



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 4

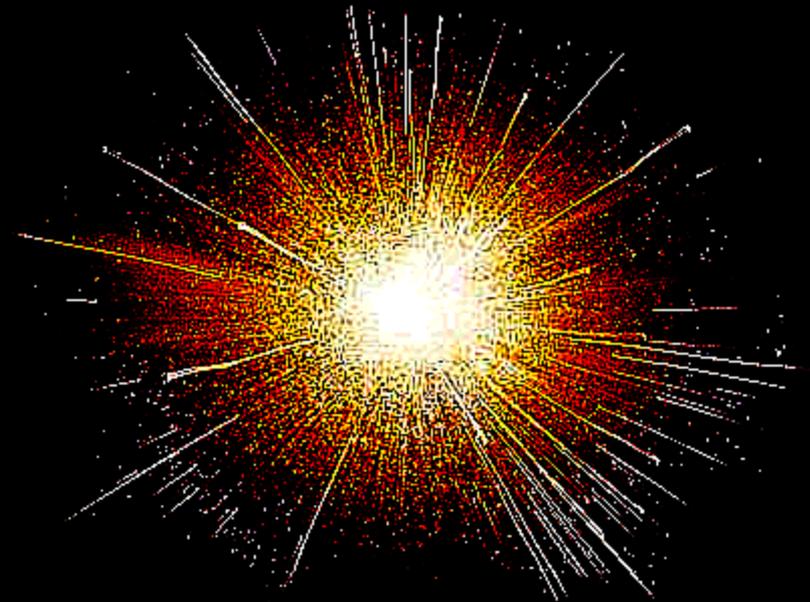
L'Universo "*osservabile*" e quello
"*non osservabile*"

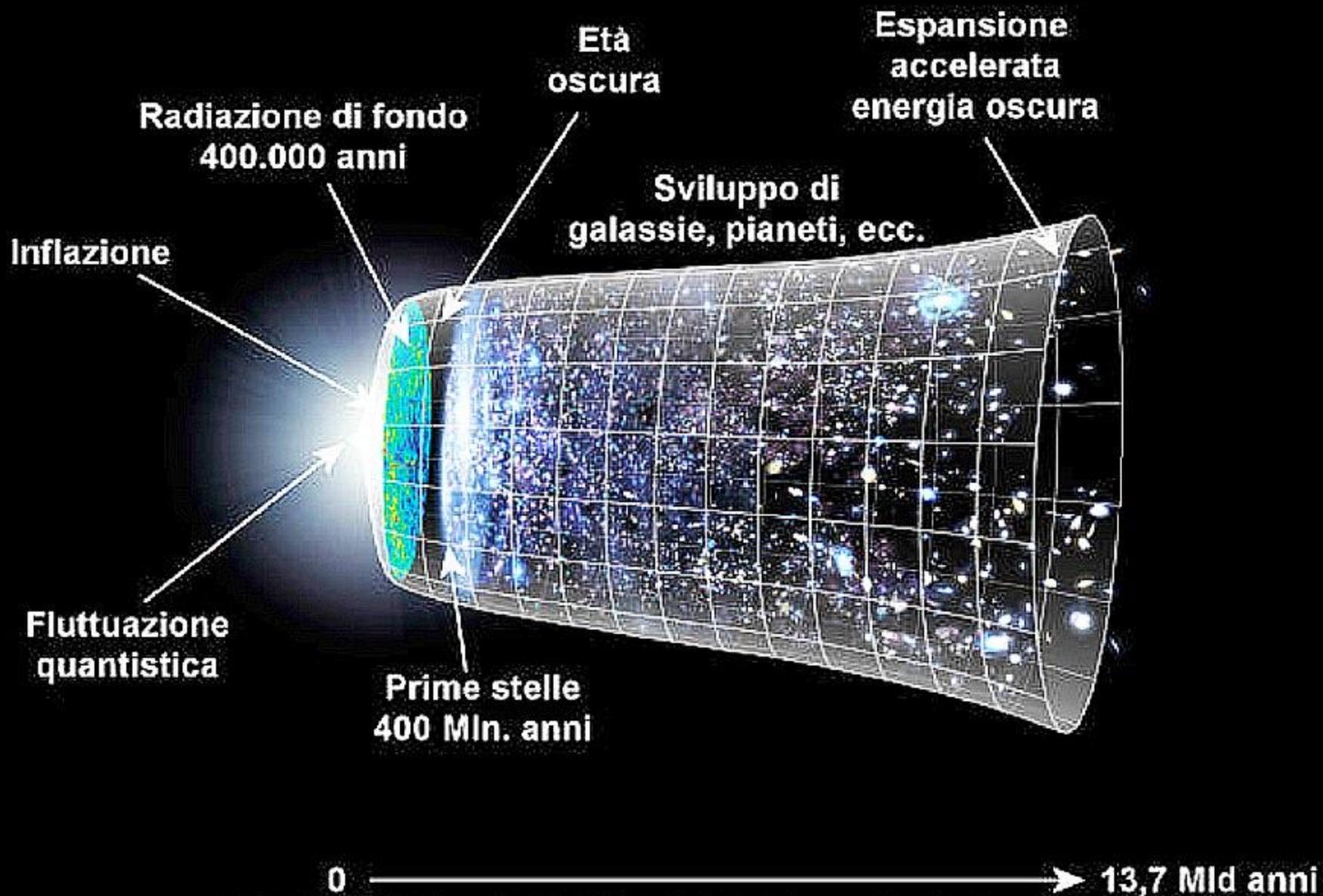
Il "Big Bang"...

Dove non c'era il niente, ora
c'era il tutto:
l'intero universo.

Un **universo piccolo**,
immensamente caldo, con
grande densità, formato da
particelle elementari ...

Che per una frazione
infinitesima di secondo si
espanso in modo rapidissimo.
Poi rallentò un poco, ma
continuò ad espandersi, come
fa ancora.





ESPANSIONE DAL BIG BANG

Il "Big Bang"...

Il tempo e lo spazio ebbero origine dalla singolarità, che nelle prime infinitesimali frazioni di secondo subì una enorme espansione a una velocità molto superiore a quella della luce, l'**inflazione**.

Dopo circa 400.000 anni si liberò la radiazione di fondo e in seguito si formarono le galassie, le stelle e i pianeti.

PRECISAZIONI SUL BIG BANG

- Non esiste un centro dell'espansione, ogni punto è equivalente
- E' lo spazio fra le galassie ad espandersi (la nostra galassia, il nostro sistema solare, la nostra casa non si stanno espandendo !)
- Non esiste un "bordo" dell'universo. L'espansione non avviene "dentro" qualcos'altro.
- L'universo, nonostante si stia espandendo, potrebbe comunque essere infinito.
- Anche se l'universo fosse infinito, potremmo vederne solo una parte: quella percorsa dalla luce in 13,7 miliardi di anni, aumentata per l'espansione.

Ma come ci siamo arrivati?

Per determinare le dimensioni dell'Universo visibile (attuale) è necessario misurare le distanze degli oggetti che lo compongono

Le misure di distanze nell'Universo

A conceptual illustration of a cosmic distance ladder. A long, perspective-view ladder with rungs extends from the bottom left towards the top right. The background is a vibrant, colorful field of galaxies and nebulae in shades of blue, purple, and red. Several distinct galaxies are visible, including a prominent blue and white spiral galaxy in the upper right and a bright blue elliptical galaxy in the lower right. The overall scene is set against a dark, starry space.

Ci consentono di capire come sono distribuiti gli oggetti celesti nel cosmo

...quanto sono brillanti in realtà

...quanto è denso l'Universo

...quanto è grande l'Universo

...quanto è massivo l'Universo

...quanto è vecchio l'Universo



Edwin Hubble 1929



Georges Lemaître 1927

La legge di Hubble: VELOCITÀ = H_0 X DISTANZA

$$v = HR$$

Where

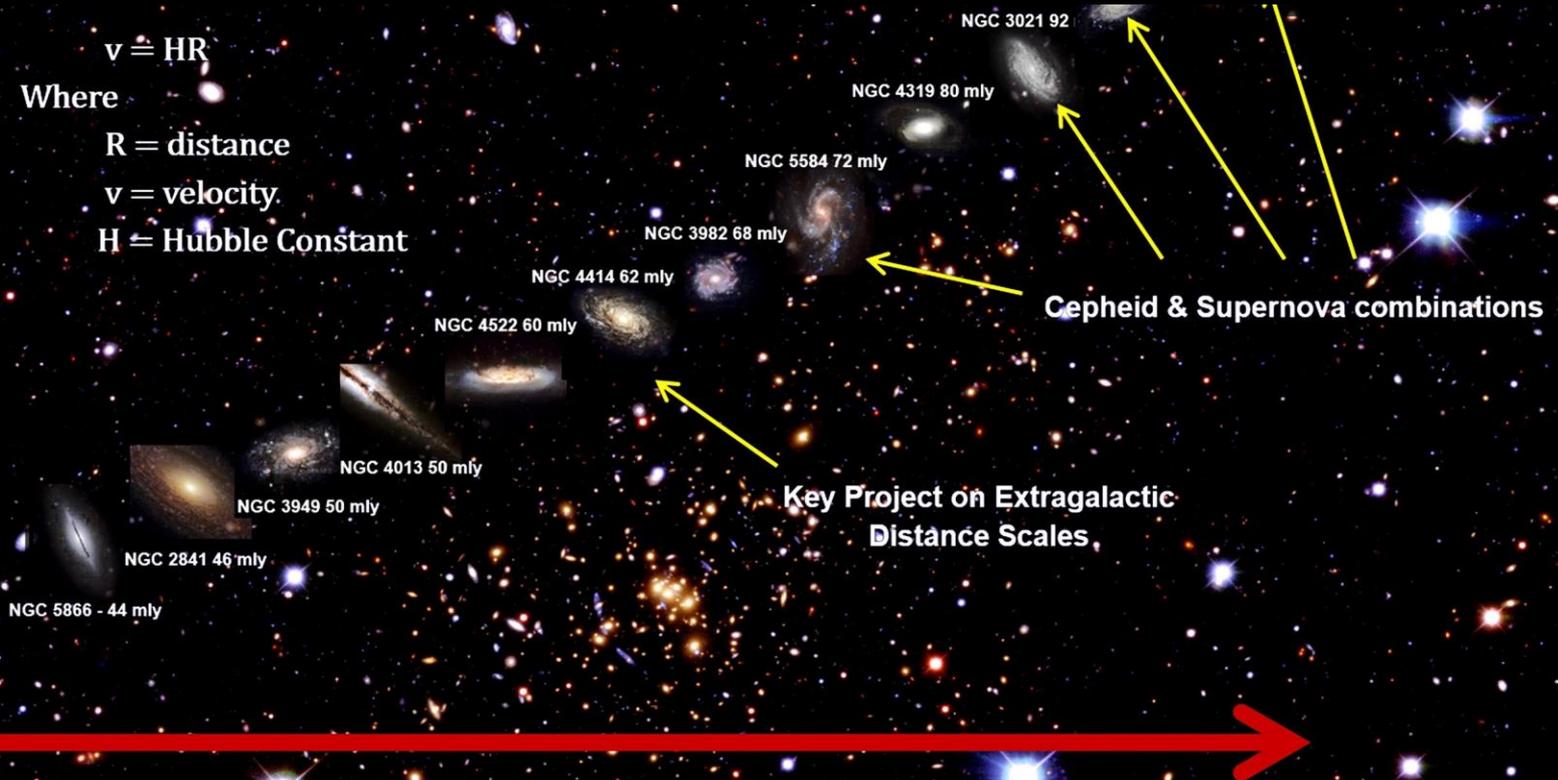
R = distance

v = velocity.

H = Hubble Constant

Distance

(determined by Cepheids)



Cepheid & Supernova combinations

Key Project on Extragalactic Distance Scales

Velocity (determined by Red Shift)

Hubble Deep Field



La costante di Hubble H_0 è una misura fondamentale che ha un impatto rilevante innanzitutto sull'età dell'Universo:

$$H_0 = 2.35 \times 10^{-18} \text{ 1/sec}$$

Nei modelli cosmologici che assumono un Big Bang infatti il tempo intercorso fra il Big Bang e l'epoca attuale è dato approssimativamente da $1/H_0$: più basso è il valore di H_0 , più vecchio è il cosmo.

Diamo un po' di numeri:

Età dell'Universo: $T(\text{univ}) = 1/H_0$

$$T(\text{univ}) = 4.26 \times 10^{17} \text{ secondi}$$

Pari a 13.47 Miliardi di anni

Raggio dell'Universo visibile:

$$R(\text{univ}) = c / H_0$$

$$R(\text{univ}) = 1.28 \times 10^{26} \text{ metri}$$

circa 14 miliardi di anni luce

c = velocità della luce nel vuoto

Densità media dell'Universo

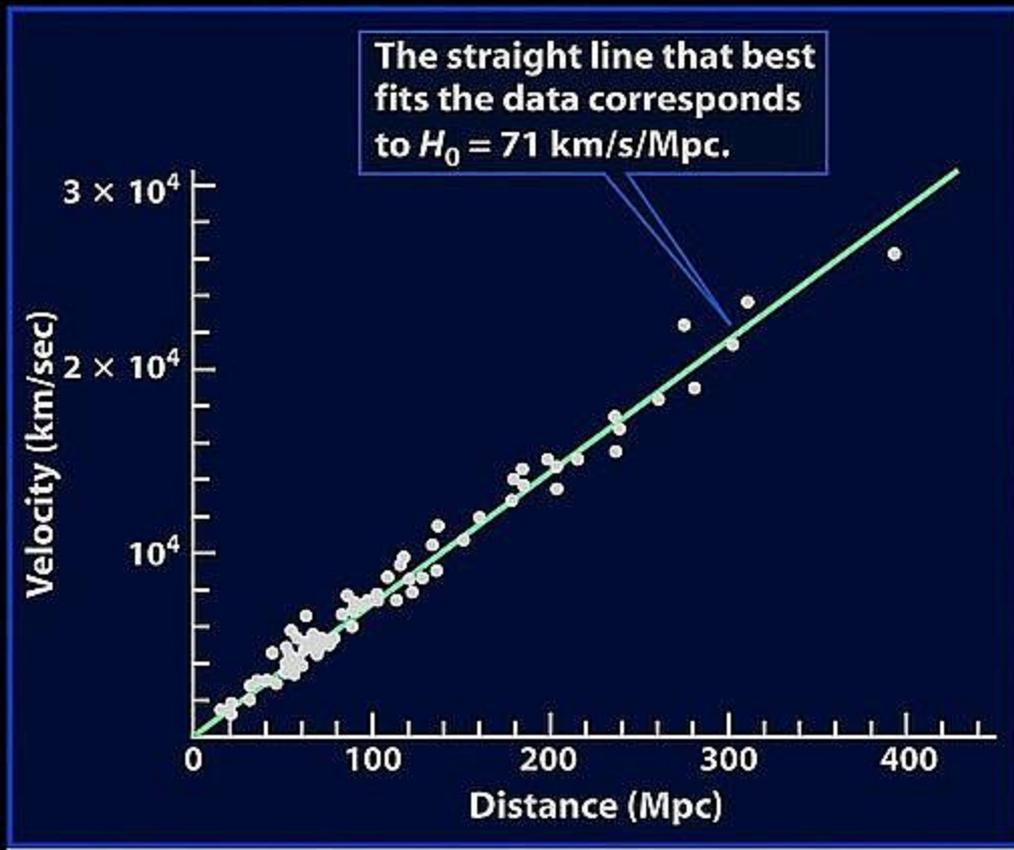
$$\rho_o = \frac{3}{8} \frac{H_o^2}{\pi G}$$

$$\rho_o = 1 \times 10^{26} \text{ Kg/m}^3$$

Massa complessiva dell'Universo

$$M(\text{univ}) = \frac{1}{2} R^3 \frac{H_0^2}{G}$$

$$M(\text{univ}) = 8.6 \times 10^{52} \text{ Kg}$$



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

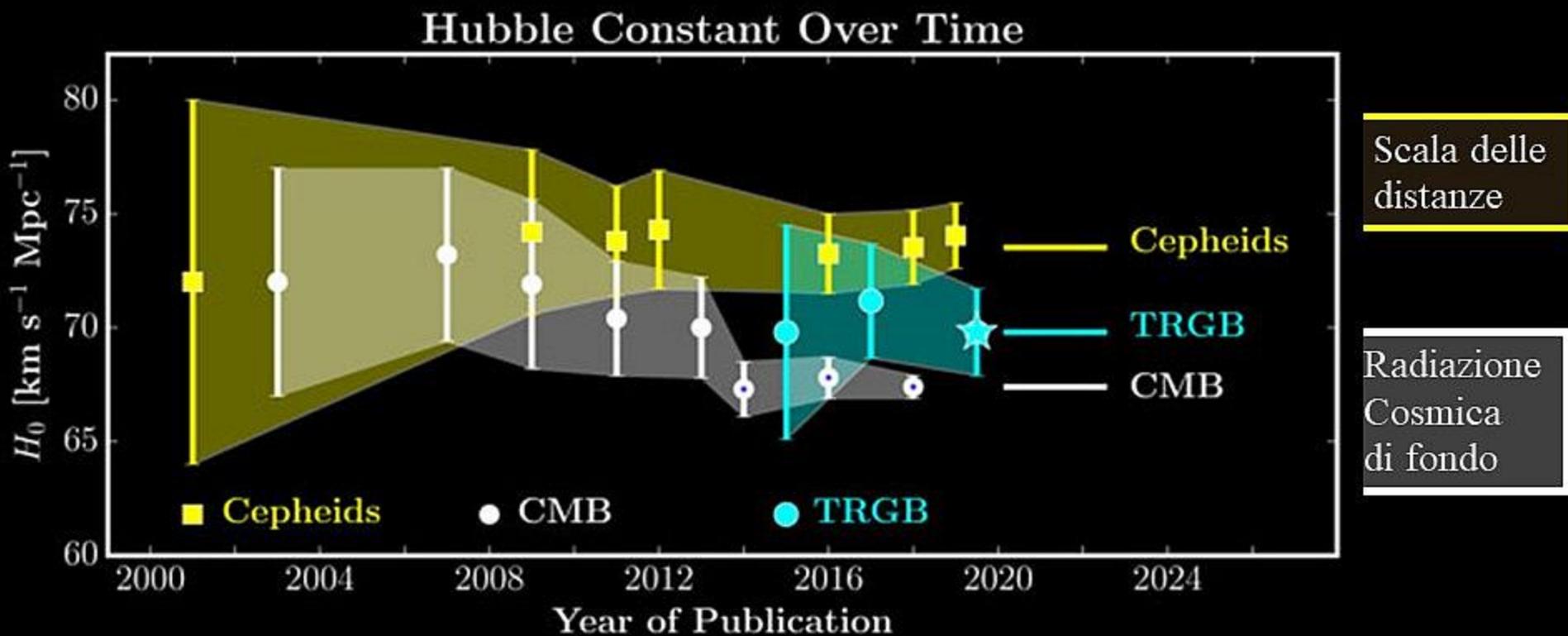
LEGGE DI HUBBLE

$$v = H_0 D$$

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

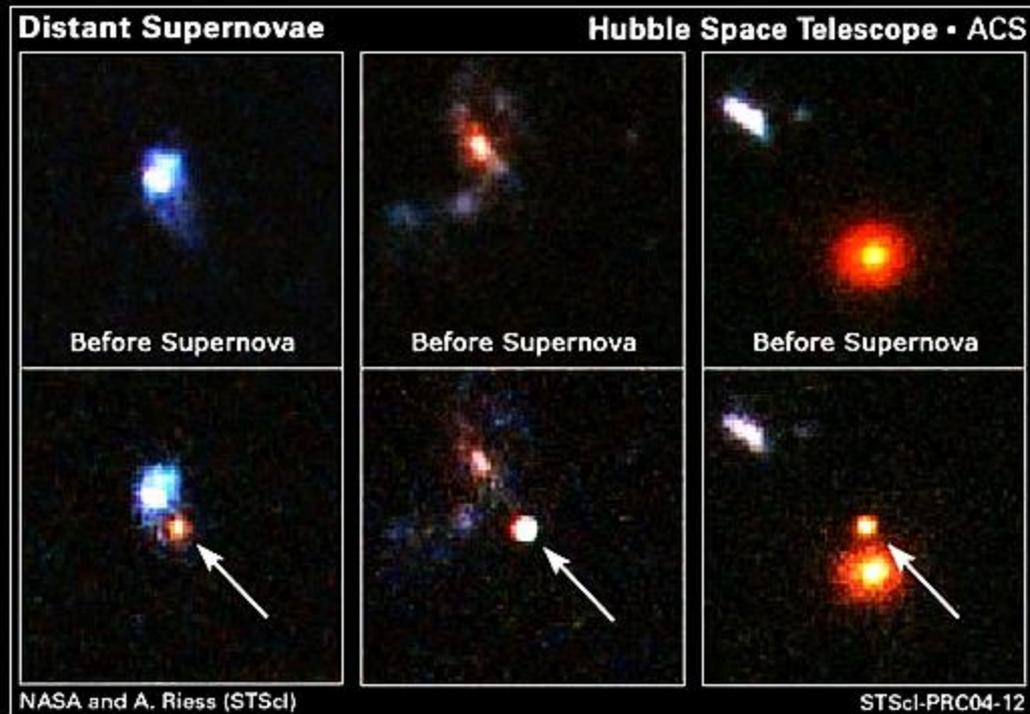
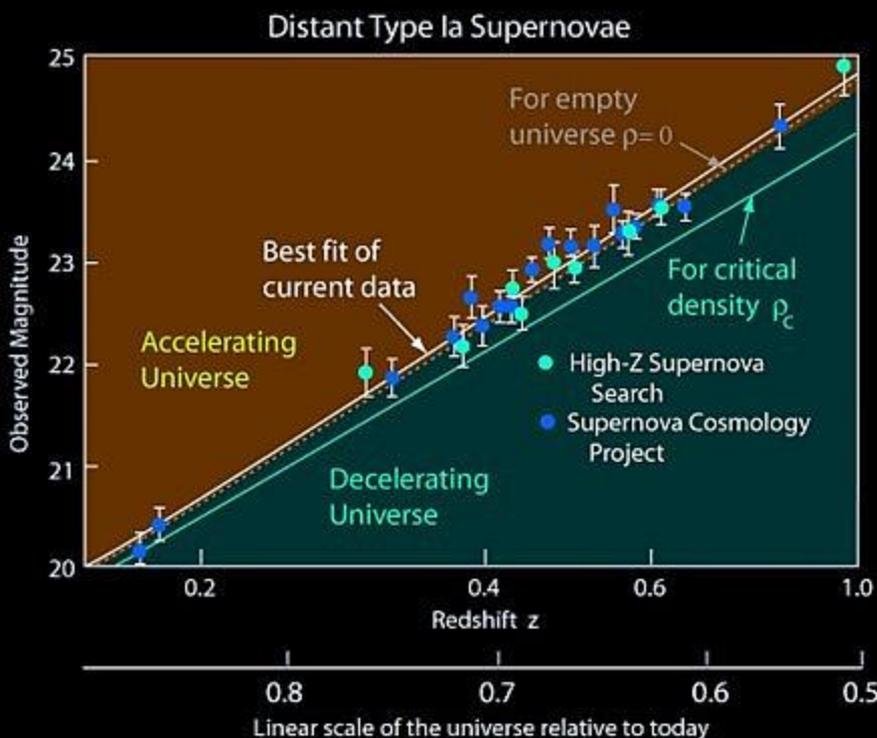
$$H_0 = 2.35 \times 10^{-18} \text{ 1/sec}$$

TRGB : le giganti rosse più luminose



LA SCOPERTA DELL' "ENERGIA OSCURA"

DERIVA DALLO STUDIO DEL REDSHIFT DELLE SUPERNOVAE Ia MOLTO DISTANTI



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 $2,176 \times 10^{-18} \text{ Hz}$ ($67,15 \text{ km/s/Mpc}$) 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)

Equazioni di Friedmann

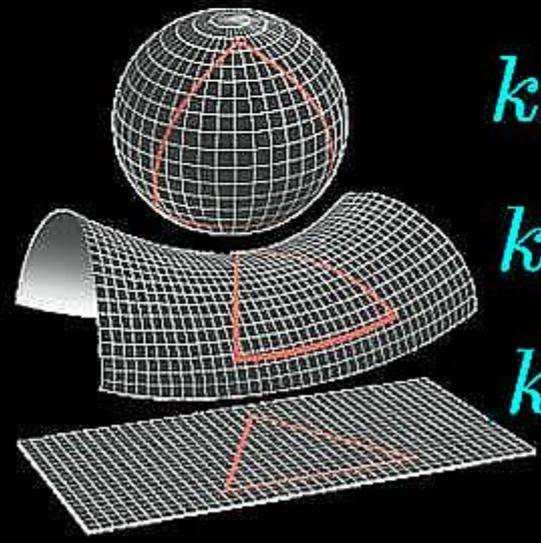
$$\dot{a} = \left[a^2 \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3} - k c^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

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



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

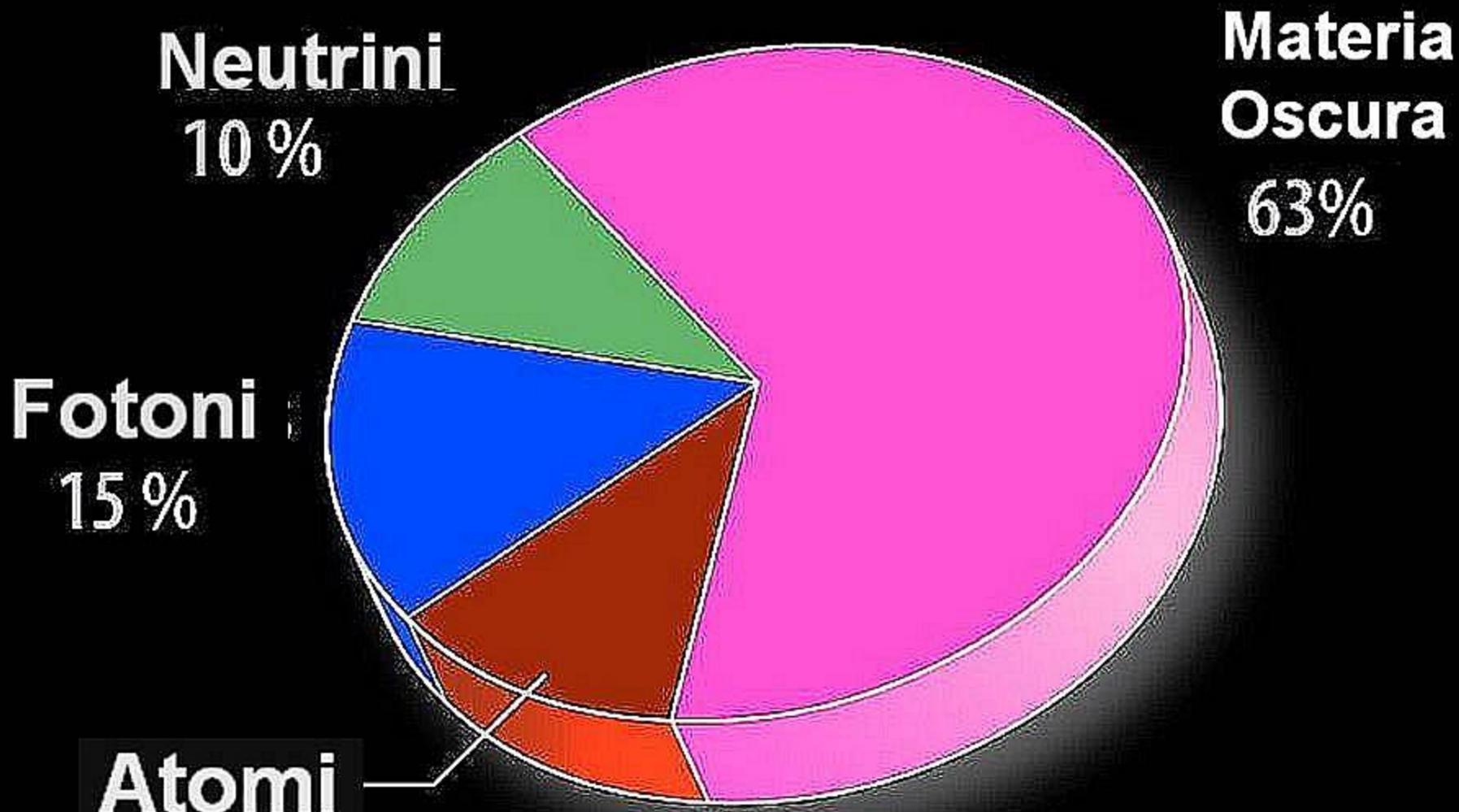
- a = Raggio dell'Universo (fattore di scala)
- \dot{a} = Velocità di espansione
- \ddot{a} = Accelerazione dell'espansione
- ρ = Densità media della materia
- p = Pressione
- c = Velocità della luce
- G = Costante di Gravitazione Universale
- Λ = Costante cosmologica
- k = Parametro di curvatura



$k=+1$

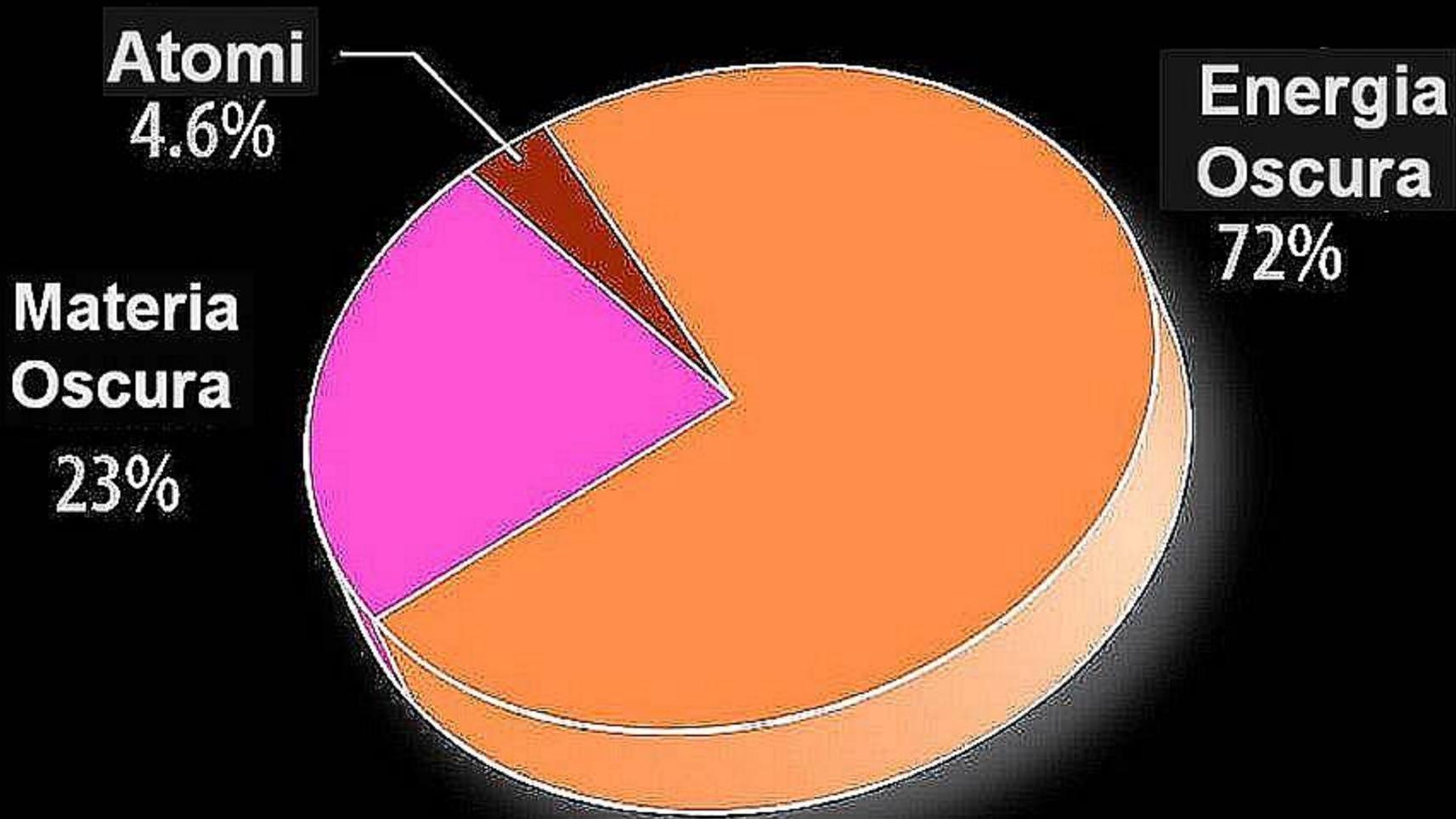
$k=-1$

$k=0$



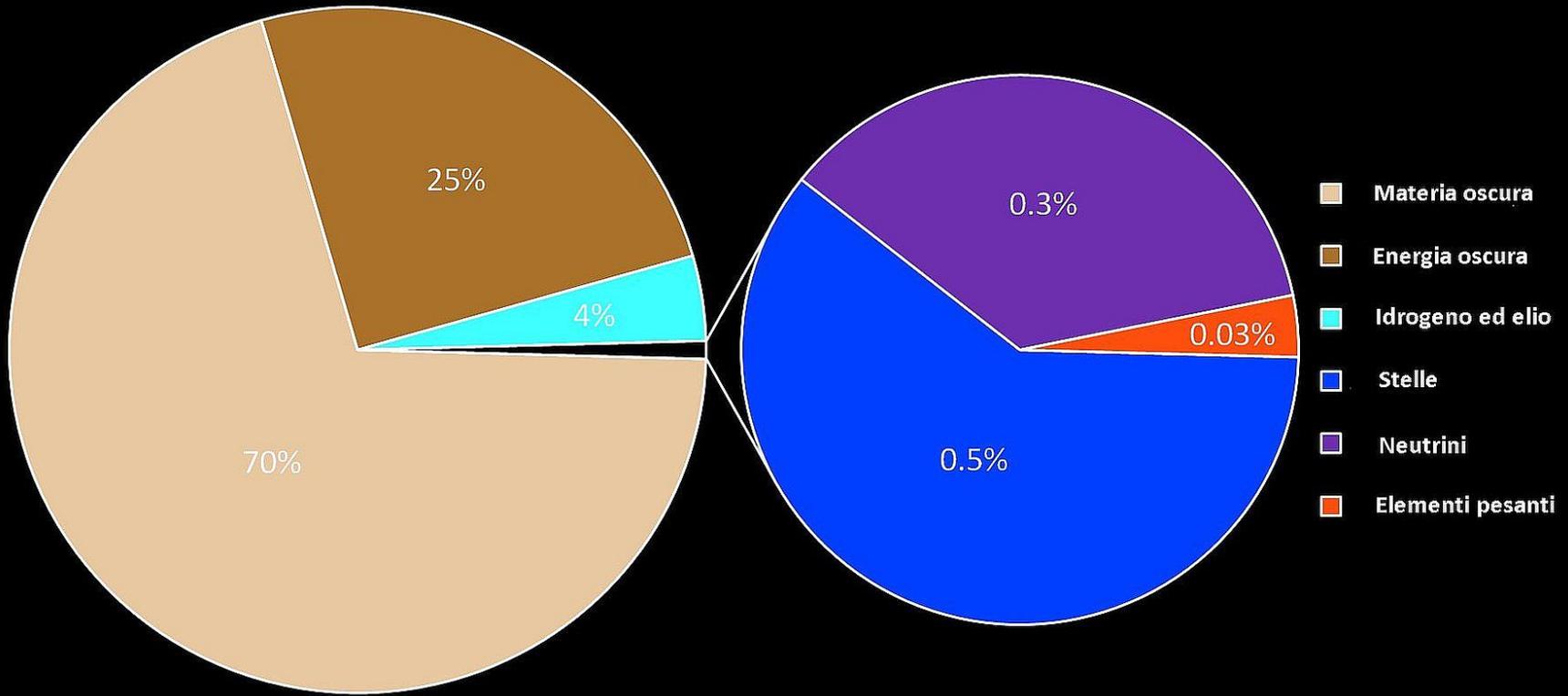
13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)



Oggi

La composizione dell'Universo



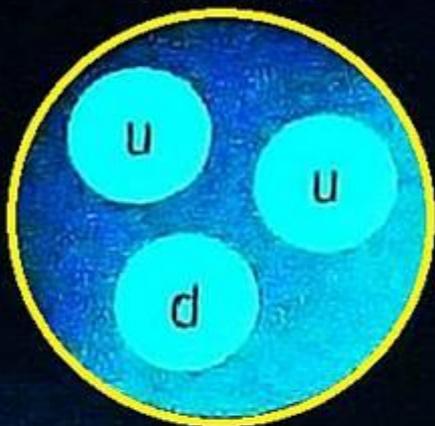
Struttura della Materia

Adroni

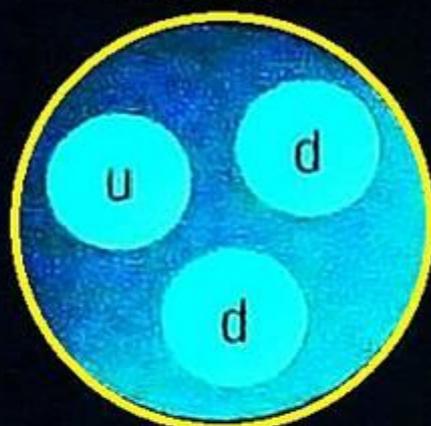


Barioni
(3 Quark)

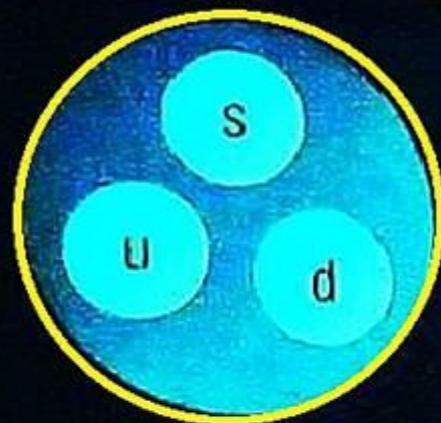
PROTONE



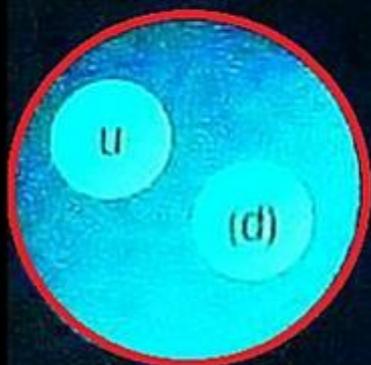
NEUTRONE



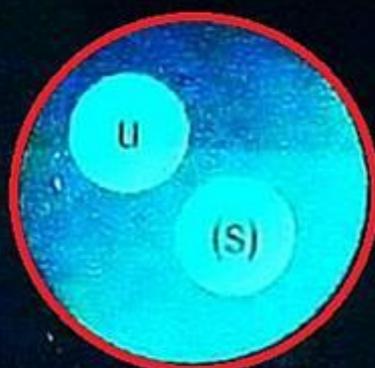
LAMBDA



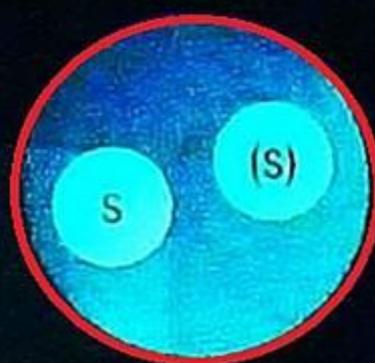
MESONE PI^+



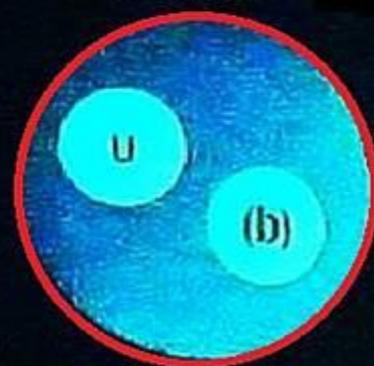
MESONE KA^+



MESONE PHI



MESONE B^+



Mesoni
(2 Quark)

Rappresentazione di alcuni adroni a seconda della loro combinazione di quark. Nella riga superiore, i barioni (formati da tre quark) e in quella inferiore, i mesoni (formati da due quark).

Materia

Le 17 particelle del Modello Standard



Se l'Universo non fosse in continua espansione, il raggio dell'universo osservabile sarebbe pari alla distanza percorsa dalla luce nell'arco di tempo trascorso dall'inizio dell'Universo (l'età dell'universo), cioè l'orizzonte dell'universo osservabile sarebbe posto a circa 13,72 miliardi di anni luce.

Poiché però l'universo si sta espandendo continuamente, la distanza effettiva di questo orizzonte è più grande.

Una radiazione
elettromagnetica partita 13,72 miliardi
di anni fa che giungesse ora ad un
osservatore sarebbe relativa a una
sorgente che nel frattempo si è
allontanata dall'osservatore a causa
dell'espansione.

Alcune stime ipotizzano che lo spazio si potrebbe essere espanso per circa 46,5 miliardi di anni luce ($4,7 \times 10^{23}$ km).

Sulla base di questa stima, il diametro della sfera dell'universo osservabile sarebbe pari a 93 miliardi di anni luce.

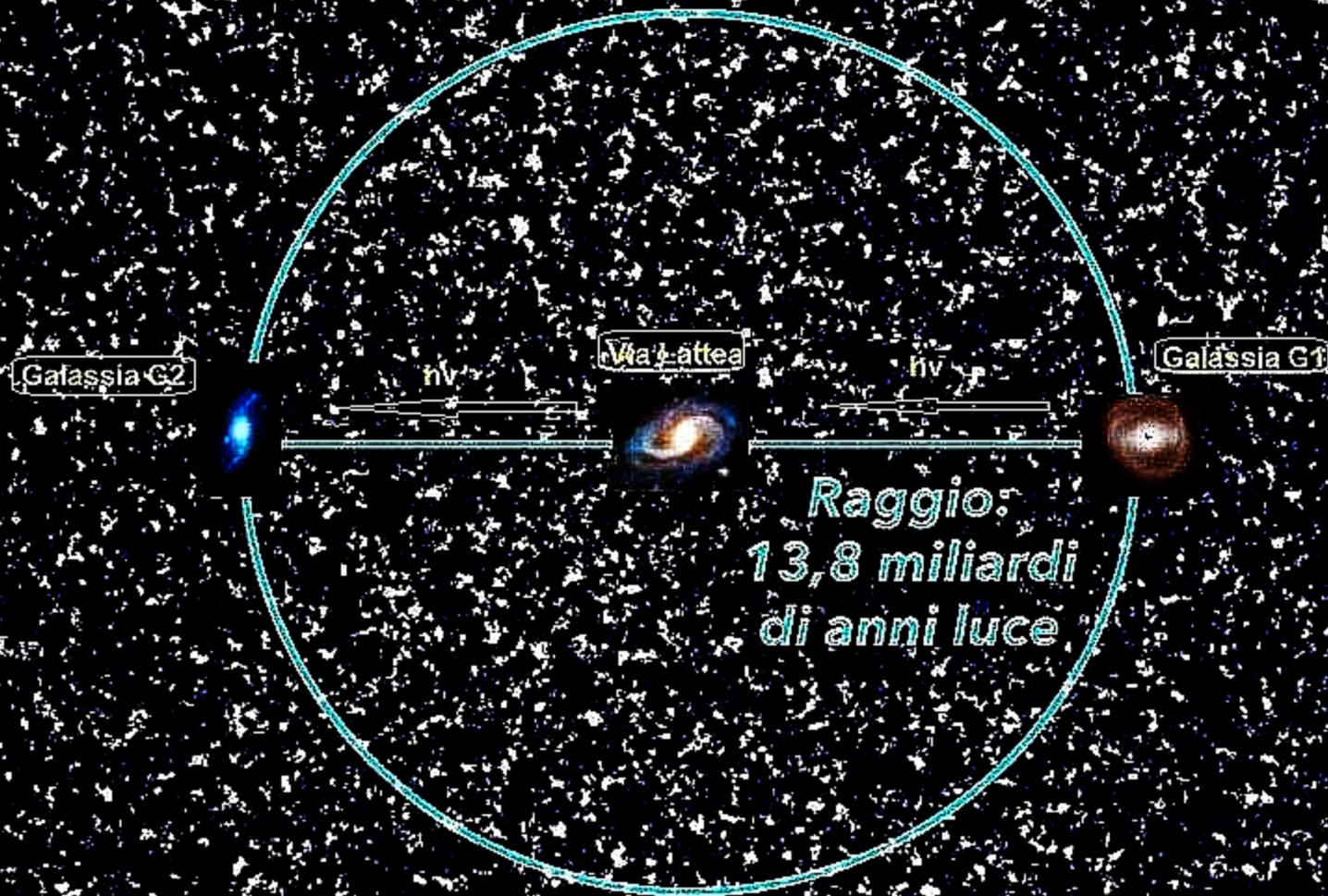
Il volume di questo spazio sferico è pari a circa 5×10^{32} anni luce cubi; queste dimensioni potrebbero contenere circa 7×10^{22} stelle, organizzate in circa 2×10^{12} galassie (duemila miliardi, secondo una stima effettuata nel 2016), agglomerate in gruppi e ammassi di galassie e super ammassi.

Osservazioni condotte col telescopio spaziale Hubble suggeriscono un numero medio di galassie ancora maggiore.



L'espansione risulterebbe in accelerazione, motivo per cui vi è un limite all'universo *osservabile*, delimitato dall'orizzonte cosmologico, cioè la regione dell'universo oltre il quale ogni oggetto si allontana dall'osservatore a velocità maggiori della luce, tale orizzonte oggi è pari a 46,5 miliardi di anni luce.

Quanto è grande l'Universo?



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

...cioè si può osservare e misurare

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

Vi è da chiarire che sebbene oggetti oltre l'orizzonte cosmologico si allontanano dall'osservatore a velocità maggiori di quelle della luce questo non risulta in contrasto con la relatività generale di Einstein.

Infatti quest'ultima proibisce qualsiasi movimento a velocità superluminali *all'interno* dell'universo ma non pone alcun limite alla velocità di espansione di quest'ultimo.

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



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

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

Energia del vuoto...

(Effetti)



Energia oscura o esotica