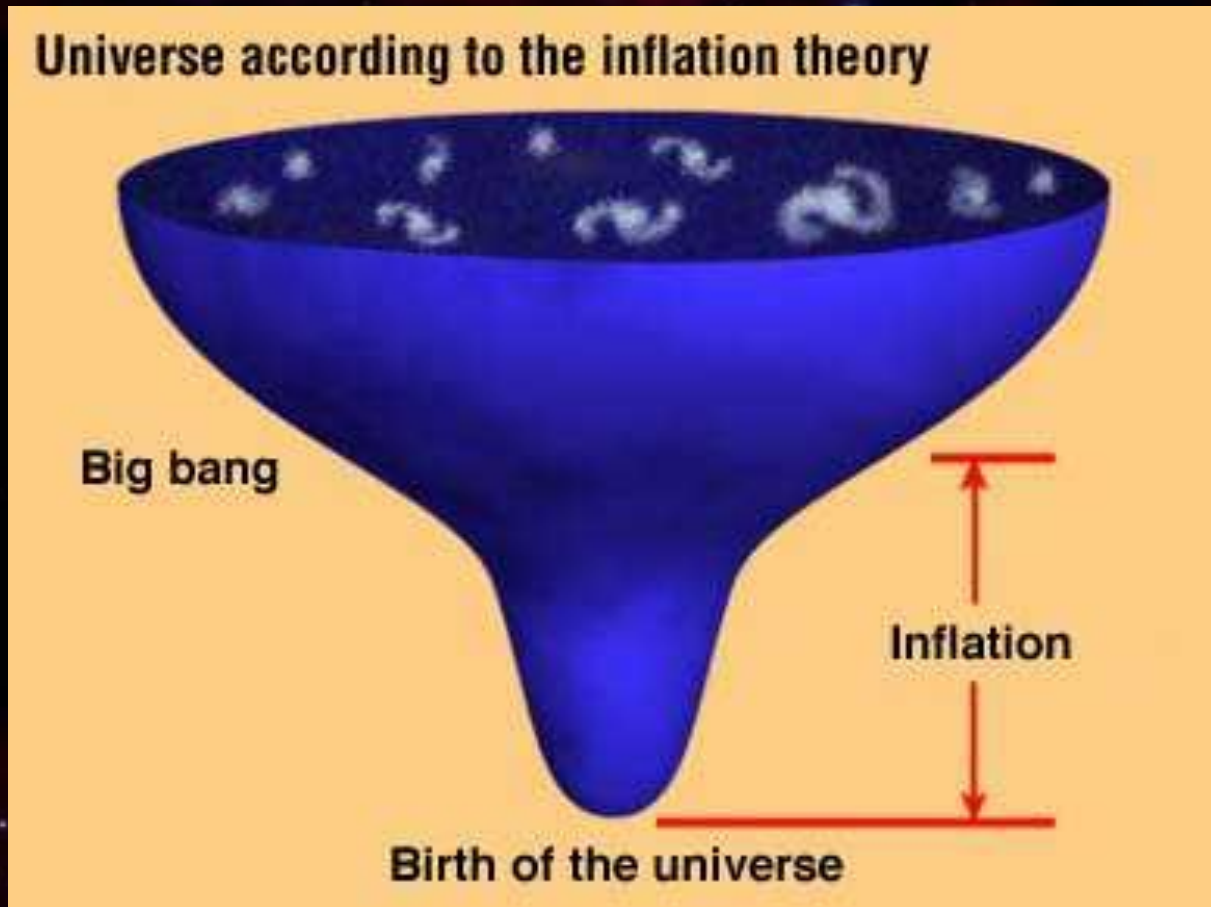
# Il Big Bang

- ❖ Nel 1946 l'americano di origine russa **George Gamow** (1904-1968) propose la teoria del Big Bang per spiegare l'origine dell'universo.
- ❖ Questa teoria sostiene che l'universo è nato da una palla di fuoco di altissime densità e temperatura: un superconcentrato gassoso di particelle atomiche come neutroni e protoni da cui si sarebbero formati gli elementi chimici attuali.



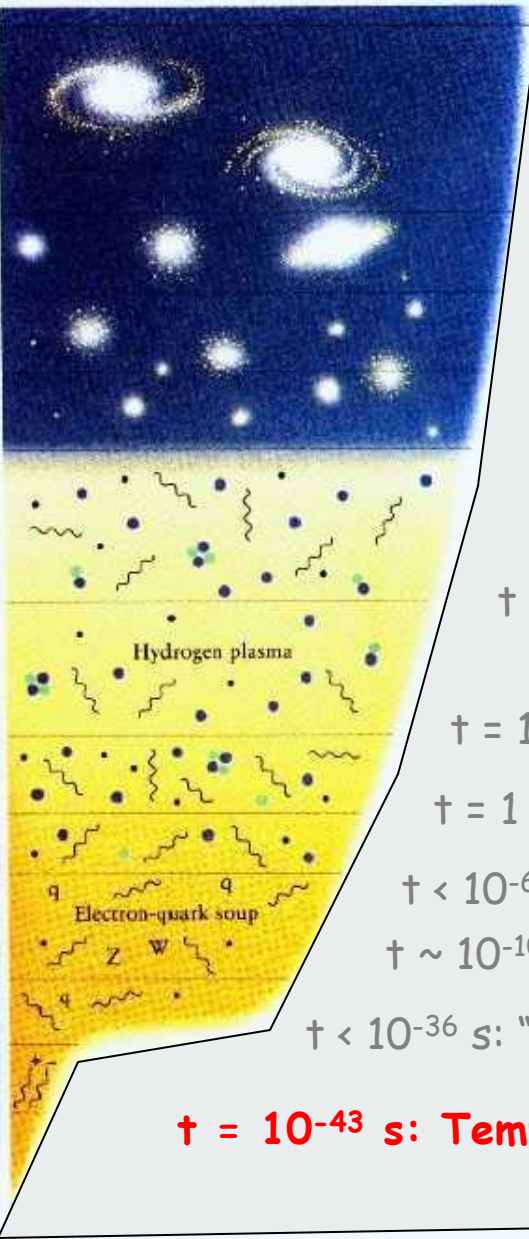
# ESPANSIONE DAL BIG BANG

Tutto era concentrato in un sol punto!





A CHRONOLOGY OF THE UNIVERSE



$t = 15 \cdot 10^9$  anni: vita , noi, ora,  $T = 3$  K  
 $t = 5 \cdot 10^9$ : anni galassie  
 $t = 1 \cdot 10^9$  anni: Proto-galassie  
 $t = 3 \cdot 10^5$  anni: Disaccoppiamento materia-radiazione  $T=3000$  K  
 $t = 10^4$  anni: Inizia l'era dominata dalla materia  $T= 1.8 \cdot 10^4$  K  
 $t = 180$  s: Nucleosintesi  $T=7.5 \cdot 10^8$  K  
 $t = 1$  s: Annichilazione elettroni-positroni  $T=10^{10}$  K  
 $t < 10^{-6}$  s: i quarks si combinano in p e n  $T=10^{13}$  K  
 $t \sim 10^{-10}$  s: Separazione forza elettro-debole  $T=10^{15}$  K  
 $t < 10^{-36}$  s: "Era della Grande Unificazione"  $T=10^{28}$  K

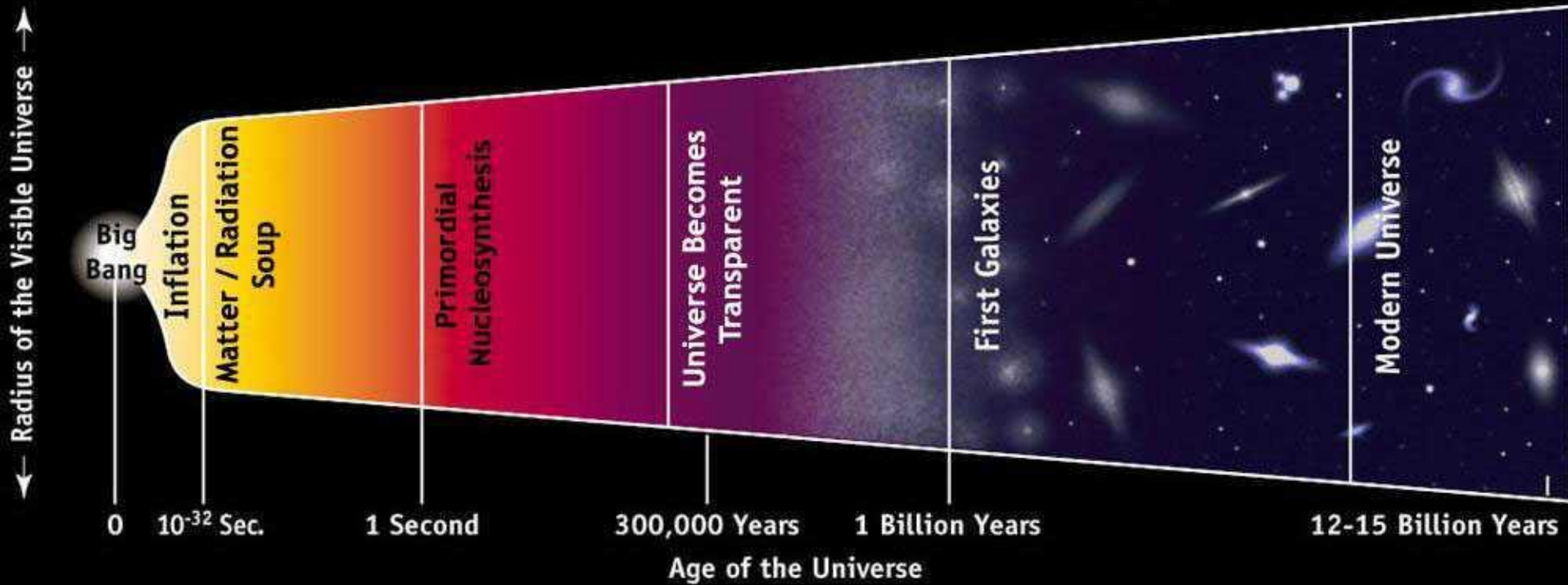


era della materia

era della radiazione

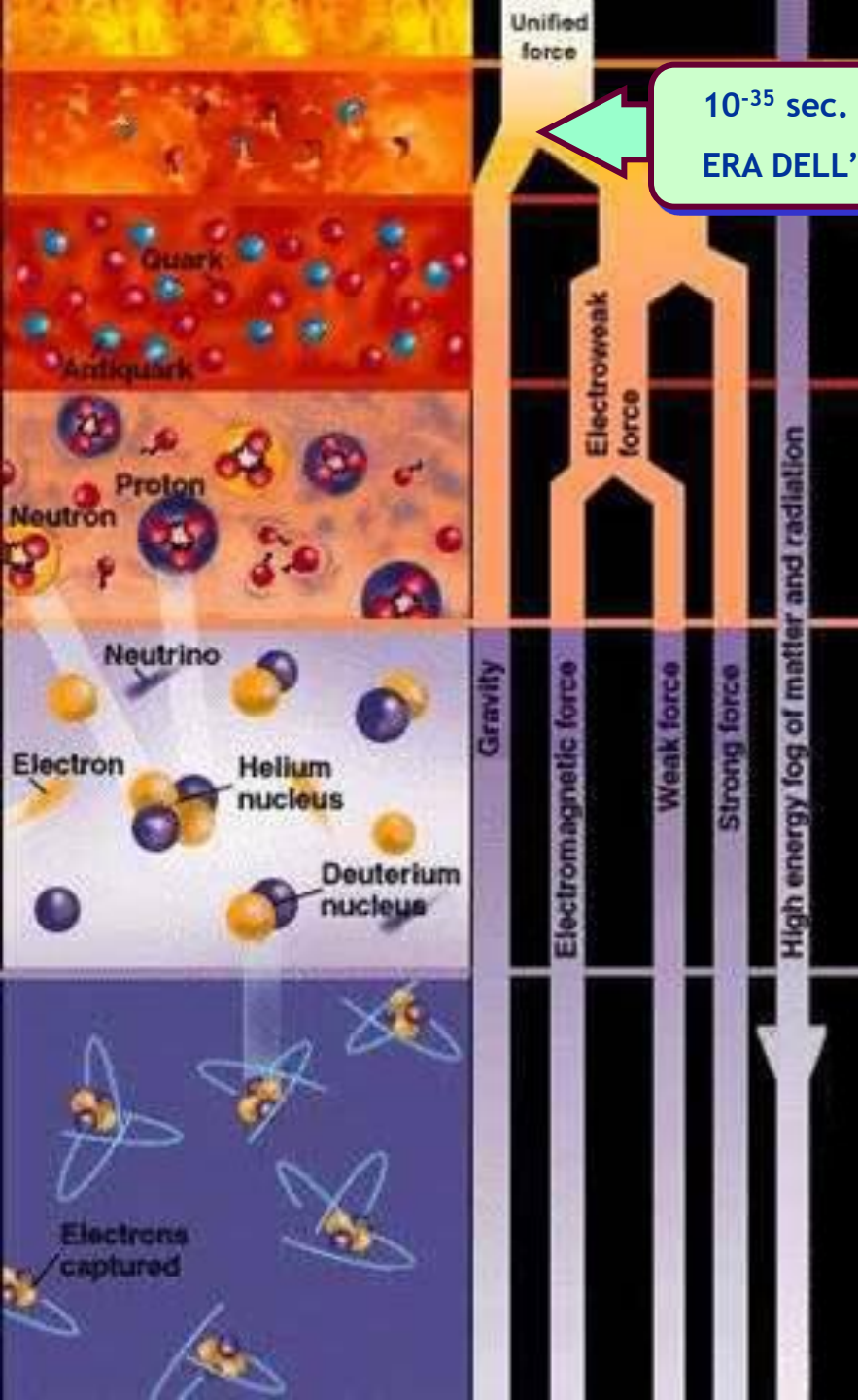
**$t = 10^{-43}$  s: Tempo di Planck: Limite della fisica moderna**

# La storia termica dell'universo



# Nascita del tempo e dello spazio

- ❖ Un evento che diede inizio alla scala del tempo e dello spazio. Di conseguenza in origine tutto doveva essere concentrato in un minuscolo punto, dalla densità e gravità infinite, dove il tempo e lo spazio erano pari a zero e la temperatura dell'ordine di miliardi di miliardi di gradi.
- ❖ Cosa ci fosse prima rimane per ora un mistero, visto che nemmeno gli scienziati avanzano ipotesi, ritenendo i momenti anteriori a tale istante come inconoscibili ed inspiegabili da qualsiasi teoria.



$10^{-35}$  sec.

ERA DELL'INFLAZIONE

# Il Big Bang

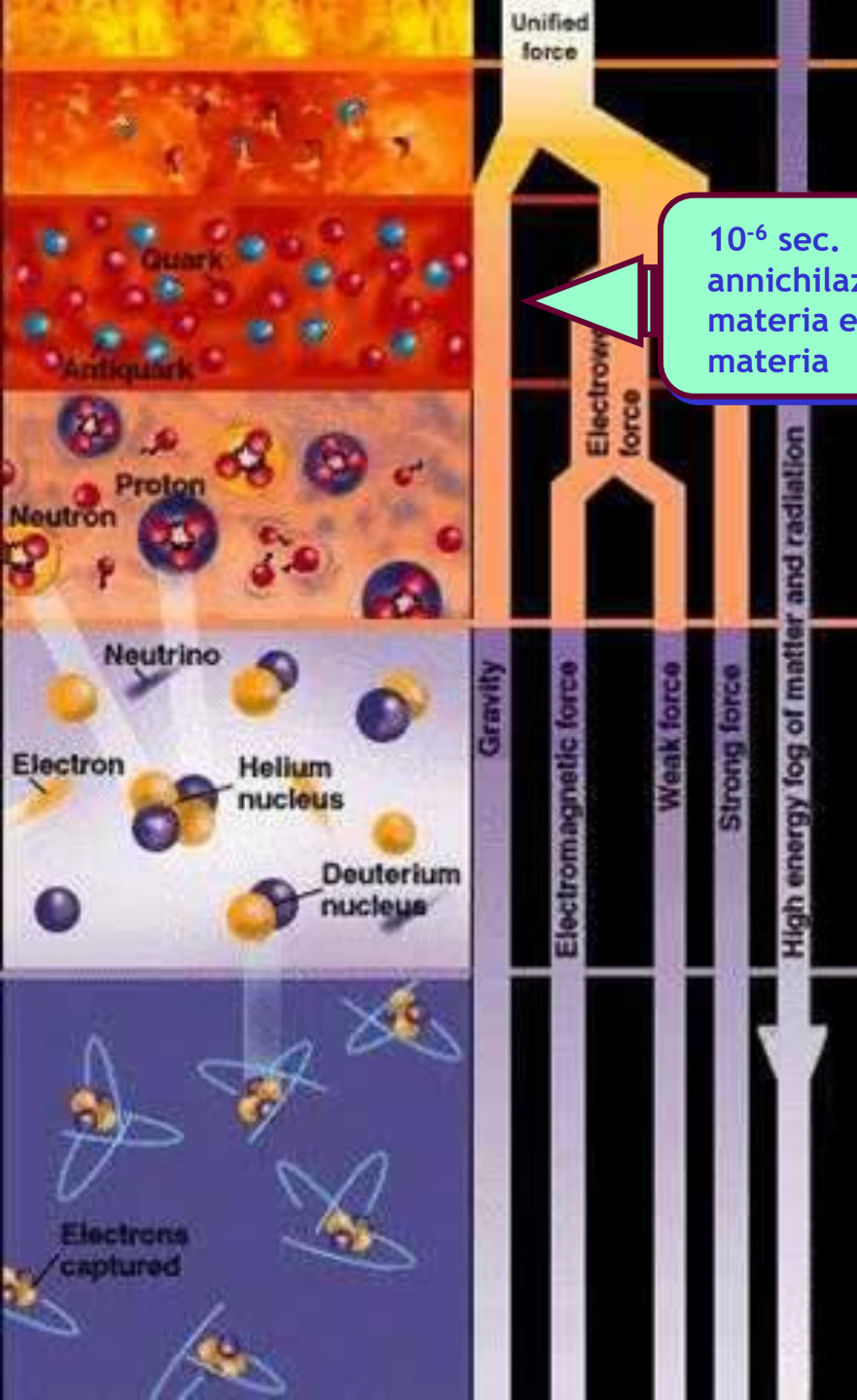
- ❖ Il Big Bang non è stato un'esplosione nello spazio, ma l'espansione dello spazio.
- ❖ Durante l'era dell'inflazione ( $10^{-35}$  sec.) l'universo si è espanso fino alle dimensioni di un grosso pompelmo.

# Il Big Bang

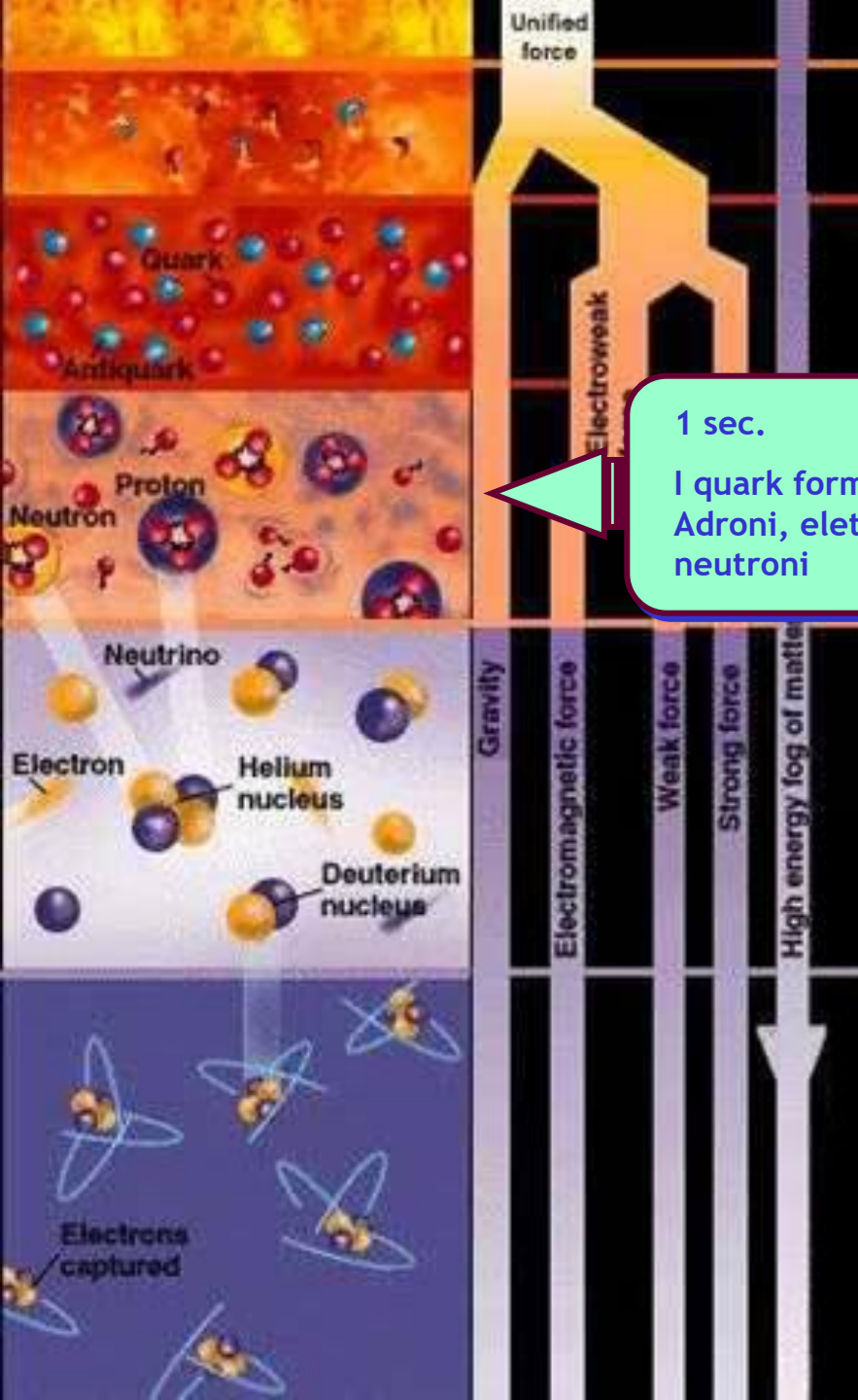
10<sup>-6</sup> sec.  
annichilazione di  
materia e anti-  
materia

## ERA DEI QUARK

- ❖ In questa fase si sono formate dall'energia moltissime copie di quark e antiquark, che si annichilivano ridiventando energia.



# Il Big Bang



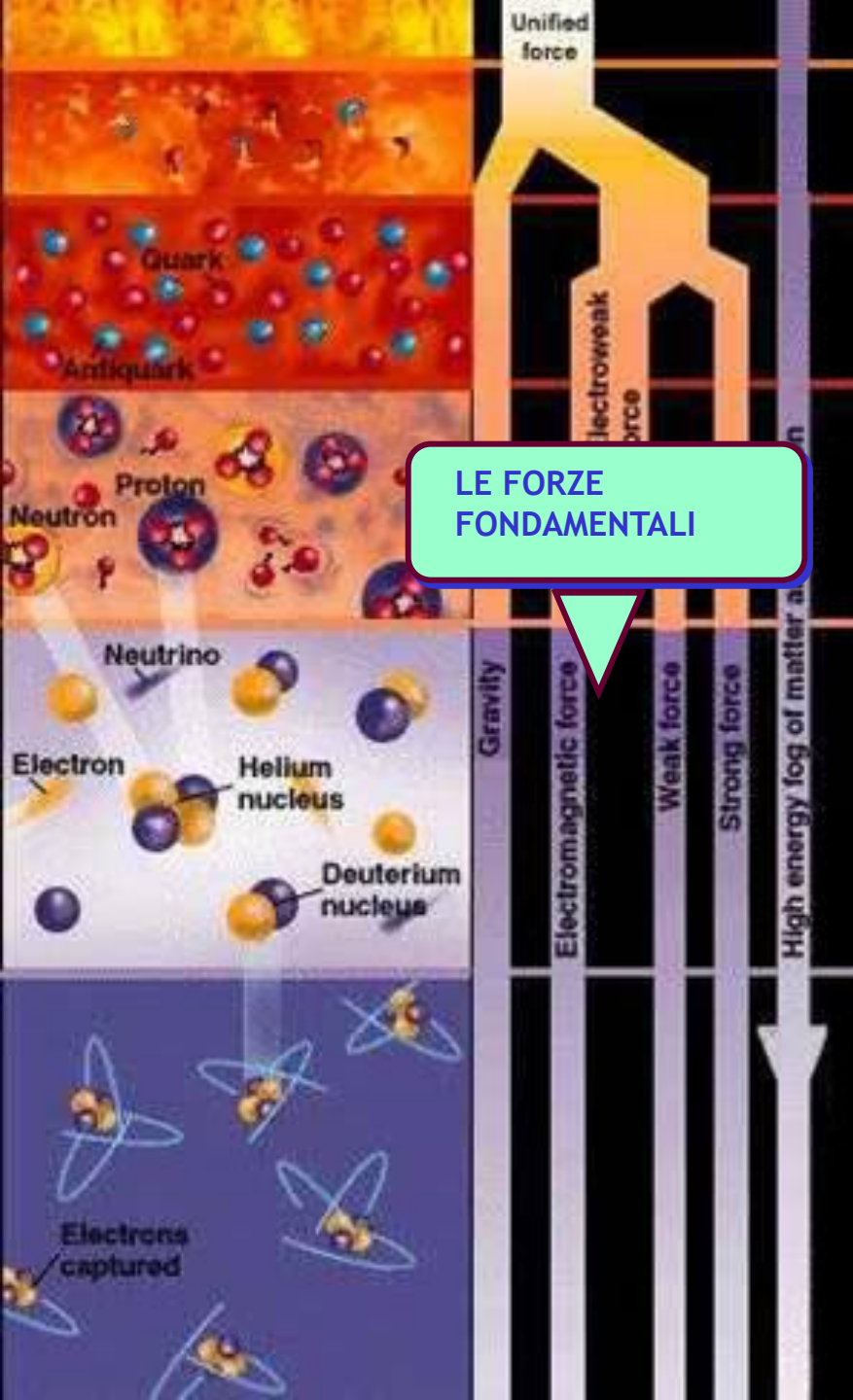
1 sec.

I quark formano  
Adroni, elettroni e  
neutroni

## I PRIMI PROTONI E NEUTRONI

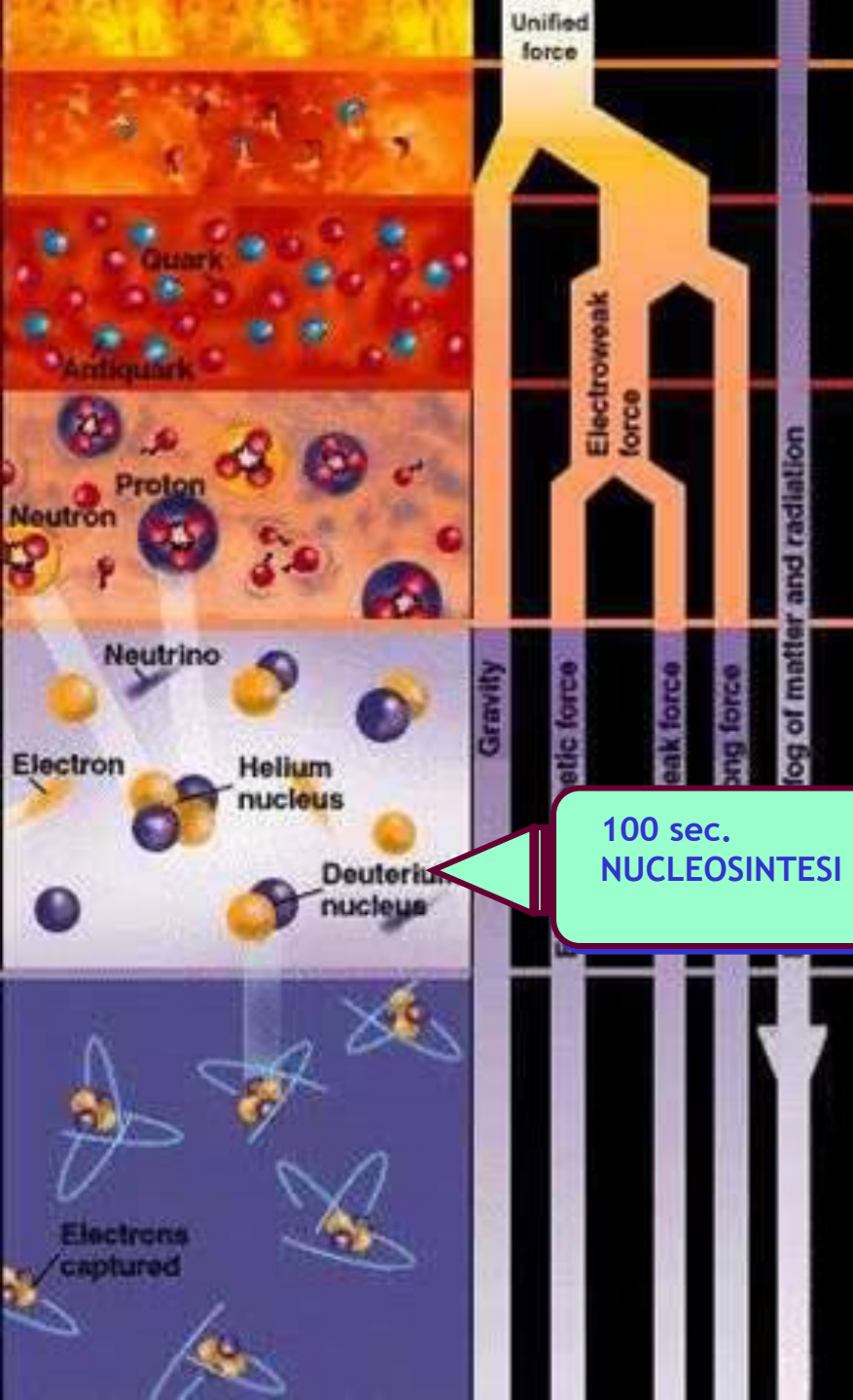
Dopo  $1 \mu\text{s}$  l'universo era abbastanza freddo perché i quark potessero combinarsi e formare particelle più massicce: protoni e neutroni

# Il Big Bang



- Subito dopo entrarono in gioco le forze fondamentali dell'universo, ed alla già esistente forza gravitazionale, che regola l'attrazione fra le masse, si aggiunsero le altre tre che insieme a questa governano l'universo:
  - la forza debole, che agisce a livello atomico,
  - la forza forte che governa i nuclei atomici,
  - la forza elettromagnetica responsabile di tutti i fenomeni elettromagnetici quali la luce, le onde radio, ecc...

# Il Big Bang



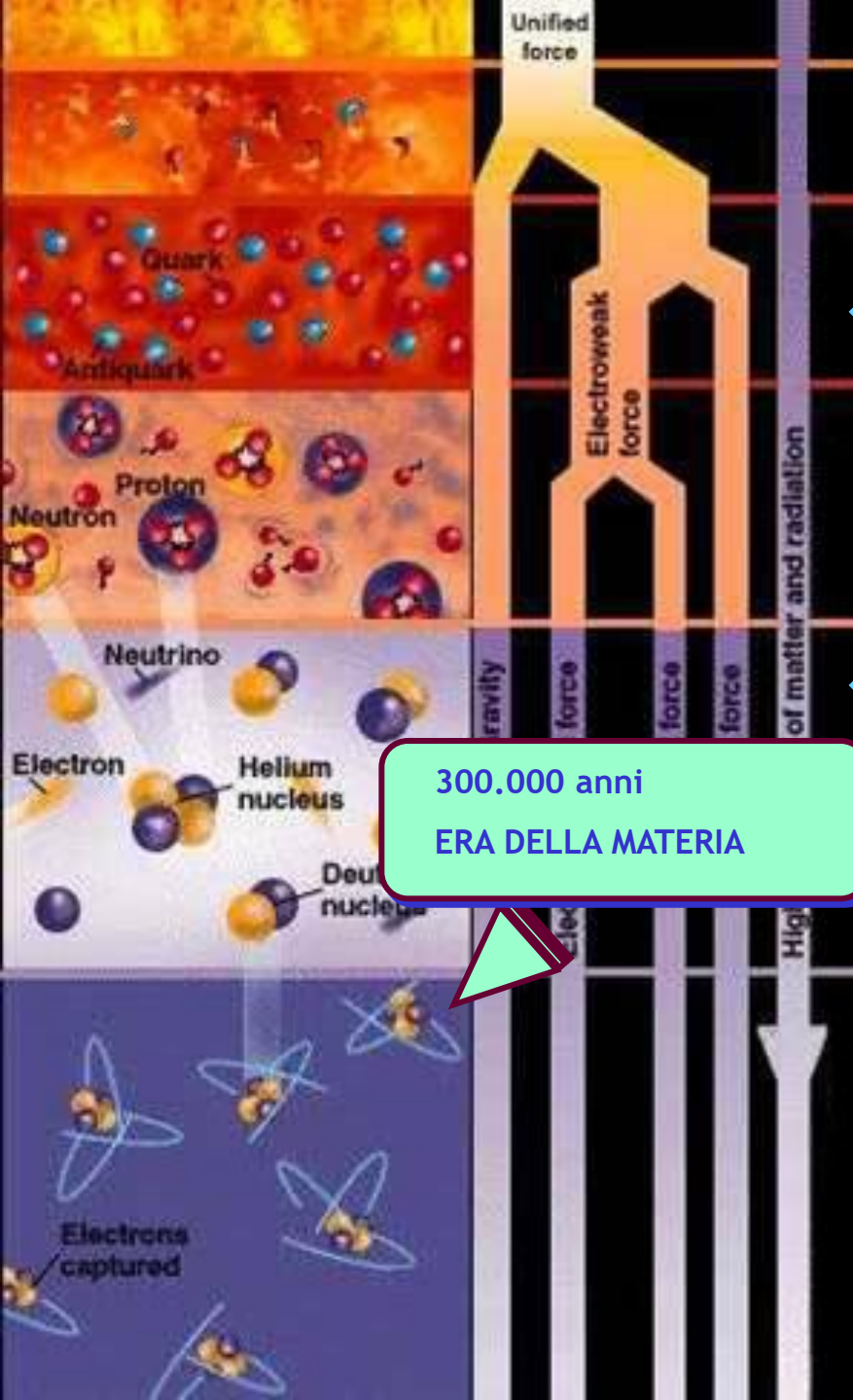
- ERA DELLA NUCLEOSINTESI

- In questa fase i neutroni si sono gradualmente trasformati in protoni. Mentre la temperatura dell'universo si abbassava, gradualmente i neutroni si combinavano con i protoni per formare i primi nuclei di elio ognuno formato da 2 protoni e 2 neutroni.

100 sec.  
NUCLEOSINTESI



# Il Big Bang



300.000 anni

ERA DELLA MATERIA

- ❖ Dopo alcune centinaia di migliaia di anni, l'universo era divenuto ancora meno denso e più freddo, avveniva la "ricombinazione", i protoni e gli elettroni si combinavano per creare i primi atomi di idrogeno.
- ❖ Finiva a quel punto la prima parte della storia dell'universo, quella dominata dalla radiazione, ed iniziava "l'era della materia" che vedeva l'aggregazione delle particelle nelle prime forme atomiche, mentre i fotoni, liberi ormai da ogni vincolo, potevano così irradiarsi in tutte le direzioni sotto forma di radiazione cosmica di fondo.

# Formazione delle galassie

- Dopo qualche milione di anni si erano già formati i primi agglomerati di materia, che aggregandosi a loro volta per l'attrazione gravitazionale, daranno vita qualche miliardo di anni dopo alle protogalassie, che, una volta che si saranno evolute in galassie, formeranno le stelle e tutti gli altri corpi celesti.

# Le evidenze in favore di una nascita esplosiva del nostro universo (Il Big Bang)

- L'espansione dell'Universo

- La presenza di una radiazione fossile che permea tutto in maniera omogenea ed isotropa

- Una corretta composizione chimica dell'universo primordiale (nucleosintesi)

La teoria del **Big Bang** riesce a spiegare tutte le osservazioni sperimentali



George Gamow



Alexander Friedmann

# Una luce antichissima

Ma se il Big Bang si verificò effettivamente.....

E' possibile rintracciare ancora oggi il residuo delle radiazioni elettromagnetiche di quella gigantesca esplosione ?

# Una luce antichissima

- In particolare, 300mila anni dopo il Big Bang, quando l'universo era ancora neonato, la sua temperatura si sarebbe abbassata fino a circa 4.000 gradi.
- Ciò avrebbe reso possibile la formazione degli atomi e la palla di fuoco opaca dei primi momenti sarebbe diventata via via più trasparente, consentendo all'universo di diventare visibile.

# Una luce antichissima

Si può oggi osservare La luce di quell'epoca ?

- ❖ E' possibile rintracciare nell'universo radiazioni elettromagnetiche che ancora viaggiano a causa dell'espansione dell'universo ?
- ❖ Esiste la cosiddetta "radiazione di fondo dell'universo", teorizzata già nel 1940 dallo stesso Gamow e da un altro grande fisico, Hans Bethe ?.

# Una scoperta fortunata

L'emissione di fondo dell'universo fu scoperta per caso nel maggio del 1964 da due ricercatori americani, Arno Penzias e Robert Wilson,





# La radiazione di fondo

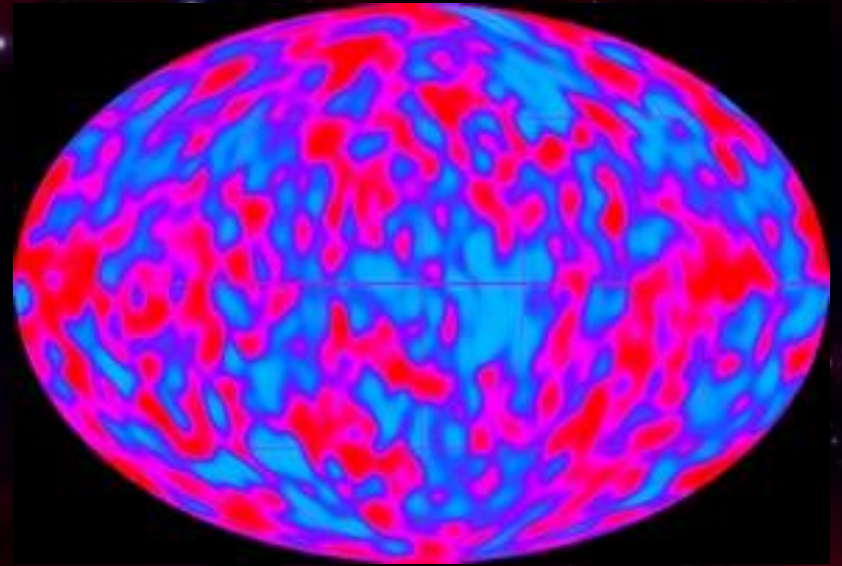
Con l'aiuto del fisico **Robert Dicke** dell'Università di Princeton, che aveva ripreso la teoria di Gamow e Bethe perfezionandola, si capì finalmente che doveva trattarsi proprio della fatidica "radiazione di fondo", chiamata anche "radiazione fossile", prevista dalla teoria del Big Bang.



Scanned at the American  
Institute of Physics

# La radiazione di fondo

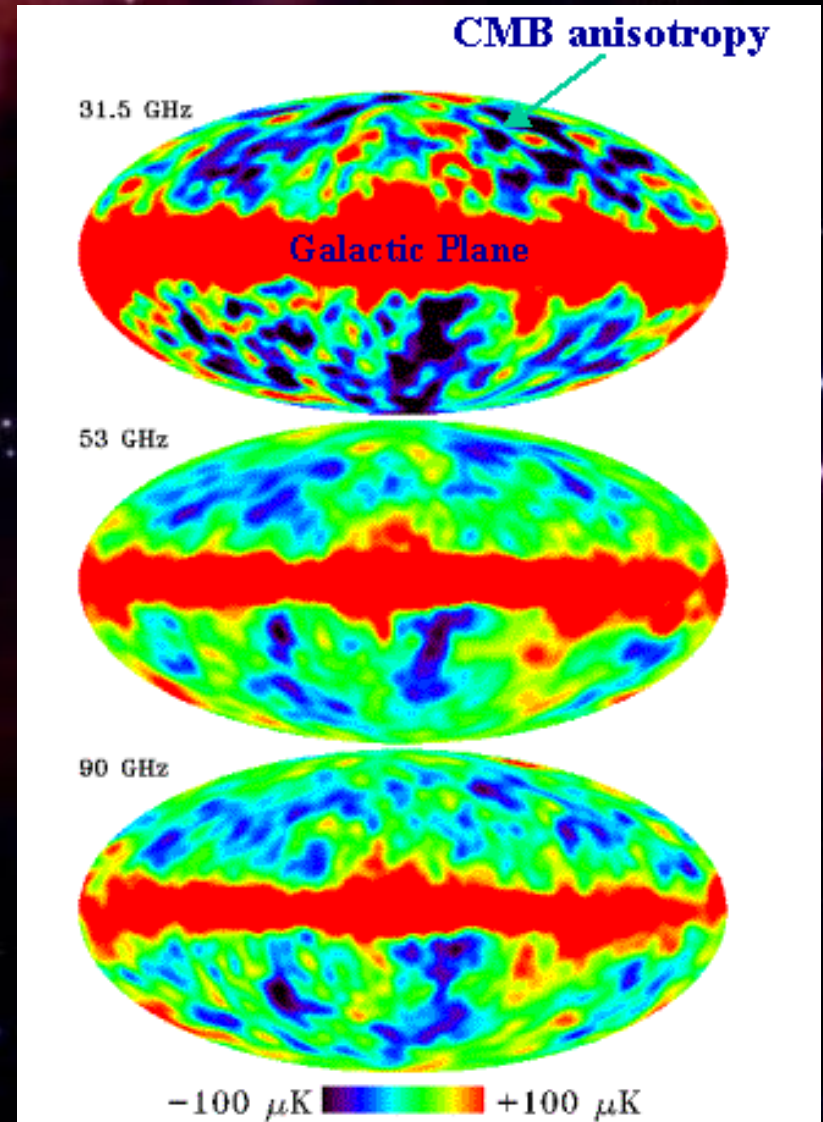
La scoperta del 1964 delle emissioni di fondo dell'universo fu una grande vittoria per i sostenitori della teoria del Big Bang.



*Mapa della radiazione di fondo cosmico a microonde osservata dal satellite COBE*

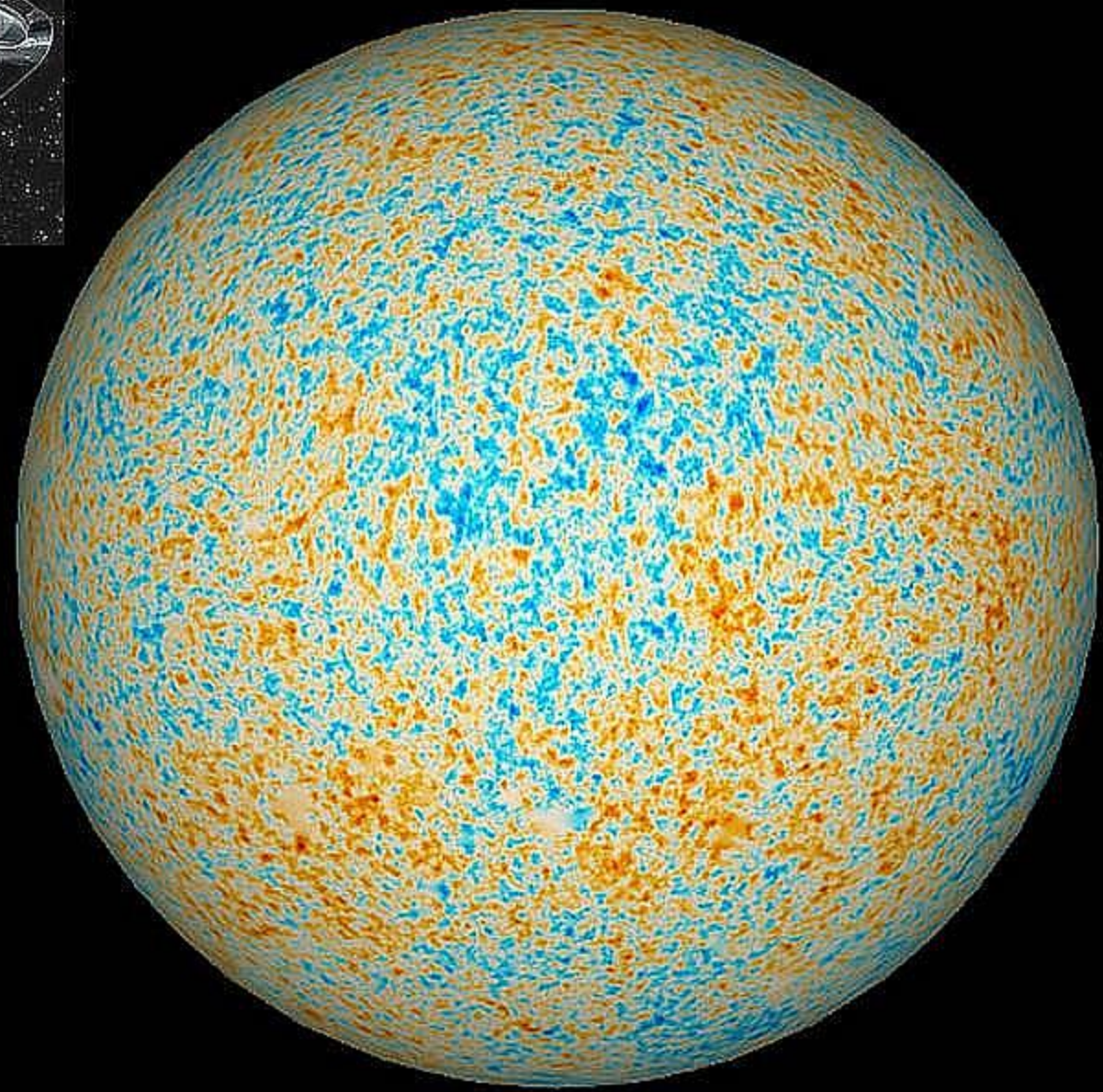
# L'universo raffreddatosi dopo il Big Bang conserva traccia dell'esplosione

Una radiazione elettromagnetica omogenea ed isotropa a  $3^{\circ}\text{K}$  che permea l'intero universo





Planck  
2018



CMB flux (Cosmic Microwaves Background)  
anisotropia termica

# Misura della temperatura T dell'Universo mediante la CMB

$$\lambda_{\text{CMB}} = 1 \text{ mm circa}$$

applichiamo la legge di Wien:

$$T = \frac{0.002898}{\lambda_{\text{CMB}}} = 2.898 \text{ °K}$$

Quanto tempo  $t$  ha impiegato l'Universo a raffreddarsi fino a  $3 \text{ }^\circ\text{K}$ ?

$$t = 4 \times 10^{18} / T^2 = 4.44 \times 10^{17} \text{ sec} \\ = 14 \text{ Gy circa}$$

Calcoliamo la Costante di Hubble:

$$H_0 = 1 / t = 2.25 \times 10^{-18} \text{ secondi}$$

(valore accettato:  $2.35 \times 10^{-18}$  secondi)

Rimane ora da calcolare il  
Raggio R dell'Universo:

$$R = c / H_0 = 1.33 \times 10^{26} \text{ metri} \\ = 14 \times 10^9 \text{ A.L.}$$

Densità media:

$$\bar{\rho} = \frac{3 H_0^2}{8 G \pi} = 9.06 \times 10^{-27} \text{ Kg / m}^3$$

... e ora la massa  $M$   
dell'Universo:

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \bar{\rho} = 8.93 \times 10^{52} \text{ Kg}$$

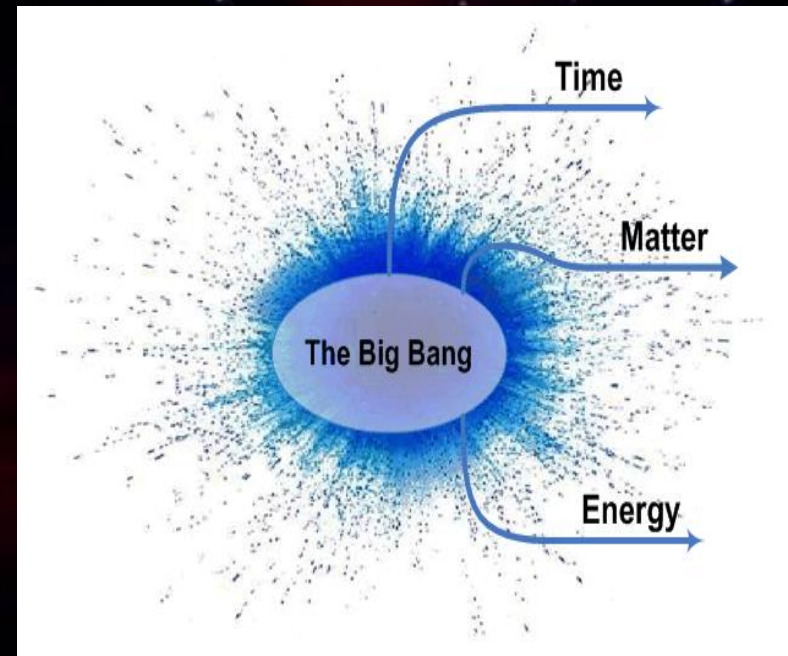
$k=+1$

...supposto sferico ( $k = +1$ )



# L'universo inflazionario

- Nel 1981 l'americano Alan Guth del Massachusetts Institute of Technology e il giapponese Kazuhiro Sato presentarono, indipendentemente l'uno dall'altro, la teoria dell'"universo inflazionario"

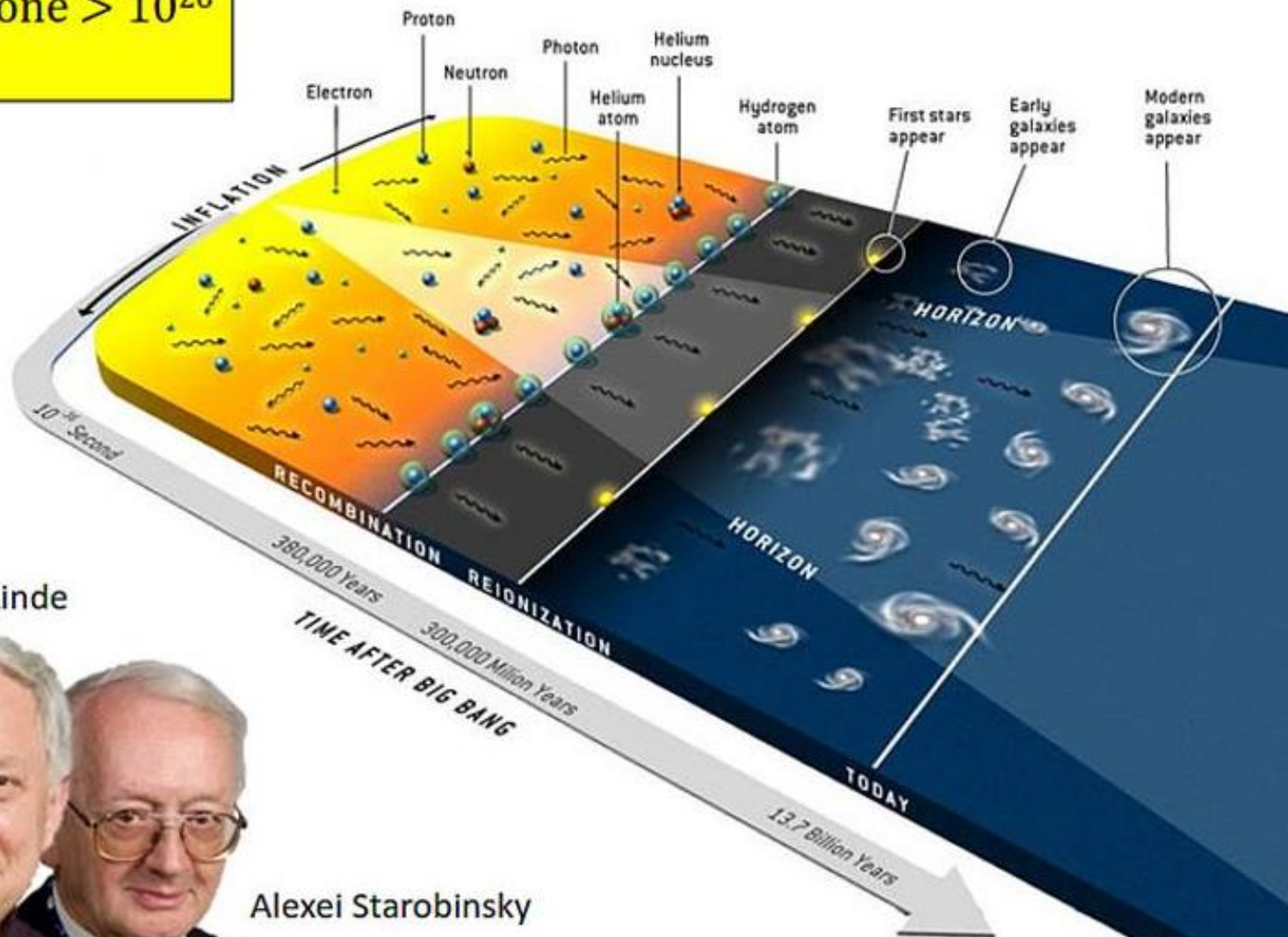


# L'universo inflazionario

- Si tratta di una teoria secondo la quale il super-microuniverso si sarebbe espanso, alla nascita, in una maniera vertiginosa:
- in un solo decimo di milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo ( $10^{-34}$  secondi) avrebbe aumentato il suo volume di dieci miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di volte (1 con 100 zeri)
- Per spiegare questa improvvisa espansione dell'universo appena nato, i due fisici hanno ipotizzato che il vuoto stesso, cioè la condizione dell'universo prima del Big Bang, fosse un "vuoto ad alta energia".

# Inflazione cosmica

$t_0 = 10^{-32}$  s dalla singolarità  
 $\Delta t = 10^{-36}$  s  
fattore di espansione  $> 10^{26}$   
 $T_0/T_1 = 100,000$



Alan Guth

Andrei Linde

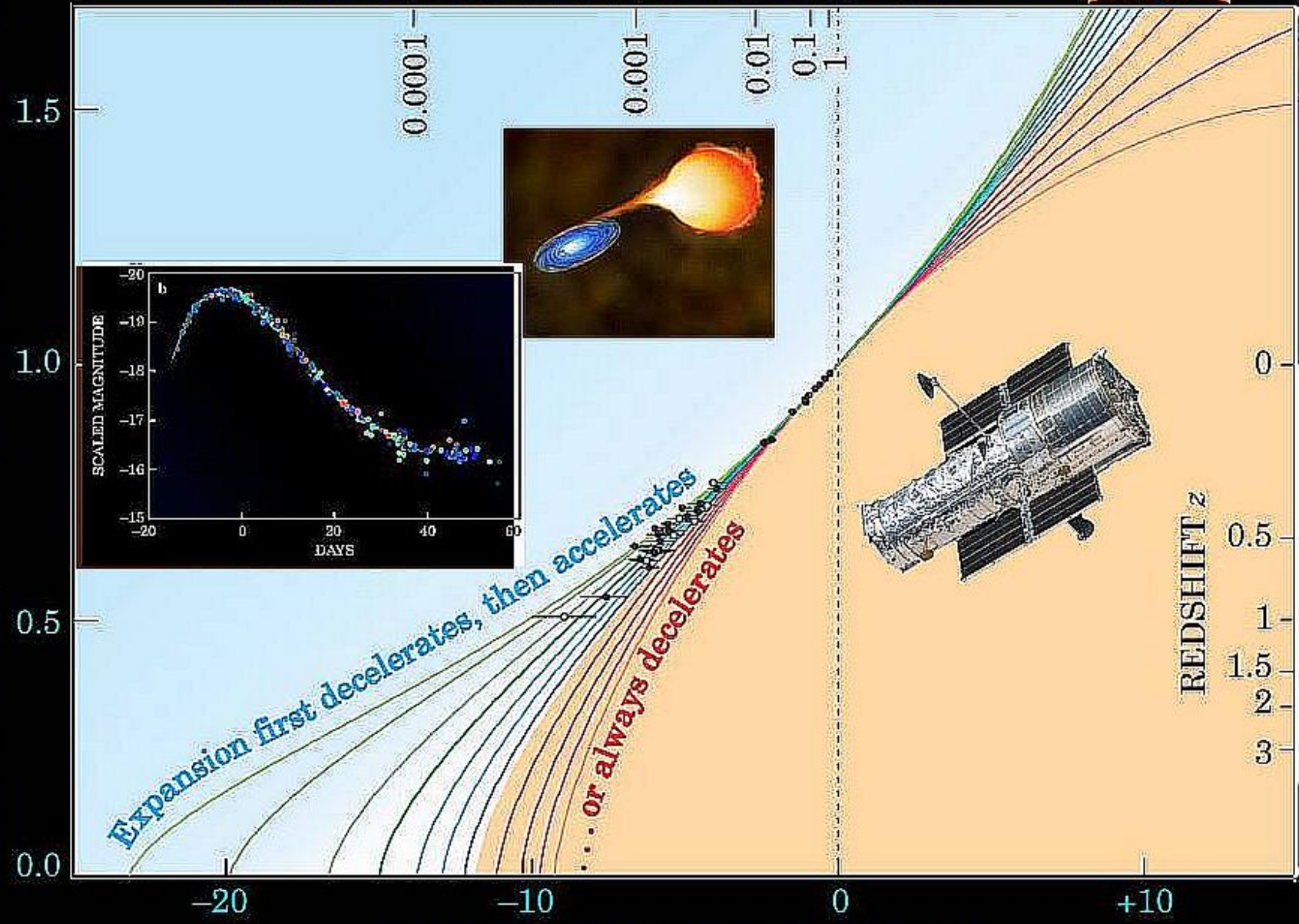
Alexei Starobinsky

LINEAR SCALE OF UNIVERSE RELATIVE TO TODAY

# RELATIVE BRIGHTNESS OF SUPERNOVAE

Eternal expansion

Eventual collapse



*Expansion first decelerates, then accelerates*

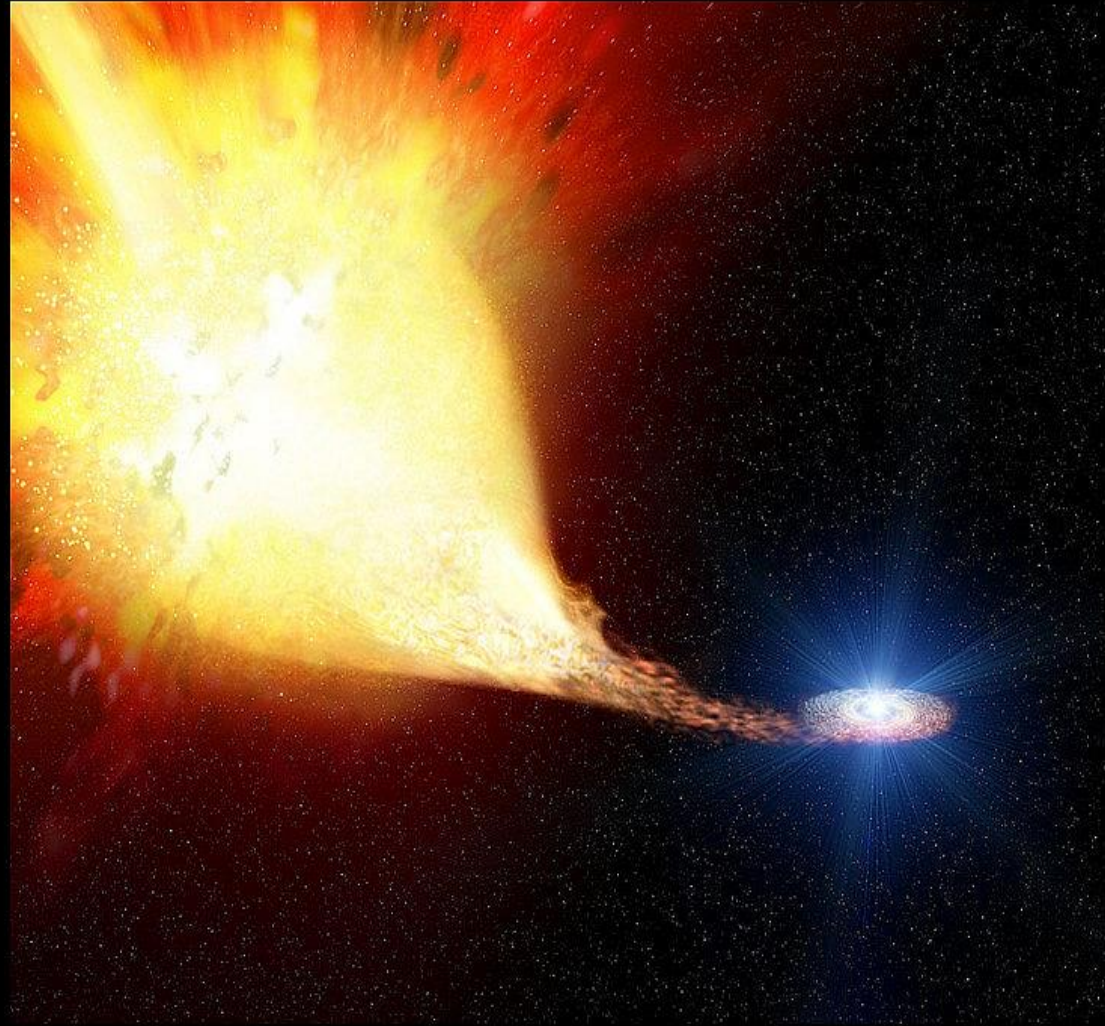
*... or always decelerates*

BILLIONS OF YEARS FROM TODAY

# Supernovae di tipo Ia

Le supernovae di tipo Ia (SN Ia) sono sistemi stellari binari che contengono una nana bianca e una gigante rossa. La nana bianca è stabile finché la sua massa rimane inferiore alle  $1.4 M_{\odot}$ . La nana bianca sottrae materia alla gigante rossa e aumenta progressivamente la sua massa. Quando viene superato il Limite di Chandrasekar pari a  $1.4 M_{\odot}$  la nana bianca esplose (supernova) emettendo una grande quantità di energia. Siccome le nane bianche si somigliano tutte, quando esplodono producono la stessa quantità di energia.

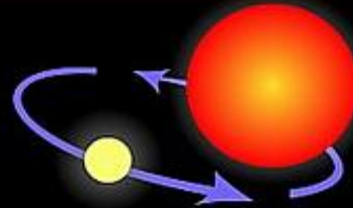
# Supernova di tipo Ia



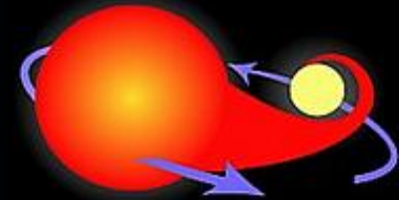
# Come si forma una supernova di tipo Ia



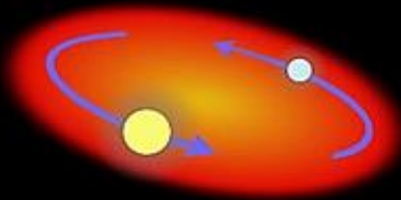
Due stelle normali si trovano in un sistema binario.



La più massiccia si evolve e diviene una gigante rossa...



...che accresce gas sulla compagna, ingrandendola e al contempo inglobandola.



La compagna e il nucleo della gigante spiraleggiano verso il centro dell'involucro gassoso.



L'involucro è espulso, mentre la separazione tra nucleo e compagna diminuisce.



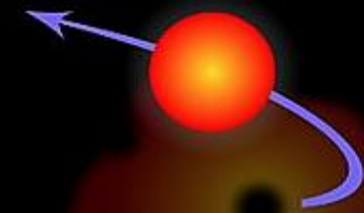
Il nucleo collassa in una nana bianca.



La compagna evolve in gigante, accrescendo materiale sulla superficie della nana bianca.

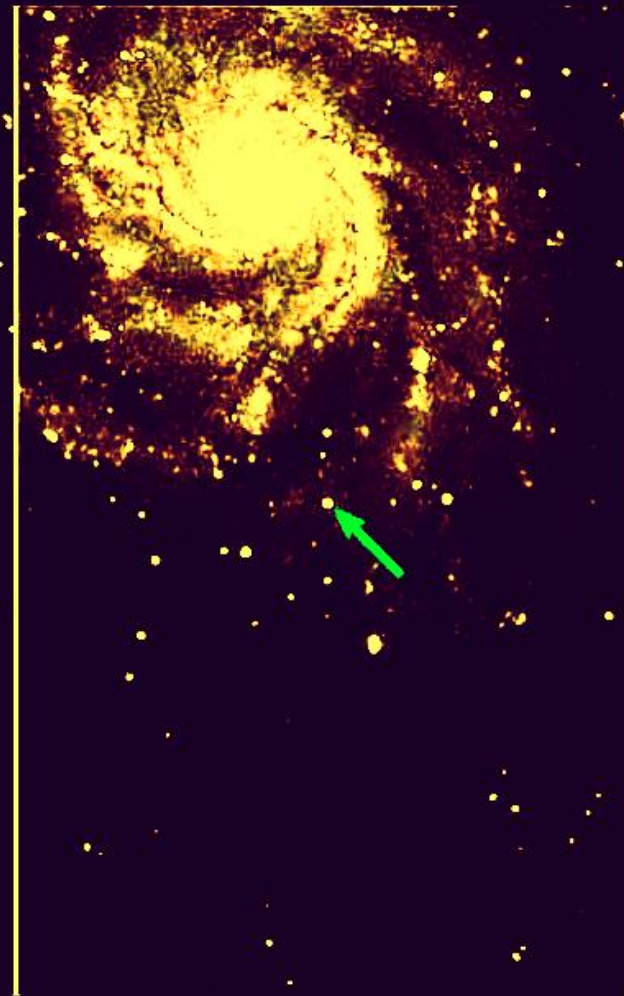
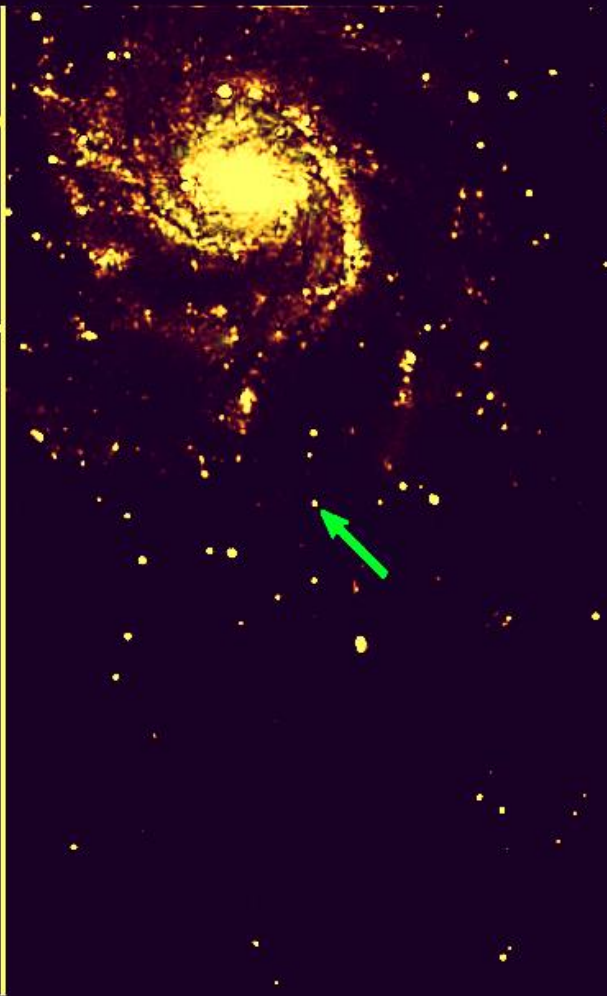
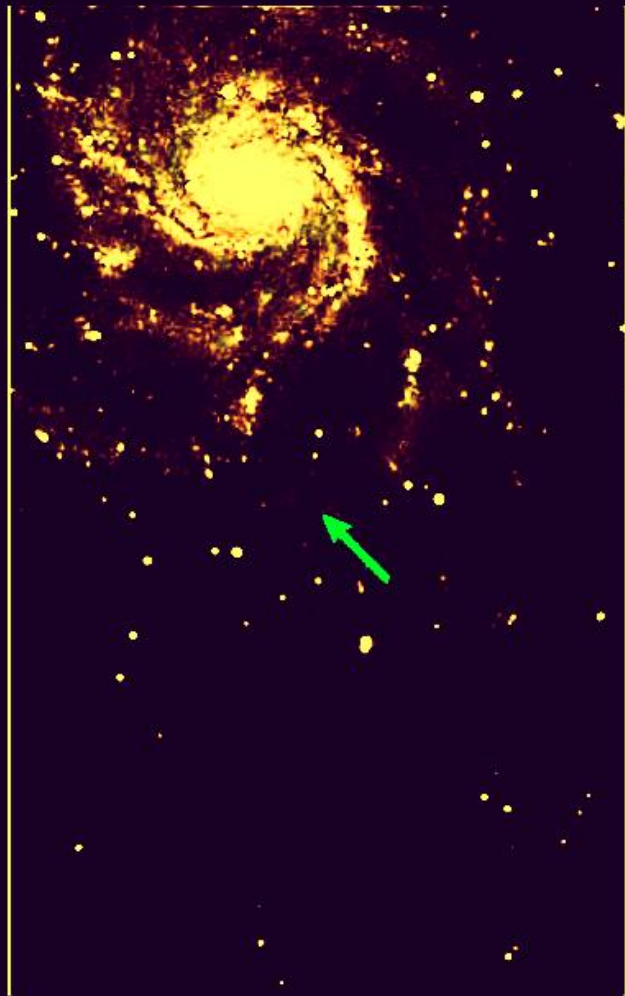


La massa della nana bianca aumenta sino a raggiungere il valore critico, ed esplose...

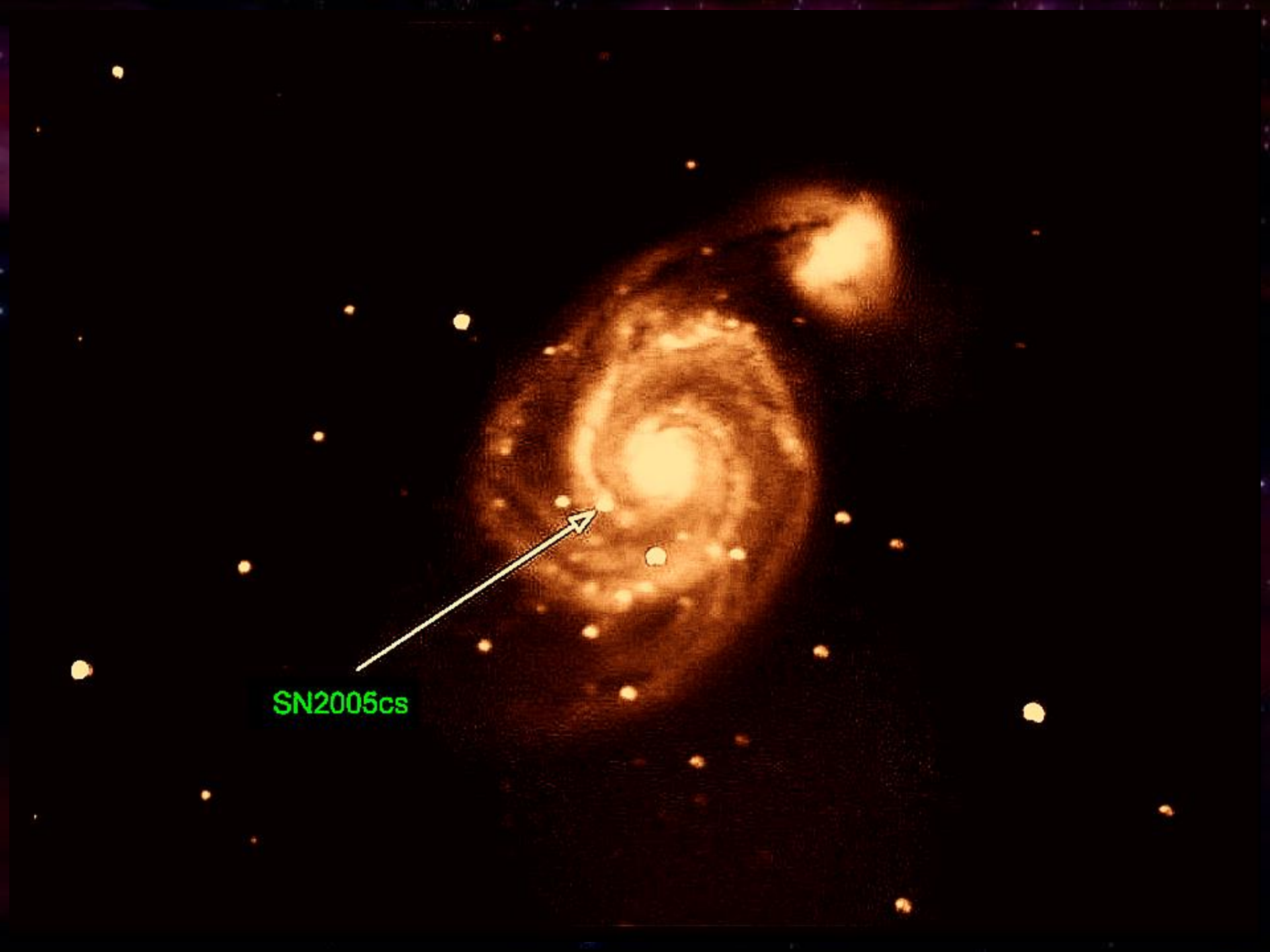


...causando l'espulsione dal sistema della compagna.

# SN2011e

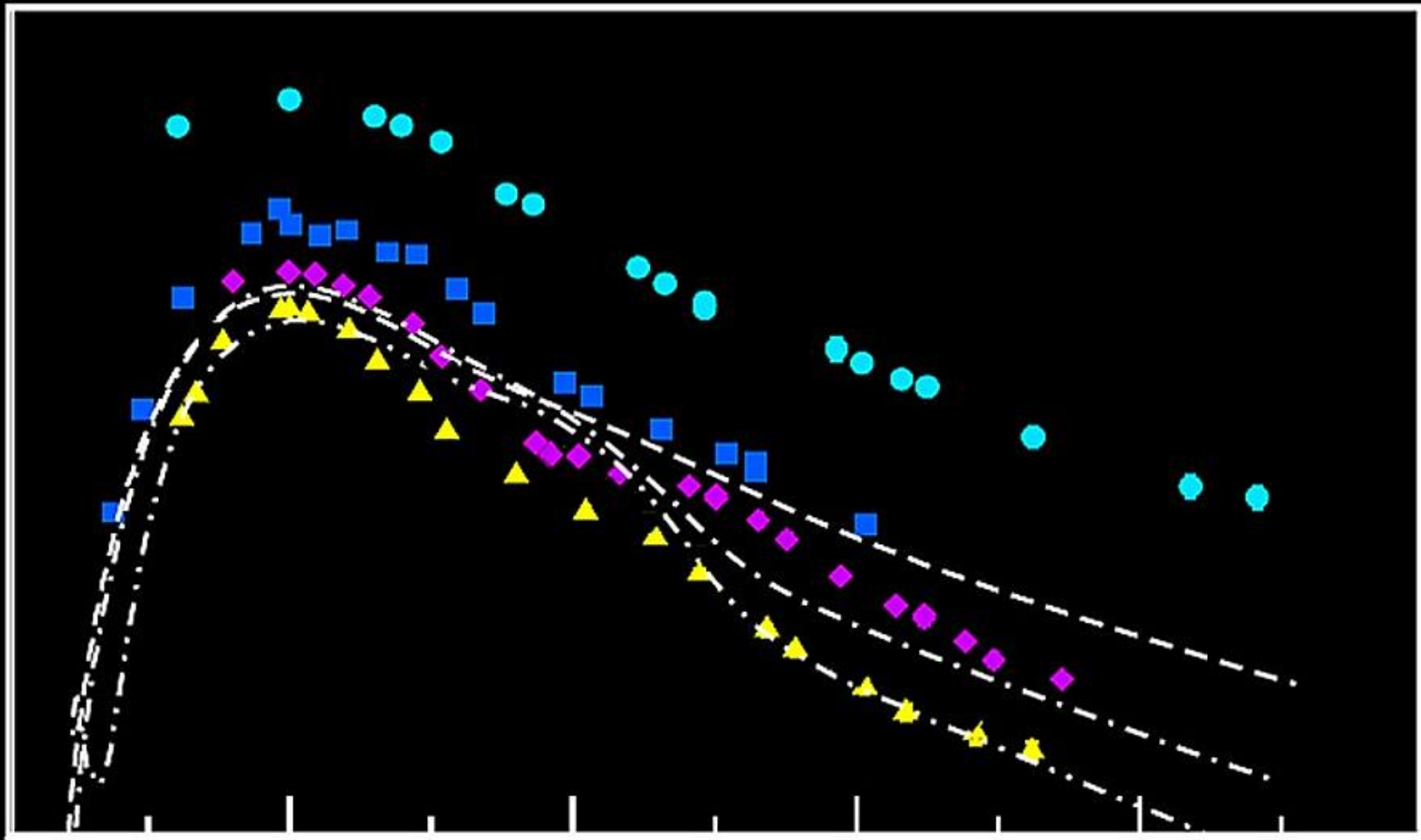






SN2005cs

Brightness



Time

Siccome l'esplosione avviene in condizioni molto simili per tutte le SN Ia, l'energia radiante emessa è dell'ordine di  $10^{44}$  joules per tutte. Quindi presenteranno la medesima magnitudine assoluta  $M$ , ma verranno osservate con una magnitudine apparente  $m$  che dipende dalla distanza  $d$ . La distanza  $d$  quindi sarà quella della galassia che le contiene.

# Modulo di distanza

$$m - M = 5 \log_{10}(d) - 5 = 5 \log_{10} \left( \frac{d}{10 \text{ pc}} \right).$$

**m** = *magnitudine apparente*

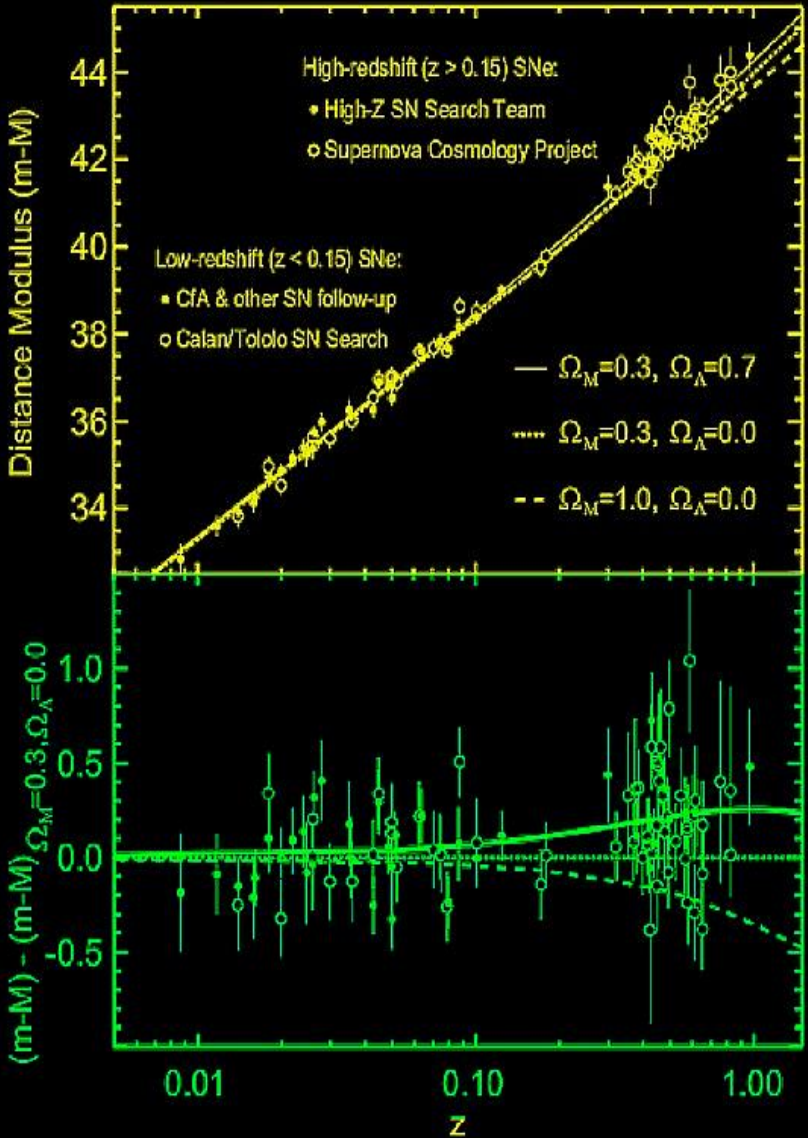
**M** = *magnitudine assoluta*

In più la luce emessa sarà spostata verso il rosso (Redshift) a seconda della velocità radiale di allontanamento. A questo punto abbiamo la velocità  $v$  e la distanza  $d$  e quindi sarà possibile calcolare la costante di Hubble per ciascuna supernova:

$$H = v / d$$

E inserire ciascuna supernova nel diagramma di Hubble

# diagramma di Hubble



- $\Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$
- .....  $\Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.0$
- -  $\Omega_M=1.0, \Omega_\Lambda=0.0$

Le SN Ia si dispongono più in alto rispetto alla legge di Hubble accettata dal modello cosmologico con espansione lineare uniforme:

$$v = H_0 \cdot d \quad \text{--- } \Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.0$$

ma indicano che a grande distanza da noi di ha:

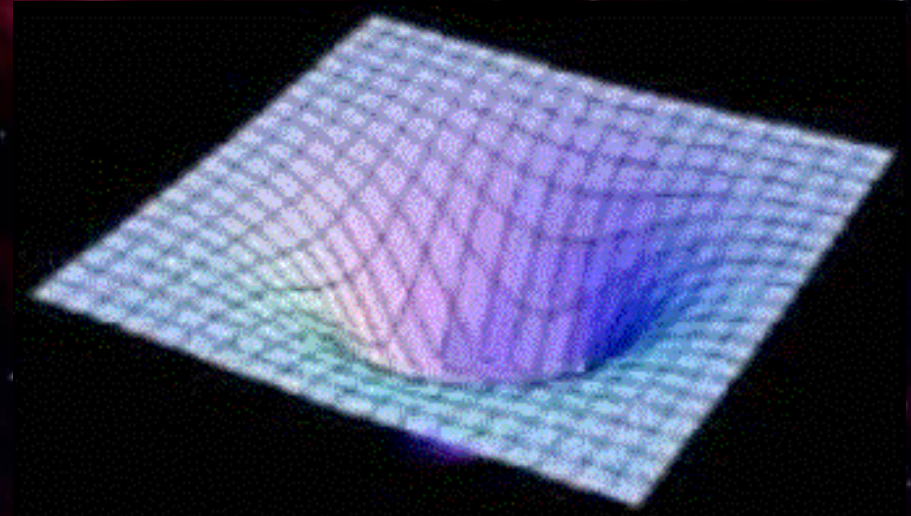
$$v = H_0 \cdot d + H_1 \cdot d^2 + \dots \quad \text{--- } \Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$$

L'Universo sta accelerando la sua espansione...

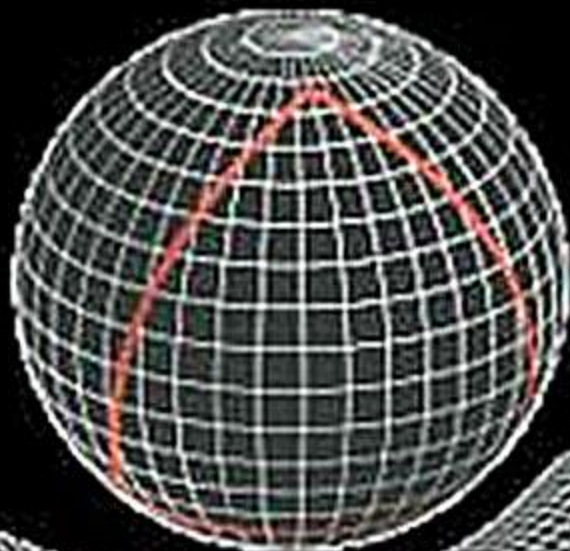
$$H_1 = \frac{1 + q_0}{2c} \quad q_0 = \left( \ddot{R} \cdot R / \dot{R}^2 \right)$$

# Qual'è la forma dell'Universo ?

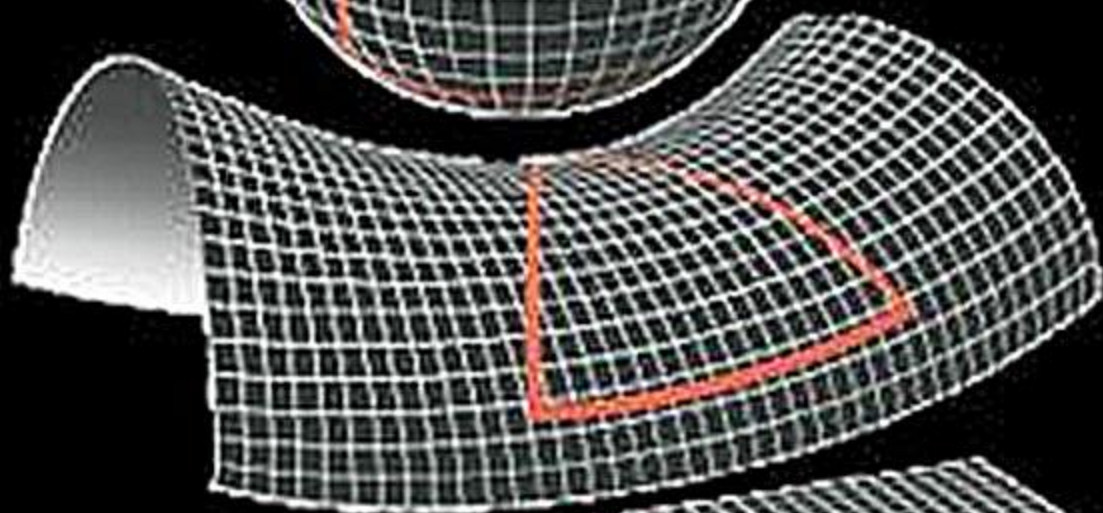
- Una delle intuizioni più profonde della Relatività Generale è stata la conclusione che la massa causa la curvatura dello spazio, e i corpi che viaggiano nello spazio curvo vengono deviati nella loro traiettoria come se una forza agisse su di loro.



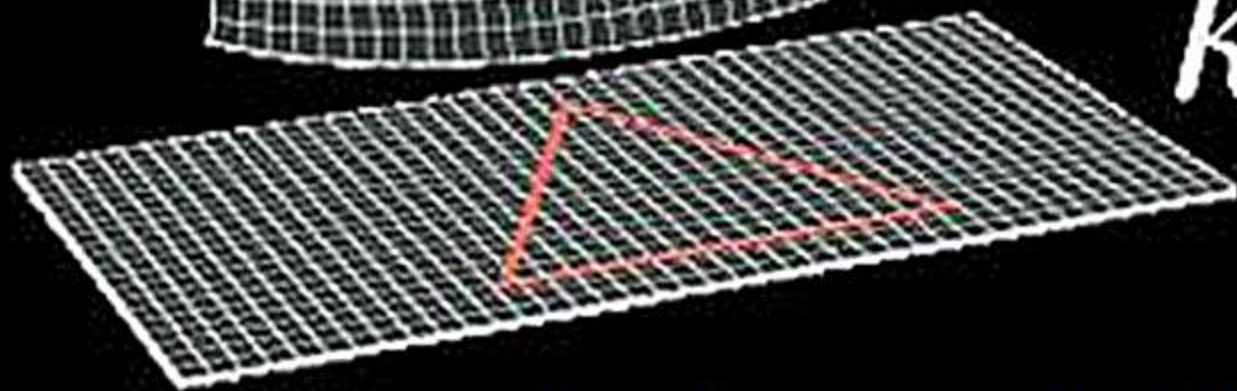




$$k = +1$$



$$k = -1$$



$$k = 0$$

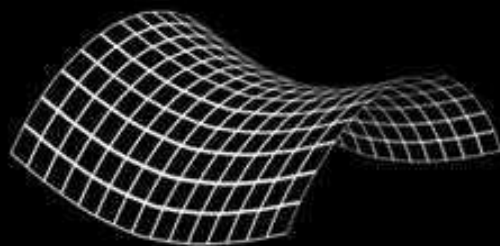
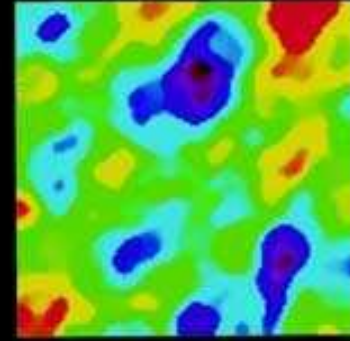
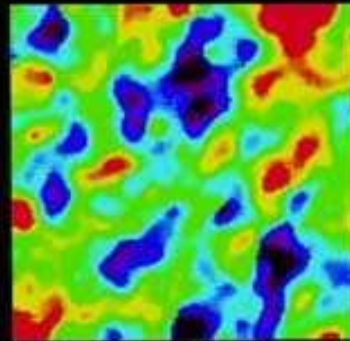
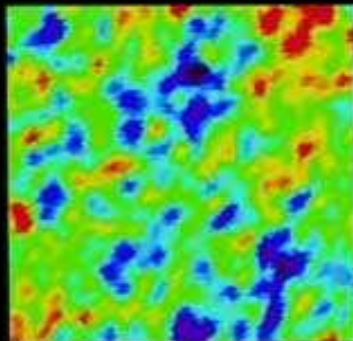
La forma dell'Universo?

# L'Universo è aperto o chiuso?



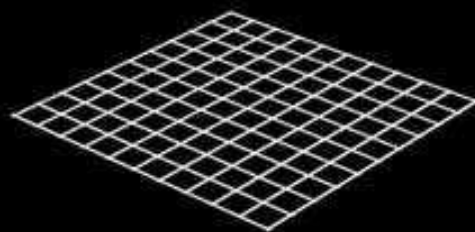
- Se lo spazio stesso è curvo, ci sono tre possibili geometrie per l'Universo. Ognuna di esse è legata alla quantità totale di massa dell'Universo (e quindi all'intensità totale della forza gravitazionale), e ciascuna implica un diverso passato e un diverso futuro per l'Universo.

# GEOMETRY OF THE UNIVERSE



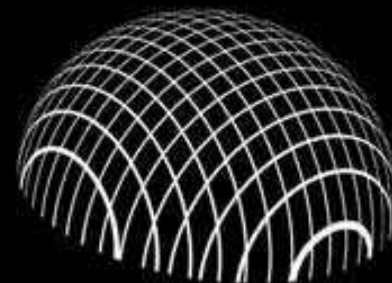
**OPEN**

Fluctuations largest on half-degree scale



**FLAT**

Fluctuations largest on  
1-degree scale

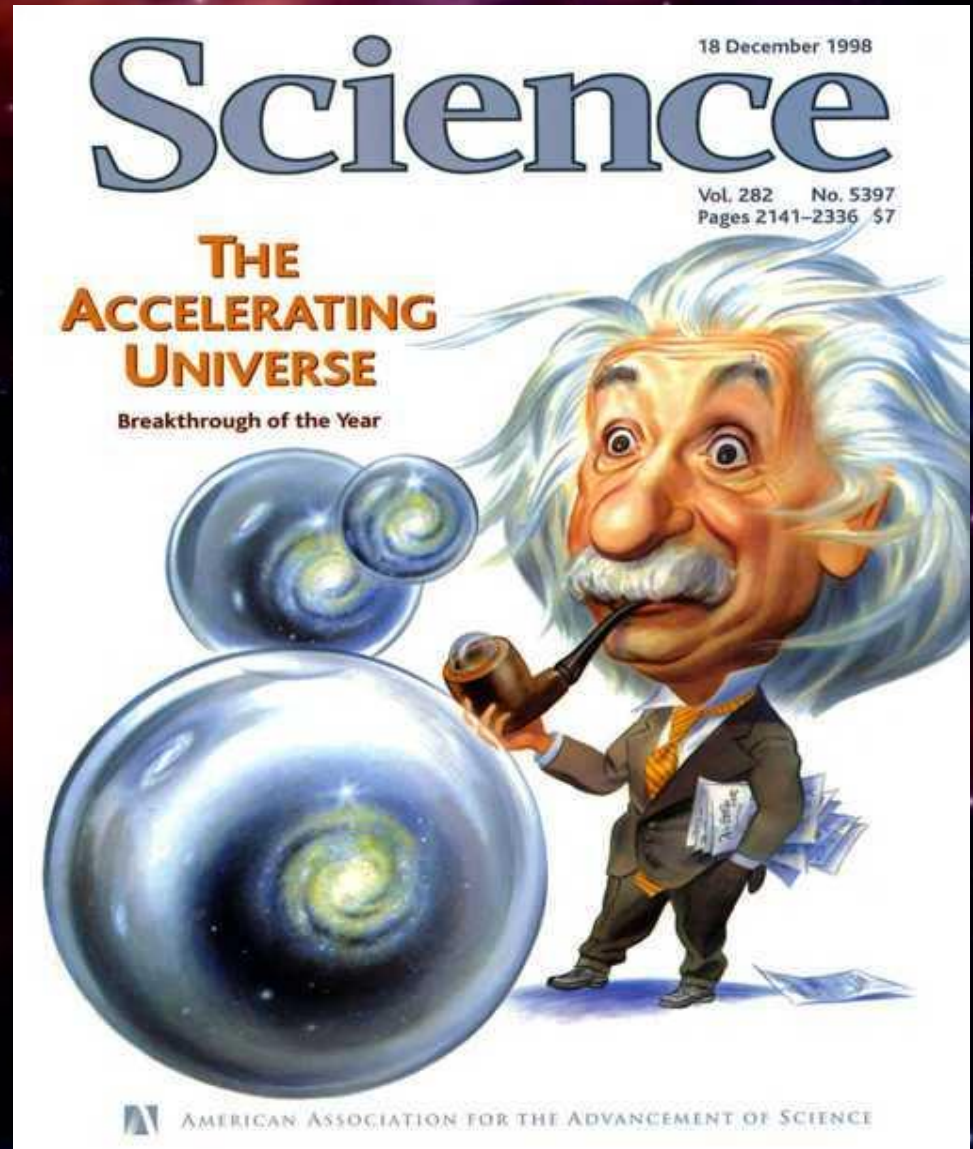


**CLOSED**

Fluctuations largest on  
greater than 1-degree scale

# L'espansione accelera?

- Gli studi portati avanti indipendentemente da due gruppi distinti, l' "High-z Supernova Search Team" ed il "Supernova Cosmology project" hanno portato ad una scoperta inaspettata.

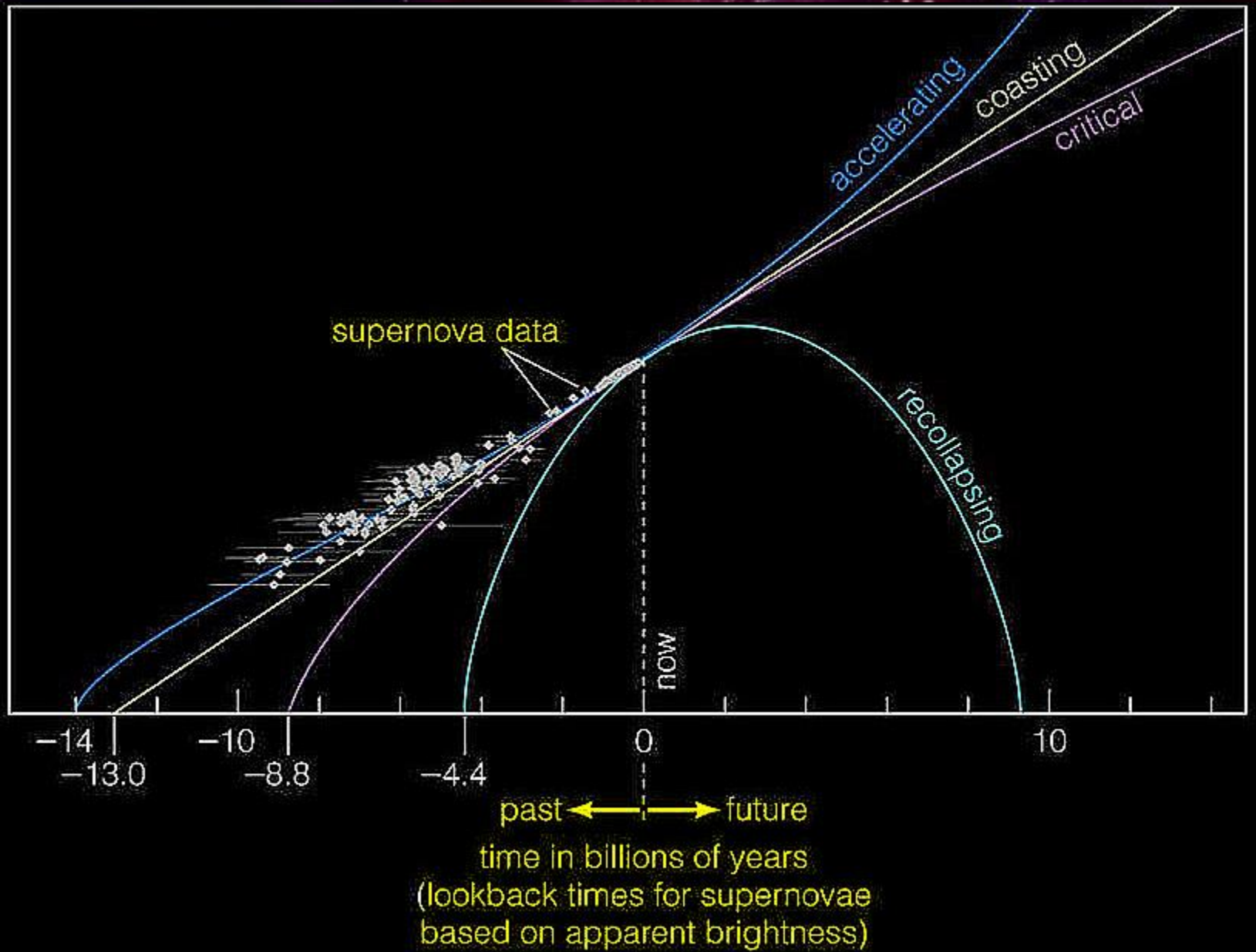


# L'espansione accelera?

- Questi due gruppi di scienziati, studiando nella banda radio innumerevoli ammassi galattici e galassie che emettono getti di plasma, nonché studiando le curve di luce di diverse supernovae vicine, hanno dimostrato che:

l'espansione dell'Universo non sta rallentando, bensì accelerando.

average distance between galaxies  
(based on redshift)



# Legge di Hubble

In astronomia e cosmologia, la **legge di Hubble-Lemaître** (o **legge di Hubble**) afferma che esiste una relazione lineare tra lo spostamento verso il rosso della luce emessa dalle galassie e la loro distanza. Tanto maggiore è la distanza della galassia e tanto maggiore sarà il suo spostamento verso il rosso. In forma matematica la legge di Hubble può essere espressa come:

$$z = \frac{H_0 D}{c} + \frac{1}{2}(1 + q_0) \left( \frac{H_0 D}{c} \right)^2 + \dots$$

dove  $z$  è lo spostamento verso il rosso misurato della galassia,  $D$  è la sua distanza,  $c$  è la velocità della luce e  $H_0$  è la **costante di Hubble**, il cui valore attualmente stimato è attorno a  $2,176 \times 10^{-18}$  Hz (67,15 km/s/Mpc) e  $q_0$  il parametro di decelerazione, definito come  $q_0 = -\frac{\ddot{a} a}{\dot{a}^2}$  con  $a$  fattore di scala.

$a$  = fattore di scala (praticamente il raggio dell'Universo) |

$\dot{a}$  = derivata prima del fattore di scala (velocità di espansione)

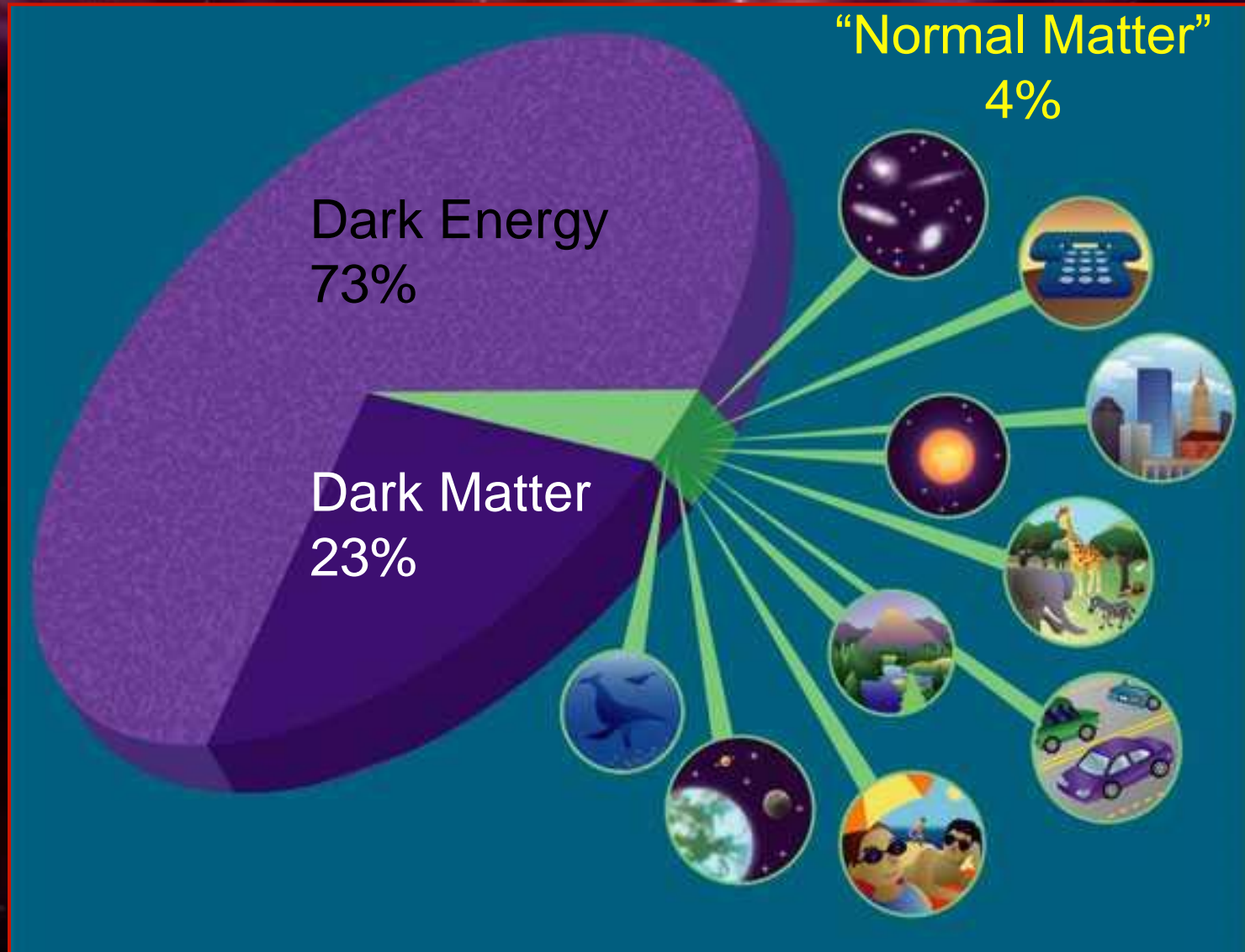
$\ddot{a}$  = derivata seconda del fattore di scala (accelerazione dell'espansione)

# Einstein aveva ragione ?

- I dati dimostrano che l'espansione dell'universo non è rallentata, a causa della gravità, ma è in accelerazione.
- Ciò significa che esiste una forza che agisce contro la gravità.
- L'energia che provoca l'accelerazione è stata chiamata "energia del vuoto" o "energia oscura"
- Essa fornirebbe il 73% di densità necessaria a portare la densità dell'universo al valore critico, compatibile con le osservazioni astronomiche



# Materia ed energia



# Di cosa è fatta la Materia oscura?

- Neutrini ?
- Materia sotto forma di **Stelle nane**, poco luminose e quindi non visibili ?
- **WIMPS** , ovvero particelle massive poco interagenti (sono in corso ricerche agli acceleratori per produrle) ?

**La ricerca sulla Materia oscura è una delle sfide della Fisica Moderna**

# Qual'è il futuro dell'Universo?

- Le sorti del nostro universo sono legate all'equilibrio che si instaurerà tra:
  - l'energia cinetica posseduta dalle galassie,
  - l'indice d'espansione,
  - la forza gravitazionale con cui i corpi celesti si attraggono.
- La densità critica definisce gli scenari

# Il ritmo dell'espansione

- Potete immaginare la forza gravitazionale come a delle braccia con cui la materia può avvinghiarsi ad altra materia:
- se i corpi e le particelle sono abbastanza vicini da "afferrarsi" si avvicineranno sempre di più... e il nostro sarà un **universo chiuso**



# Il ritmo dell'espansione

- Se sono già troppo lontani non riusciranno a toccarsi e si allontaneranno, in un universo aperto



# Il punto di non ritorno

- Attualmente siamo in grado di prevedere solo quale sarà il

- punto di non ritorno:

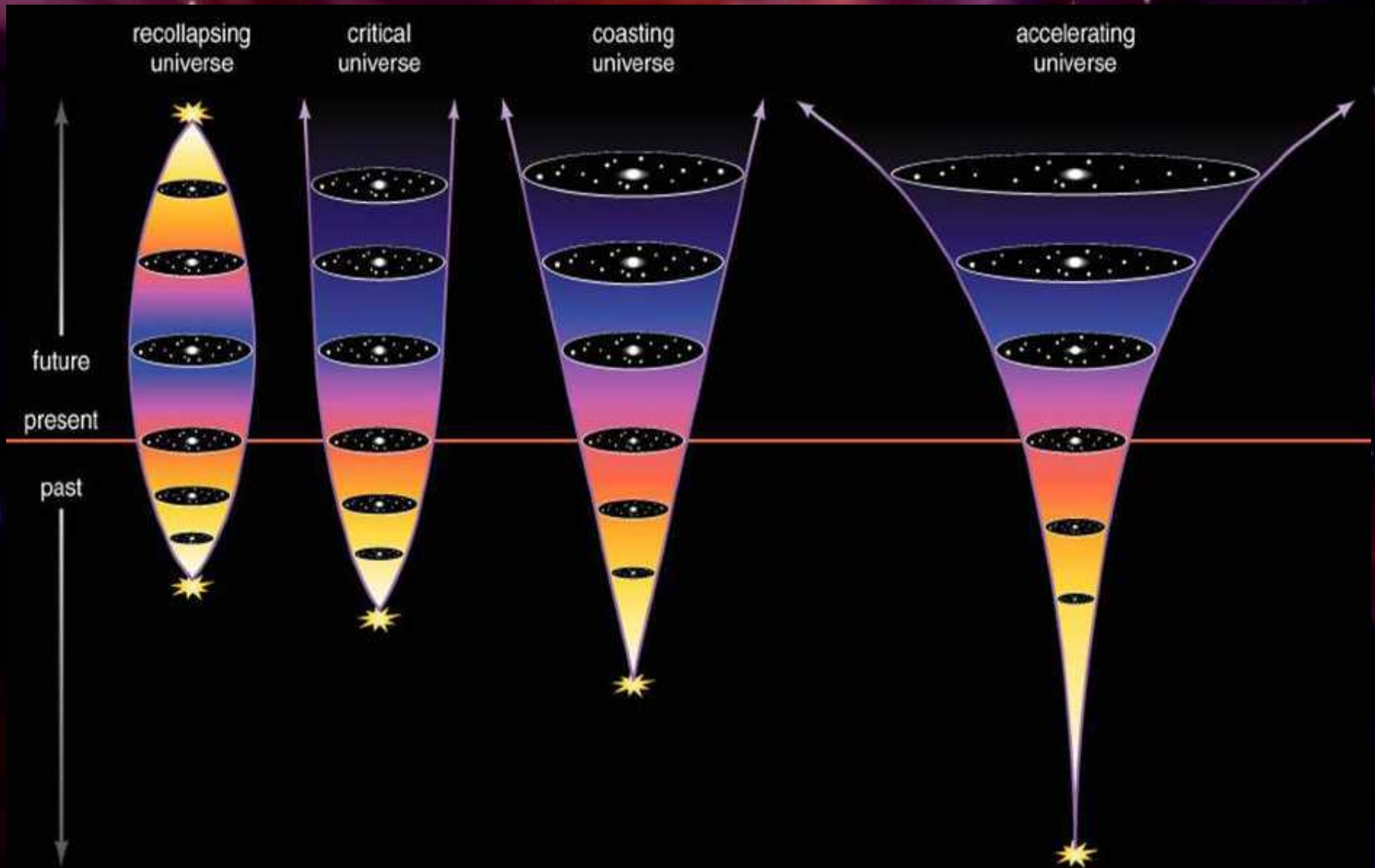
- » nel momento in cui per ogni  $\text{cm}^3$  del nostro universo ci saranno meno di 5 atomi di idrogeno, l'attrazione gravitazionale tra i corpi celesti diventerà insufficiente a frenare la spinta espansionistica.

# La densità critica

- E' proprio questo valore che viene definito **densità critica**, la linea di demarcazione tra un universo chiuso ed aperto.
- L'indice preso come punto di riferimento è  $\Omega$  il cui valore è determinato dal rapporto tra la densità reale dell'universo, e la densità critica

$$\Omega = \text{densità reale} / \text{densità critica}$$

# I modelli Cosmologici



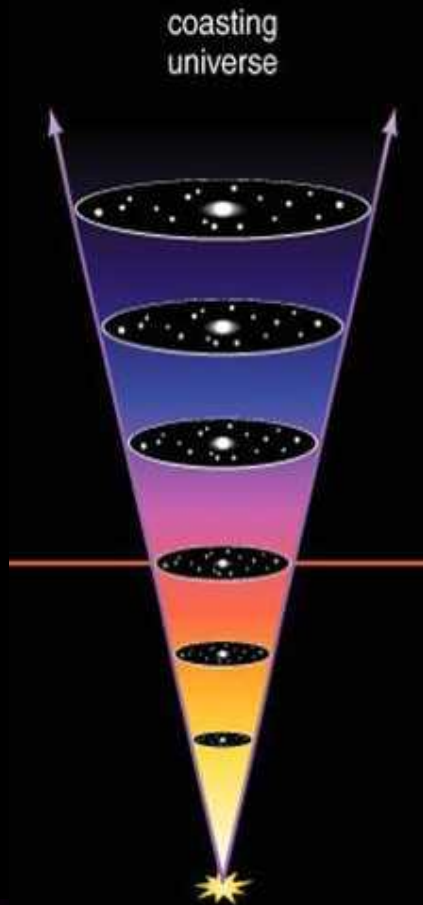


# La fine dell'universo

1. Recollapsing Universe: l'espansione si ferma e l'universo collassa
2. Critical Universe: non collassa, si espande più lentamente
3. Coasting Universe: si espande all'infinito con velocità costante
4. Accelerating Universe\*: l'espansione è sempre più accelerata con il tempo  
\*teoria attualmente più accreditata

# La densità critica

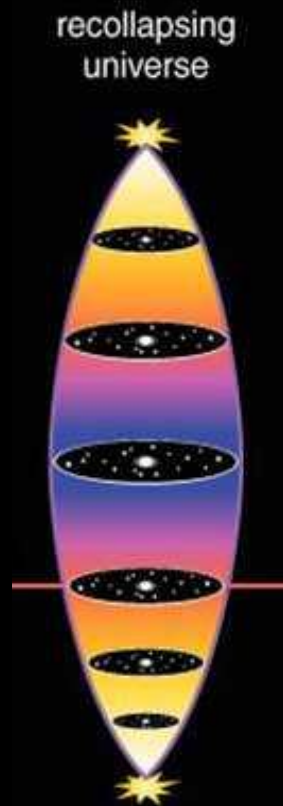
- Se il valore di  $\Omega$  sarà al di sotto di 1 non si supererà



- non ci sarà abbastanza materia,
- si proseguirà in un'espansione all'infinito,
- il nostro universo avrà raggiunto la sua velocità di fuga...

# La densità critica

- Se il valore di  $\Omega$  sarà maggiore di 1



- la densità reale sarà maggiore delle densità critica
- ci sarà sufficiente materia per generare un'attrazione sempre più forte che porterà verso l'inversione di marcia:

- il *BIG CRUNCH* ( la grande implosione)

# La densità critica

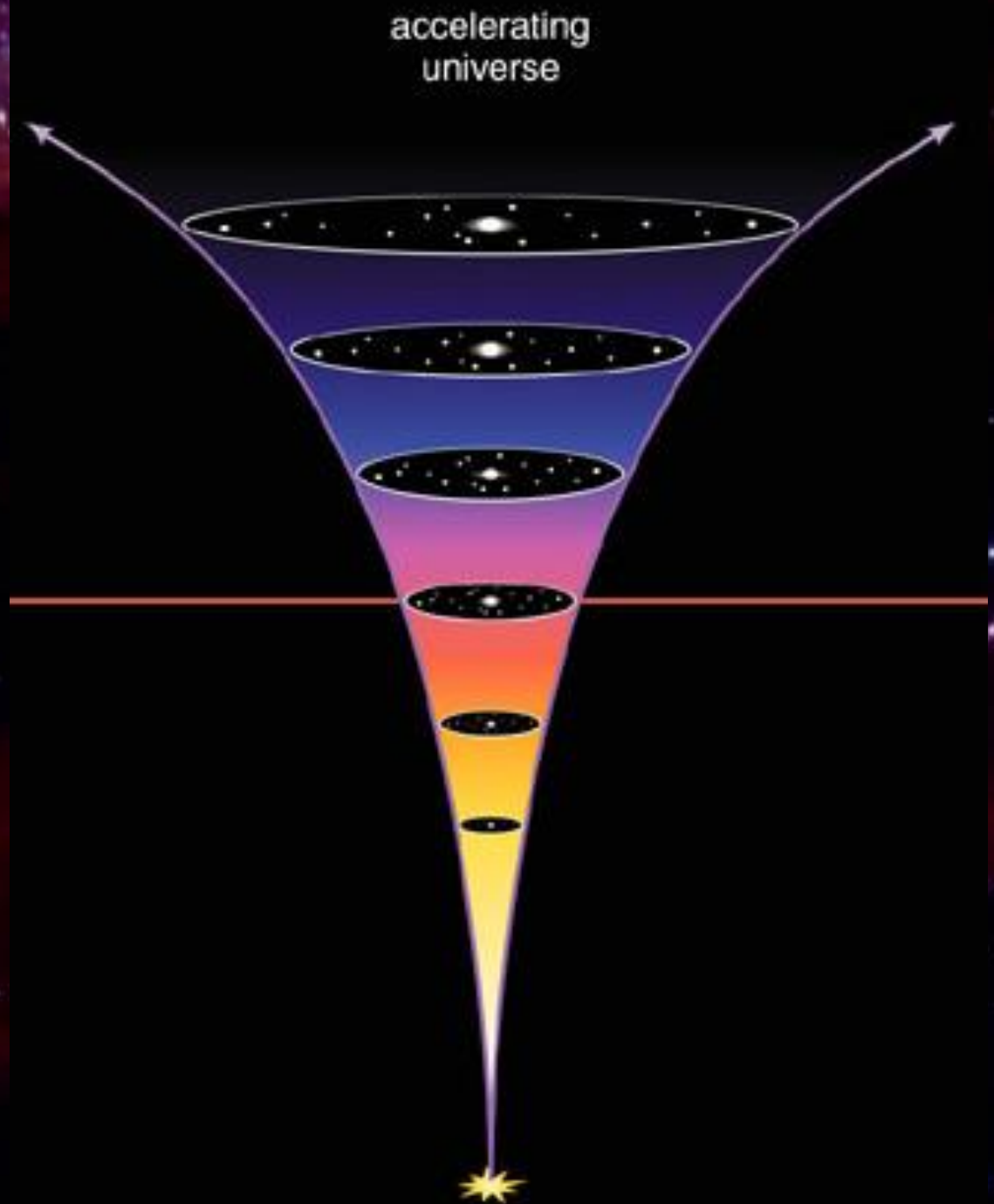
- Se il valore di  $\Omega$  sarà uguale a 1



- ad un certo punto la spinta espansionistica dovrebbe rallentare, tendendo a zero senza mai giungervi.

Tuttavia  
l'espansione  
sembra  
accelerare!

Dark  
Energy ?



# La visione attuale

Le recenti osservazioni astronomiche forniscono il seguente quadro dell'universo:

- Piano ed infinito
- In espansione accelerata (71 km/sec per mega parsec)
- Età dell'universo 13,7 miliardi di anni
- Temperatura media del fondo cosmico 2,735 gradi assoluti