



UNIVERSITA' DEL TEMPO LIBERO DI GORGONZOLA - APS

A.A. 2023-2024 - Corso di Astrofisica

# La struttura a grande scala dell'Universo

## Lezione 1

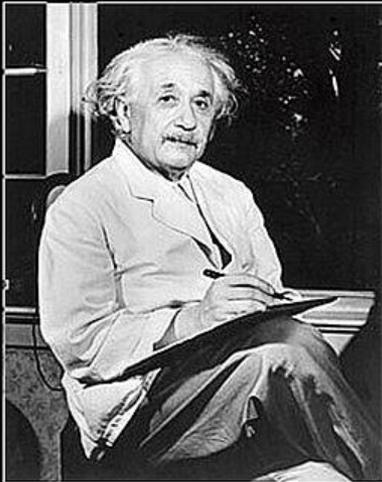
I quattro componenti fondamentali dell'Universo:  
lo Spazio, il Tempo, la Materia e l'Energia

# 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.

# 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,

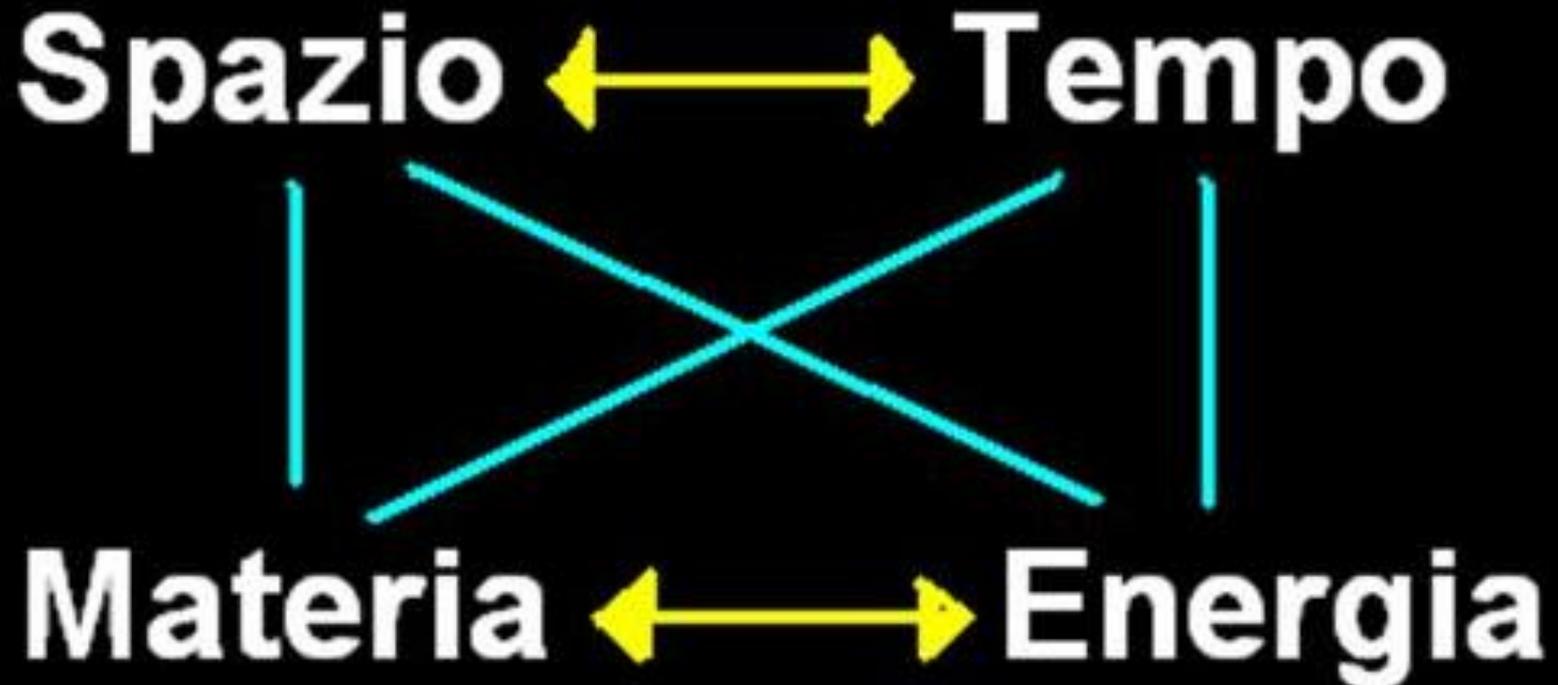
Albert Einstein

A close-up, slightly low-angle shot of Yoda's face. He has a wrinkled, green complexion with deep lines around his eyes and mouth. His eyes are wide and looking slightly to the right. The background is dark and out of focus, showing some of his hair and the texture of his skin.

**Spazio  
Tempo  
Materia  
Energia**

**4 diversi aspetti della stessa cosa...**

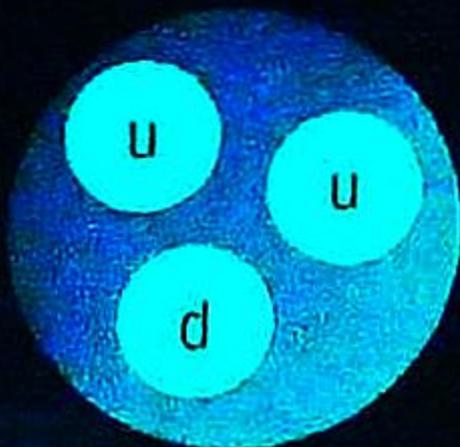
Esiste quindi una corrispondenza  
incrociata tra tutti...



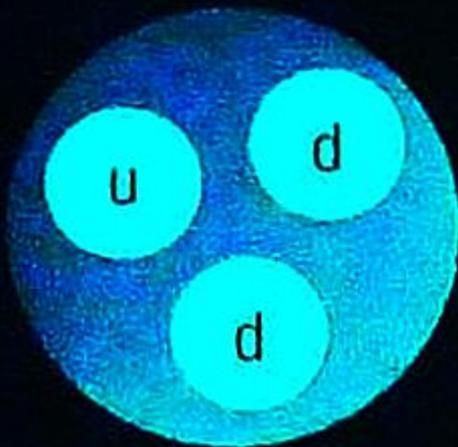
sono legati indissolubilmente...

# Materia

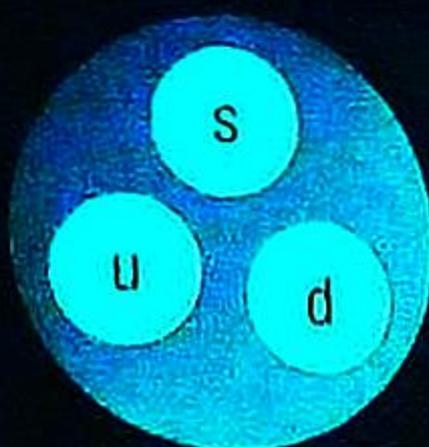
PROTONE



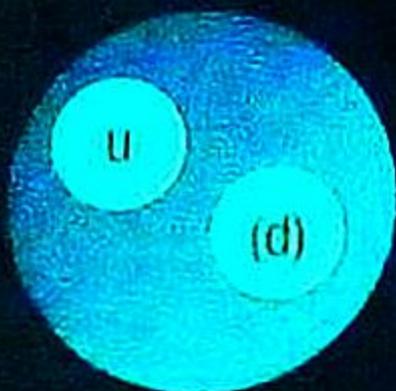
NEUTRONE



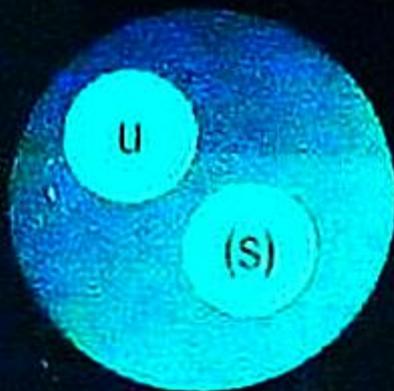
LAMBDA



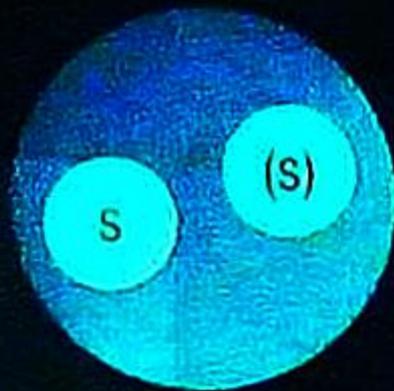
MESONE PI+



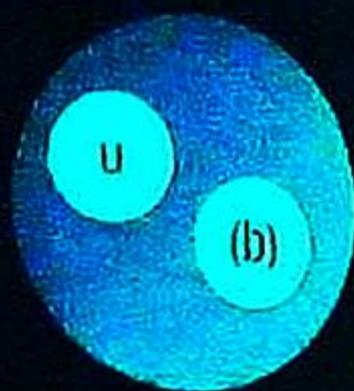
MESONE KA +



MESONE PHI



MESONE B+



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

QUARK



Sopra



Sotto



Fascino



Strano



Fondo



Cima

LEPTONI



Elettrone



Neutrino  
elettronico



Muone



Neutrino  
muonico



Tau



Neutrino  
tau

BOSONI



Fotone



Bosoni intermedi



Gluone



Higgs

Le diciassette particelle elementari che costituiscono il modello standard.

# Unità assolute

## 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 ( $\Theta$ )	$T_p = \frac{m_p c^2}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}}$	$1,416\ 785(71) \times 10^{32}$ 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:

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

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

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

velocità della luce

costante di Plank

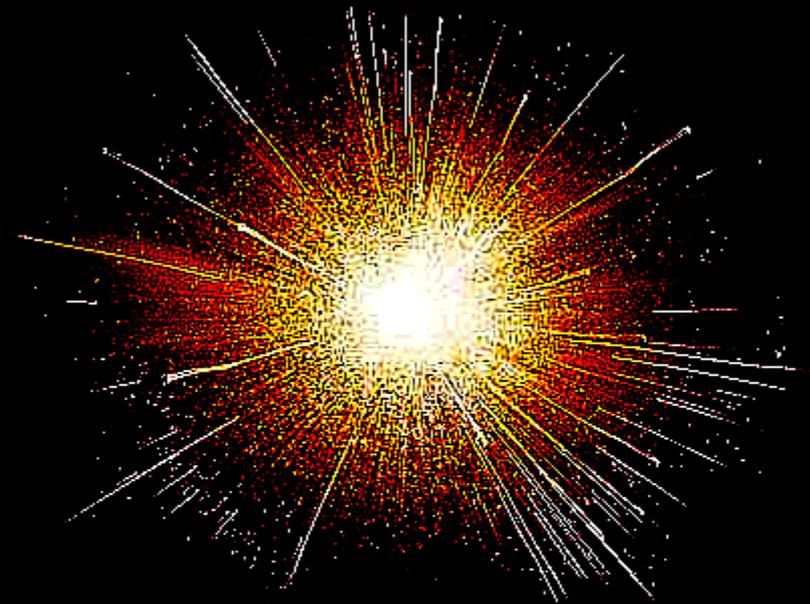
costante di Gravitazione Universale

# 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  
**espansero** in modo rapidissimo.  
Poi rallentò un poco, ma  
continuò ad espandersi, come  
fa ancora.



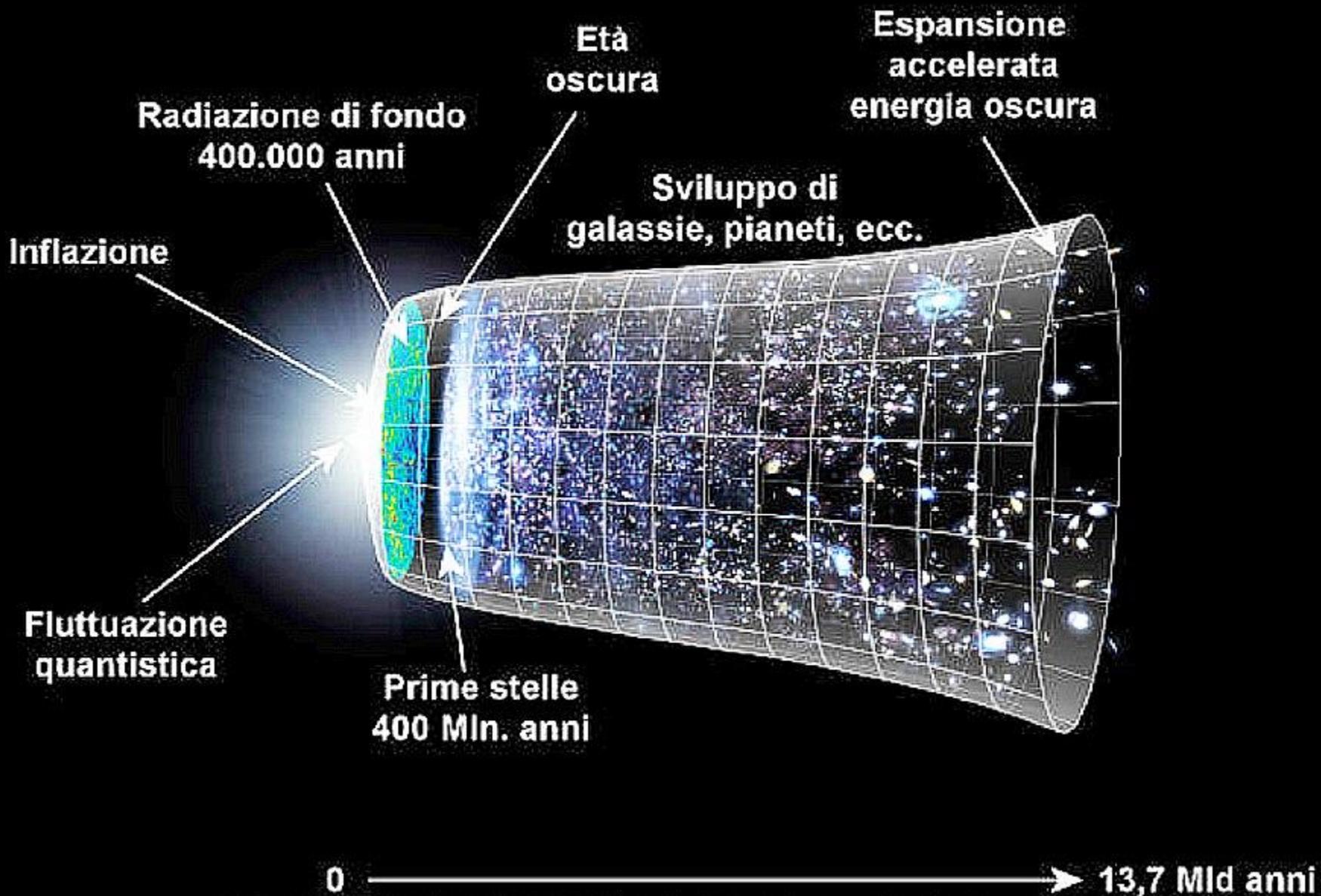
# Il "Big Bang"...

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.

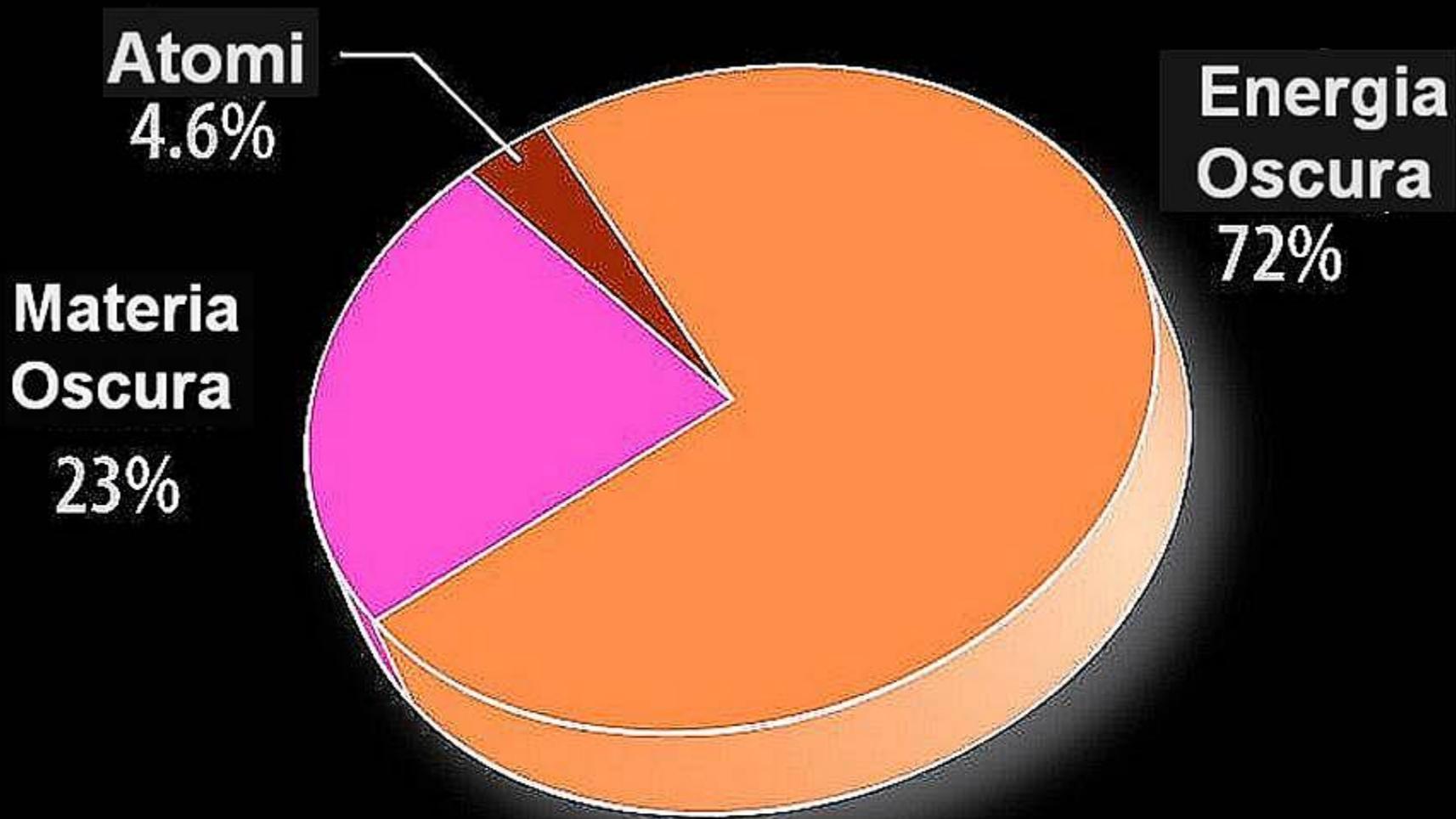


# ESPANSIONE DAL BIG BANG



13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)



Oggi

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.

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

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

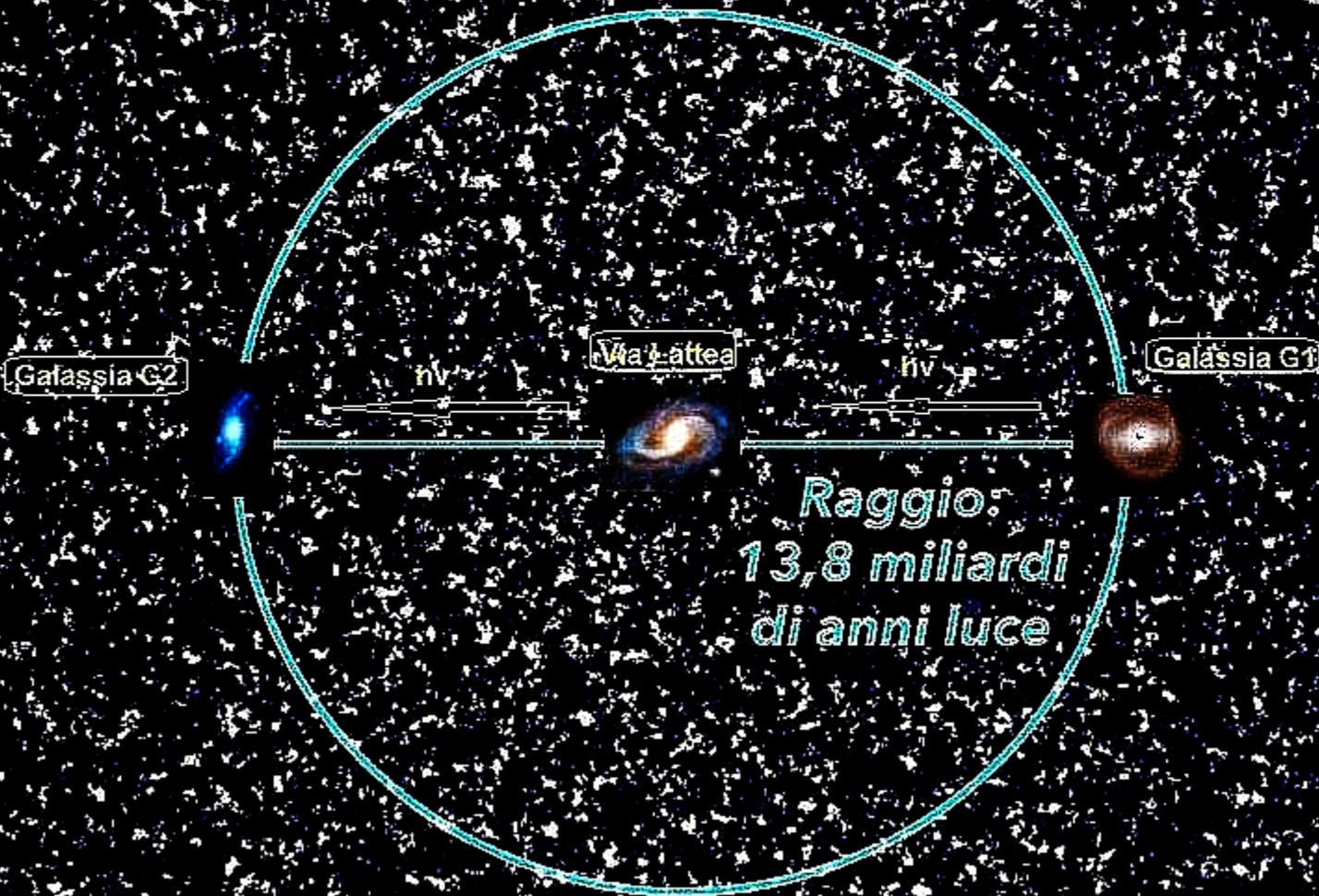
Sulla base di questa stima, il diametro della sfera dell'universo osservabile sarebbe pari a 93 miliardi di anni luce.

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?



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.

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

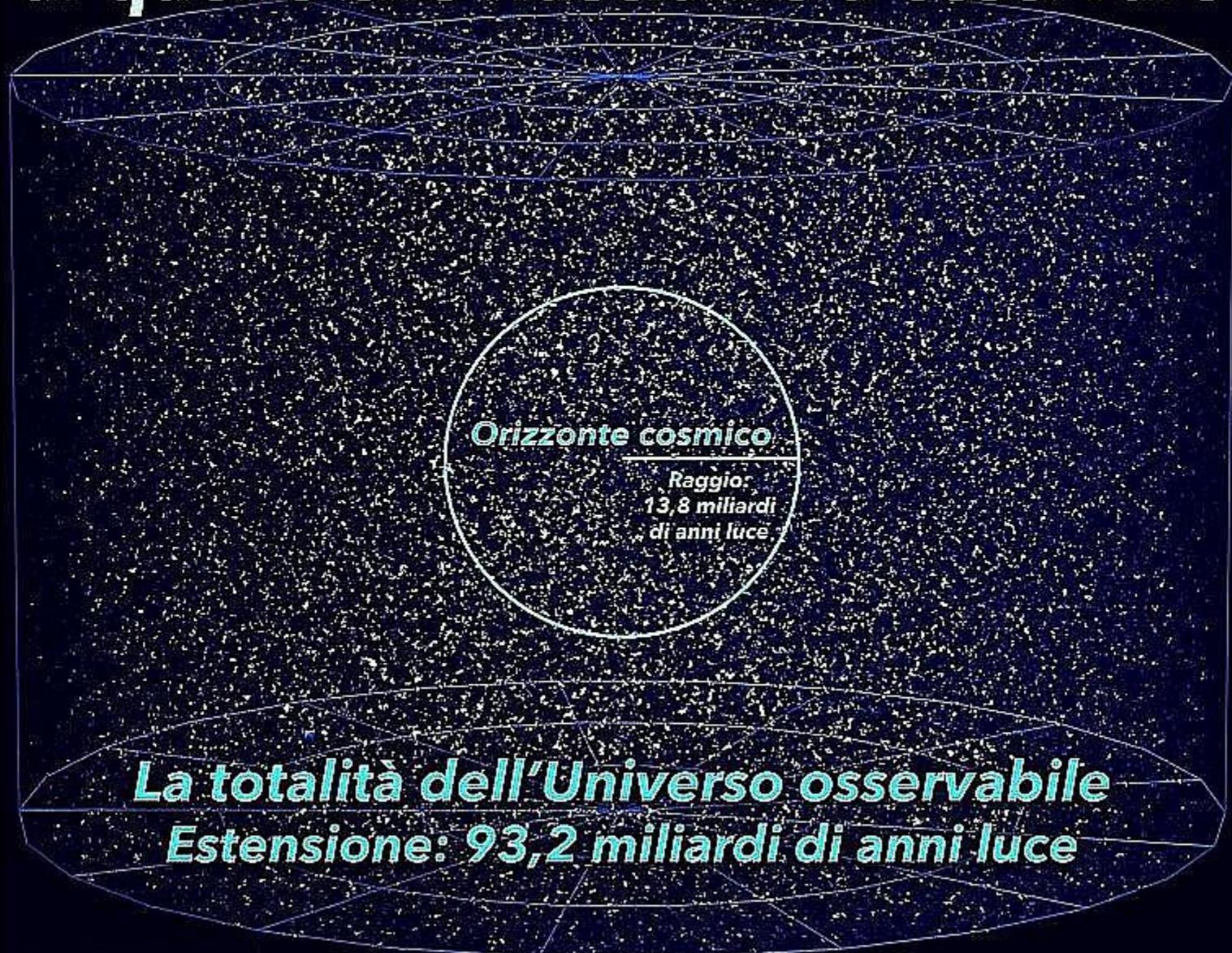
**...cioè si può osservare e misurare**

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 allontanino 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**

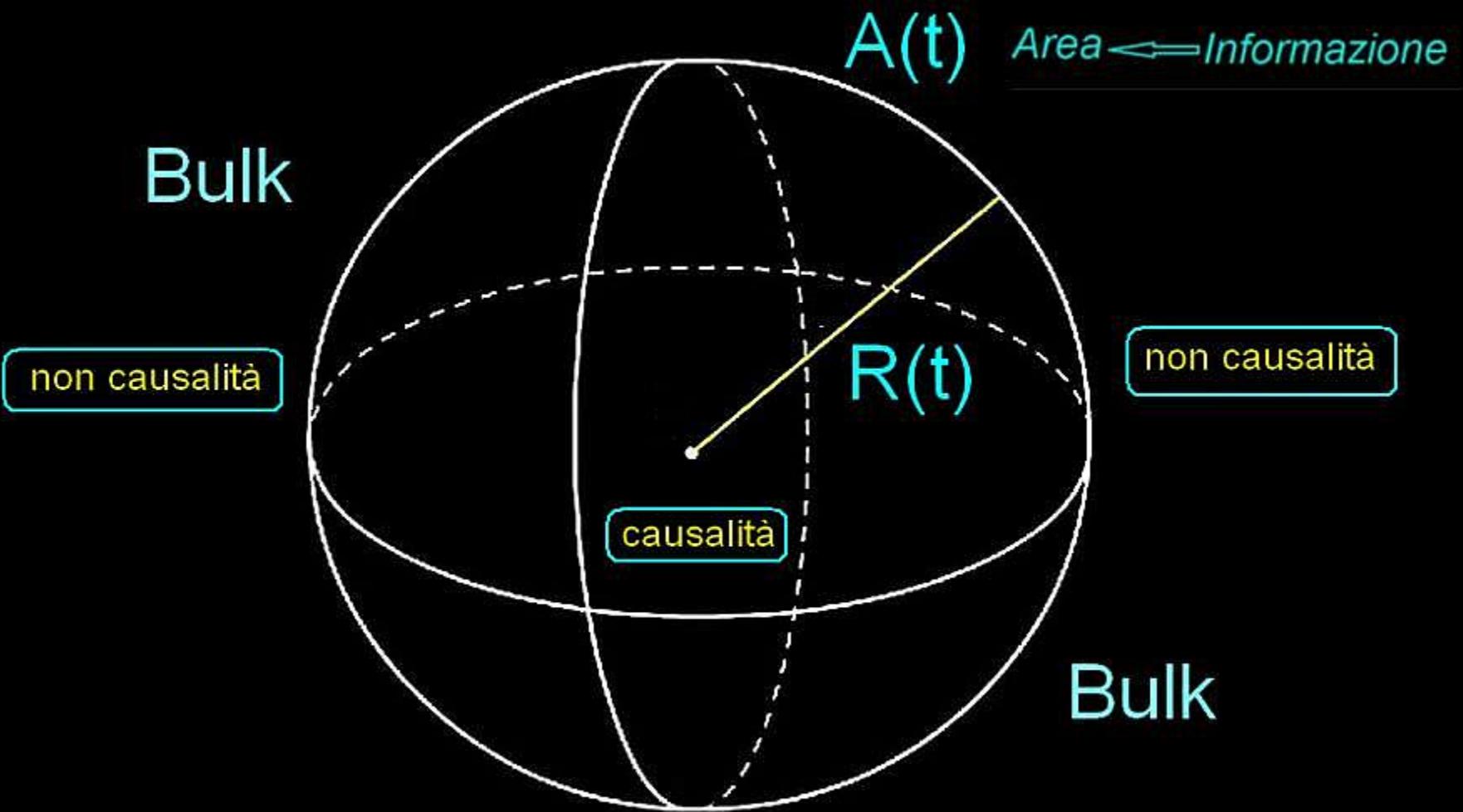


**Il fatto che la velocità della luce sia finita ( $c=300000$  km/sec) crea un orizzonte cosmologico al tempo  $t$  di età dell'Universo.**

**Il suo raggio è  $R = t$  anni luce**

**Si crea una superficie che racchiude un volume di spazio a cui abbiamo accesso in maniera causale.**

# Universo ( $k=1$ )



$$R(t) = 13,7 \text{ miliardi di AL}$$

## **PRINCIPALI ASSUNZIONI IN COSMOLOGIA:**

### **PRINCIPIO COSMOLOGICO**

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

### **PRINCIPIO COPERNICANO**

**-NON OCCUPIAMO UNA POSIZIONE PRIVILEGIATA NELL'UNIVERSO**

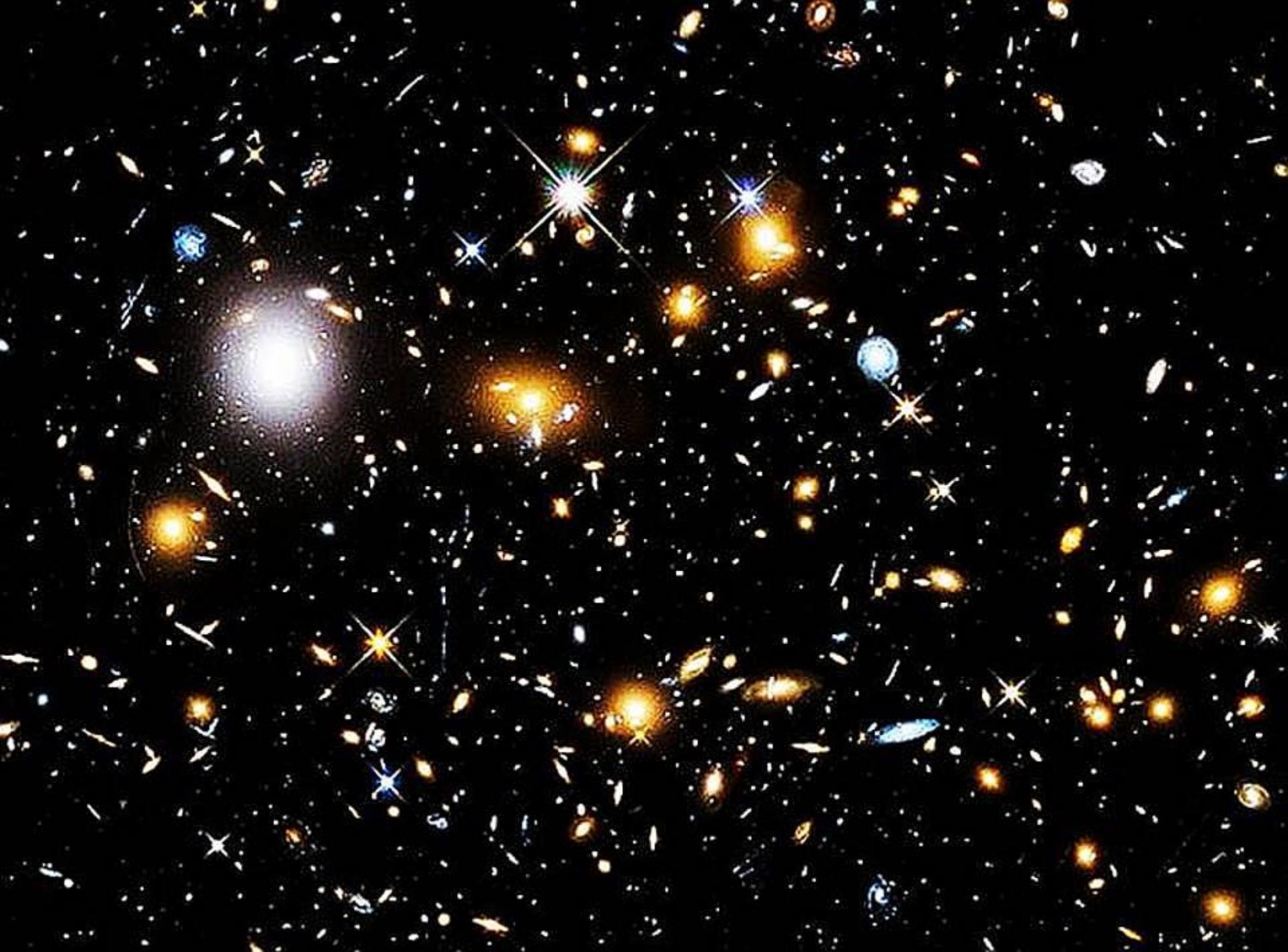
**-NON ESISTONO POSIZIONI PRIVILEGIATE**

## 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.

# La struttura dell'Universo

Sovrapposizione di 342 esposizioni da parte di HST tra il 18 e il 28 dicembre 1995. L'immagine mostra circa 1.500 galassie nelle profondità dell'Universo e ricopre una zona di cielo pari a quella che copre 1 eurocent a circa 20 m di distanza in direzione dell'Orsa Maggiore.



# 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



$$v = H_0 r$$



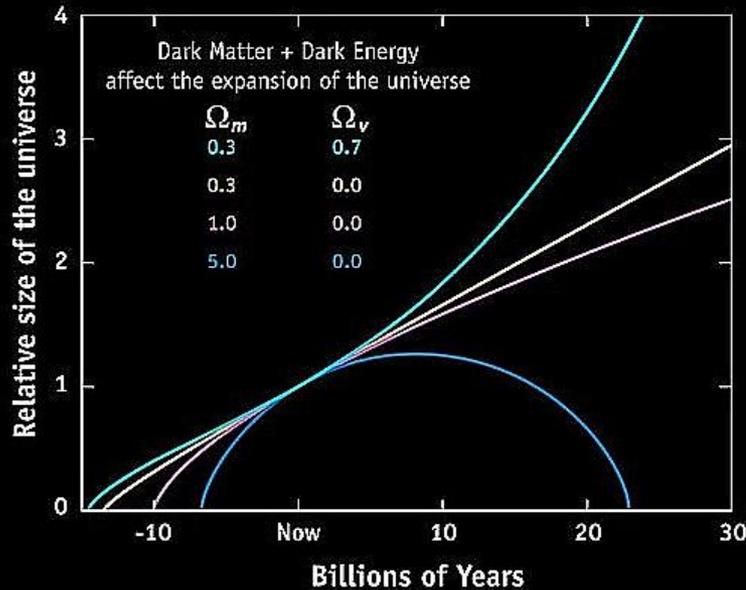
Edwin Hubble

$v$  è la velocità di recessione della galassia,  $r$  la sua distanza dall'osservatore, e  $H_0$  la costante di Hubble (oggi misurata accuratamente  $H_0 \cong 70$  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]

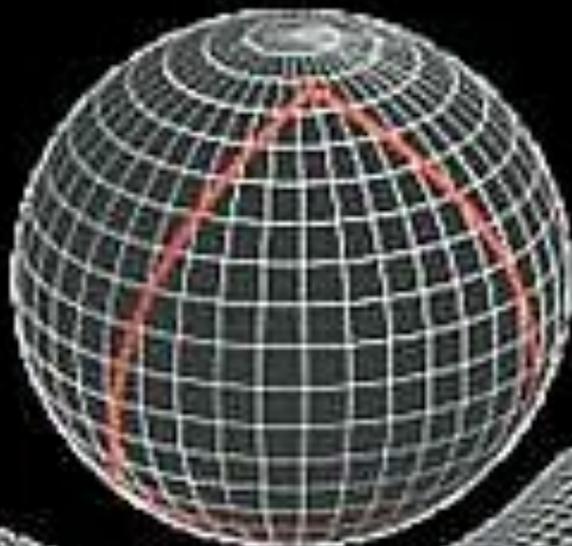
## EXPANSION OF THE UNIVERSE



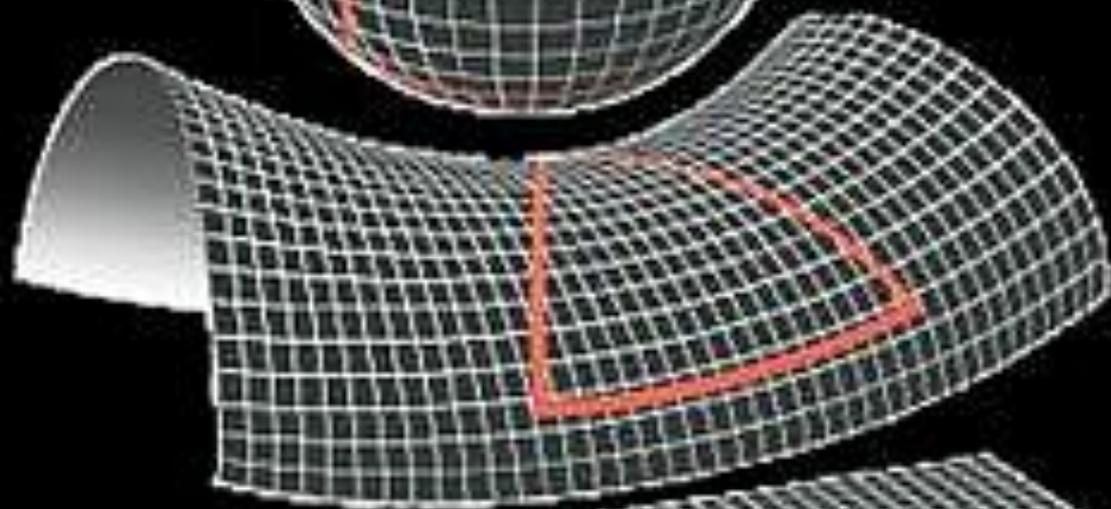
IN UN UNIVERSO COMPLETAMENTE  
DOMINATO DALLA MATERIA  
L'ESPANSIONE E'  
REGOLATA DAL RAPPORTO  
TRA LA DENSITA' CRITICA ( $\rho_c$ )  
E LA DENSITA' OSSERVATA ( $\rho$ )

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

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



$$k = +1$$



$$k = -1$$



$$k = 0$$

La forma dell'Universo?

# Equazioni di Friedmann

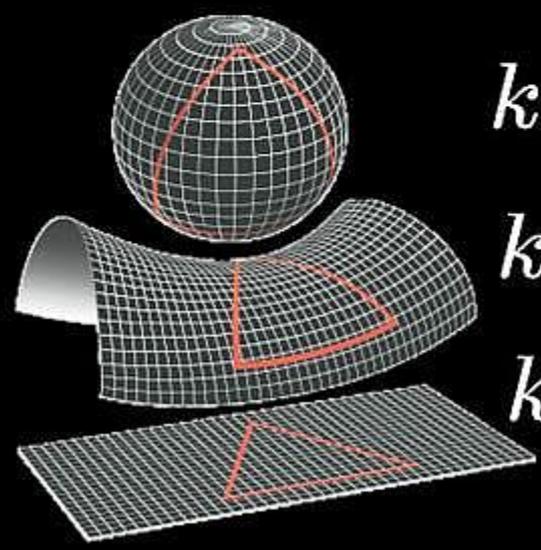
$$\dot{R} = \left[ R^2 \frac{8\pi G \rho + \Lambda c^2}{3} - k c^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

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



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

- $R$  = Raggio dell'Universo
- $\dot{R}$  = Velocità di espansione
- $\ddot{R}$  = 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



$k=+1$

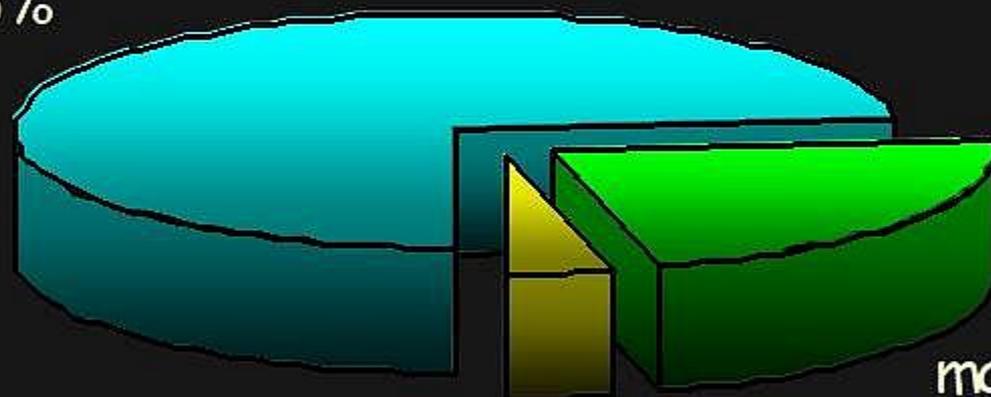
$k=-1$

$k=0$

# Di cosa è fatto l'UNIVERSO?

...per lo meno il nostro

energia  
oscura  
73%



materia  
ord.  
4%

materia  
oscura  
23%

# Energia del vuoto...



## L'Energia del Vuoto

La densità di energia  $p$  contenuta nello "spazio vuoto" dovuta alle fluttuazioni quantistiche è:

$$p = \frac{I_{\infty} \cdot \hbar \cdot c}{R^4} = 10^9 \text{ Joule/m}^3$$

$I_{\infty}$  = Quantità di informazione contenuta nell'Universo

$\hbar$  = Costante di Plank ridotta

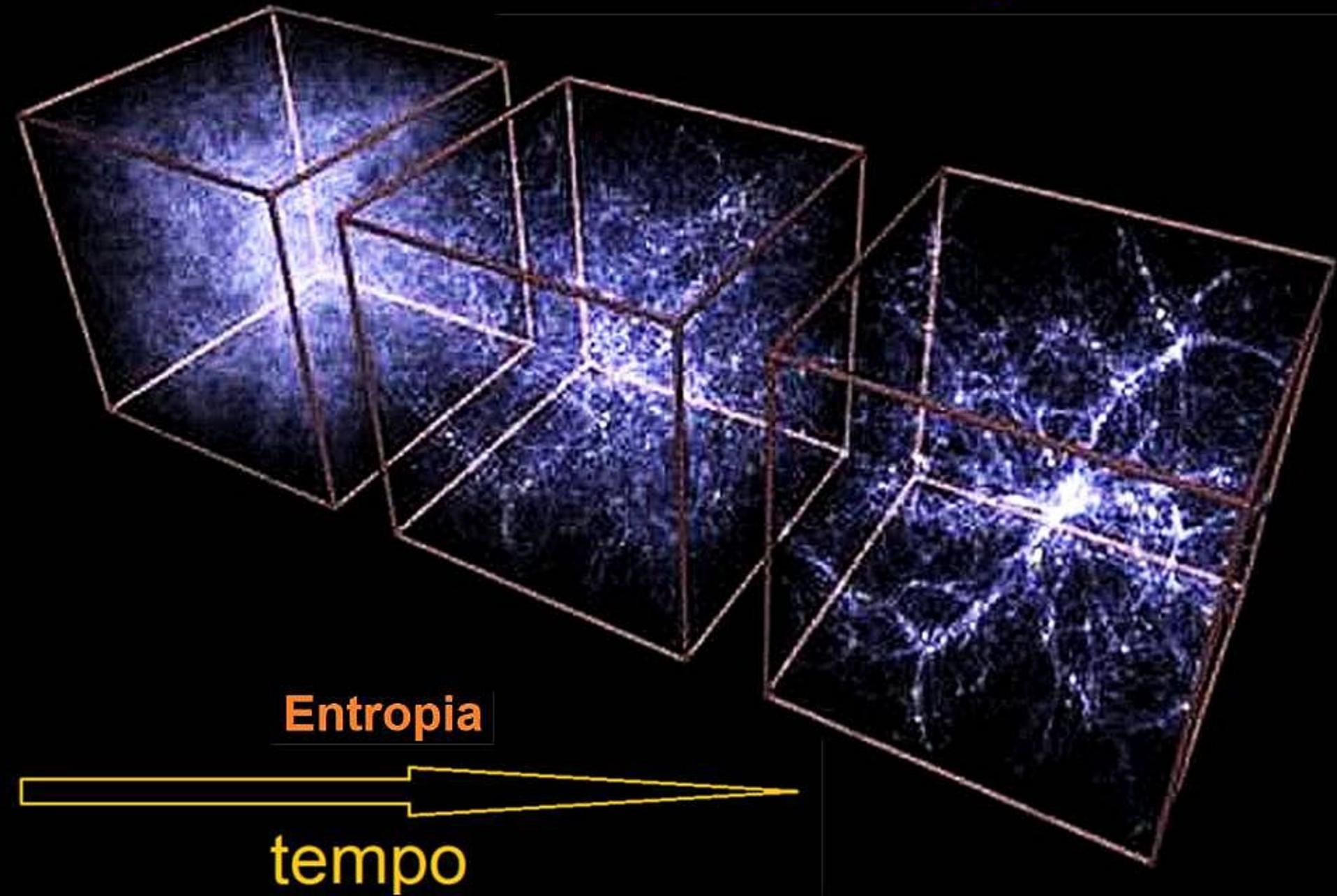
$c$  = Velocità della Luce ( $c=300.000 \text{ Km/sec}$ )

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

**Densità dell'Energia Oscura**

L'espansione dell'Universo  
è dovuta all'Energia Oscura  
(negativa, antigravitazionale)  
che genera lo Spazio-Tempo  
ad una velocità molto superiore  
a quella della luce.

# Effetti dell'Energia Oscura



# 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, multi-colored cosmic scene featuring various galaxies, including spiral and elliptical ones, and nebulae in shades of blue, purple, and red. The overall effect is that of a scale or tool used to measure the vastness of the universe.

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

Per misurare le distanze nell'Universo possiamo utilizzare solamente la luce (Energia) che è portata dai fotoni che possiamo raccogliere con i telescopi.

I fotoni che riceviamo possono essere molto antichi... fino a circa 380000 anni dopo il Big Bang

...ma non prima

A differenza delle onde sonore, le onde elettromagnetiche, quindi la luce, non ha bisogno di un mezzo meccanico come l'aria per propagarsi. Inoltre, il principio di relatività di Einstein ci assicura che la velocità della luce è la stessa in ogni sistema di riferimento.

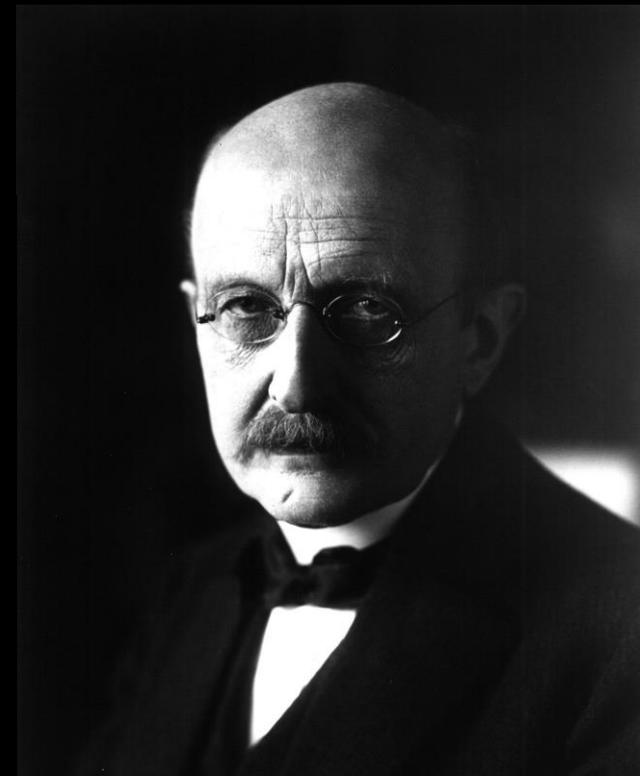
Questo ci consente di valutare la velocità di una sorgente luminosa misurando lo spostamento in frequenza  $f_1 - f_0$  della radiazione luminosa.

Questo fatto ha enormi conseguenze in astronomia, perché permette di determinare la velocità di allontanamento o di avvicinamento rispetto alla Terra di stelle, galassie e oggetti celesti lontani

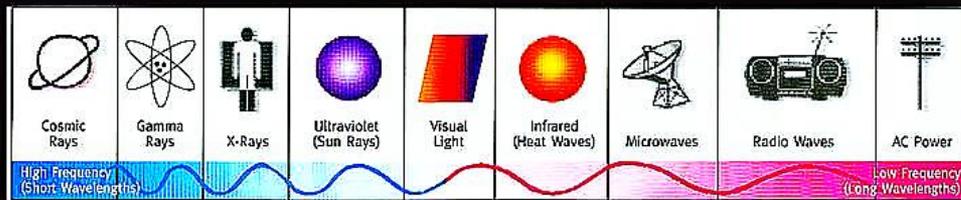
# Relazione fra energia e frequenza

$$E = h\nu$$

$h =$  costante di Plank  $6.62 \times 10^{-34} \text{ J s}$



Max Planck (1858 - 1947)



E

# Che cos'è la costante di Planck?

La costante di Planck fu introdotta nel 1900 dal fisico omonimo, e può essere definita come la costante di proporzionalità che lega l'energia di una radiazione e la sua frequenza secondo la legge

$$E = h\nu$$

Ne consegue che ad ogni frequenza è associata una ben determinata energia.



# La legge di Hubble: VELOCITÀ = $H_0$ X DISTANZA

$$v = HR$$

Where

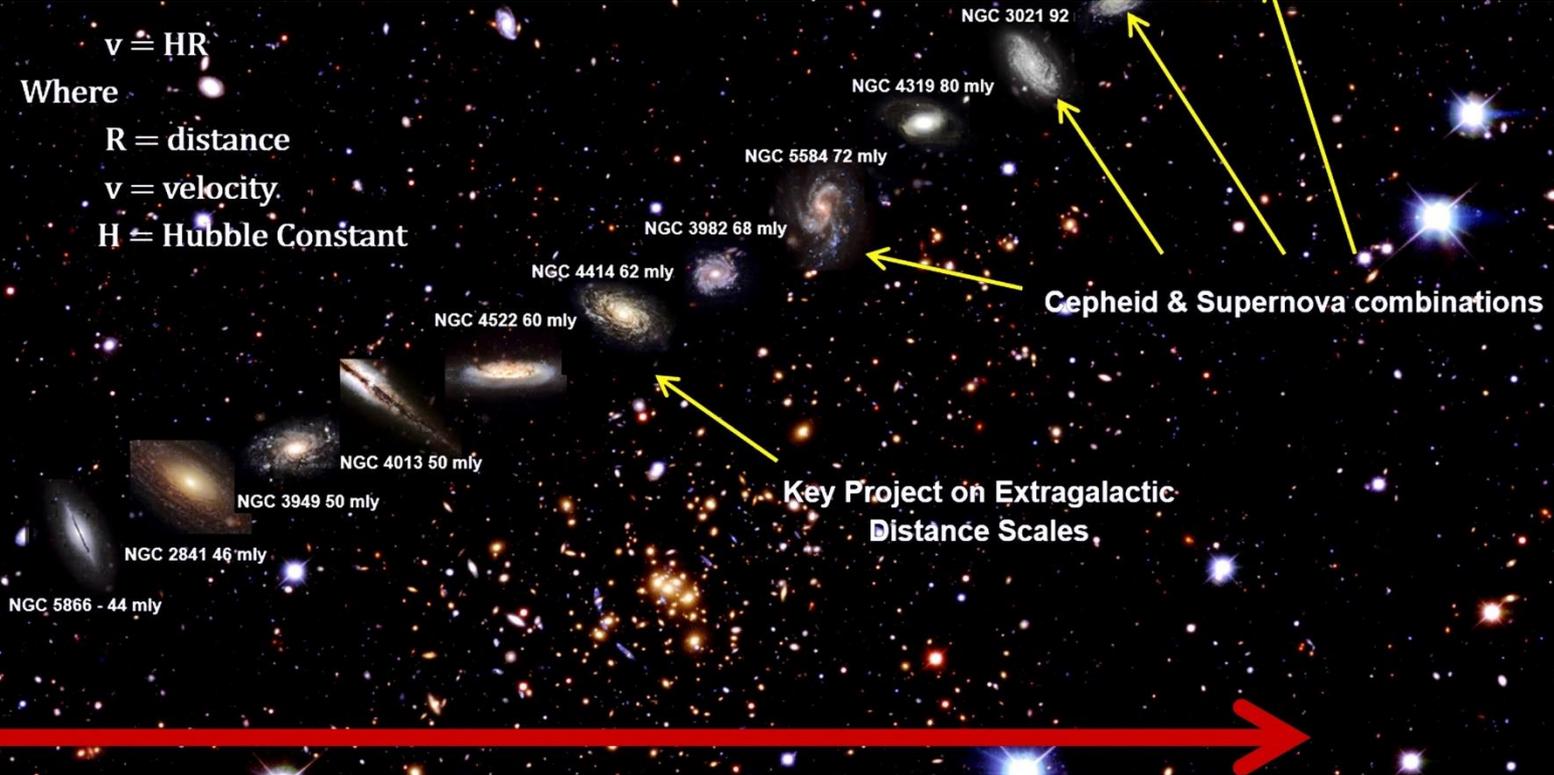
R = distance

v = velocity.

H = Hubble Constant

Distance

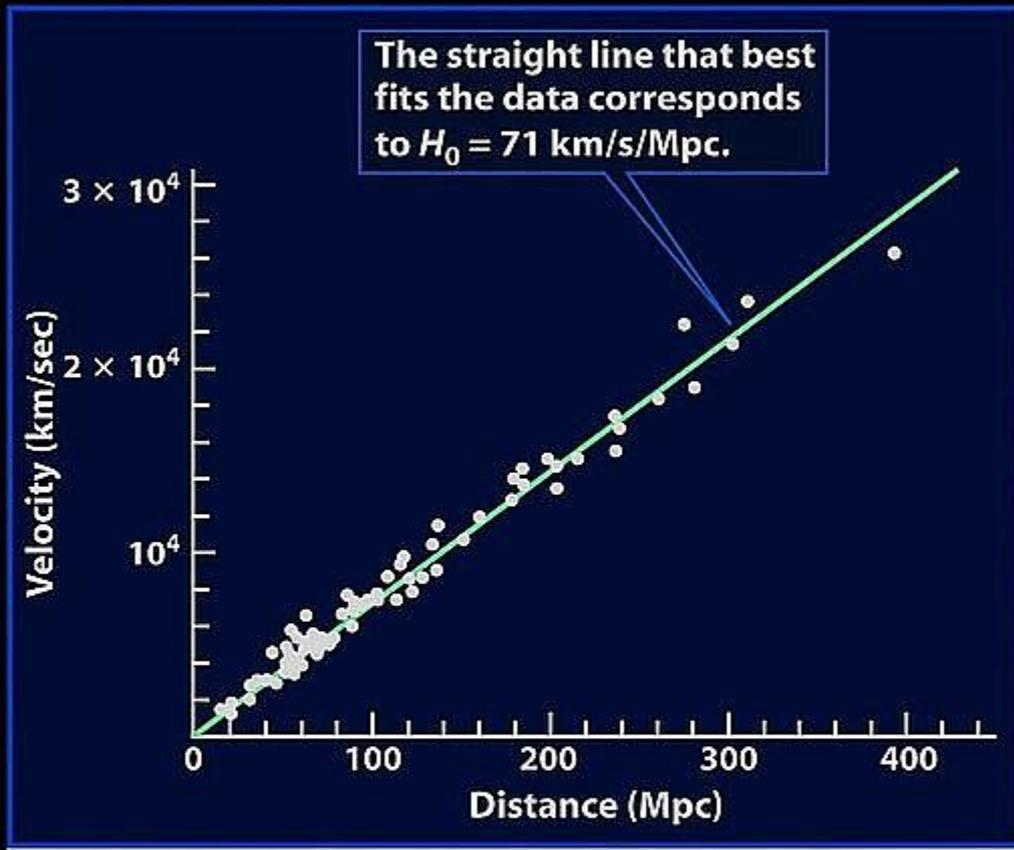
(determined by Cepheids)



Cepheid & Supernova combinations

Key Project on Extragalactic Distance Scales

Velocity (determined by Red Shift)



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

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

**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

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

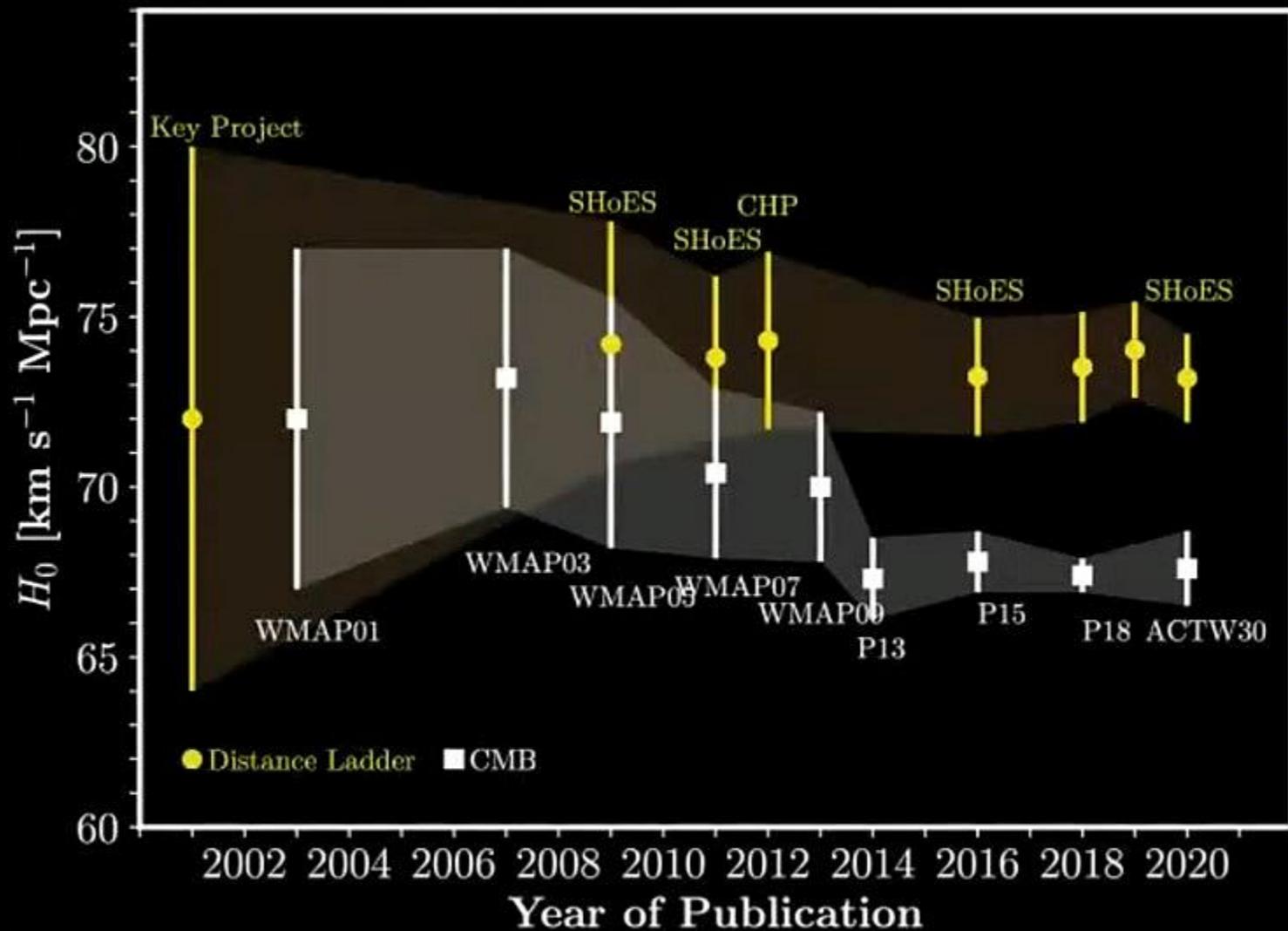
$$\rho_o = 1 \times 10^{26} \text{ Kg/m}^3$$

# Massa complessiva dell'Universo

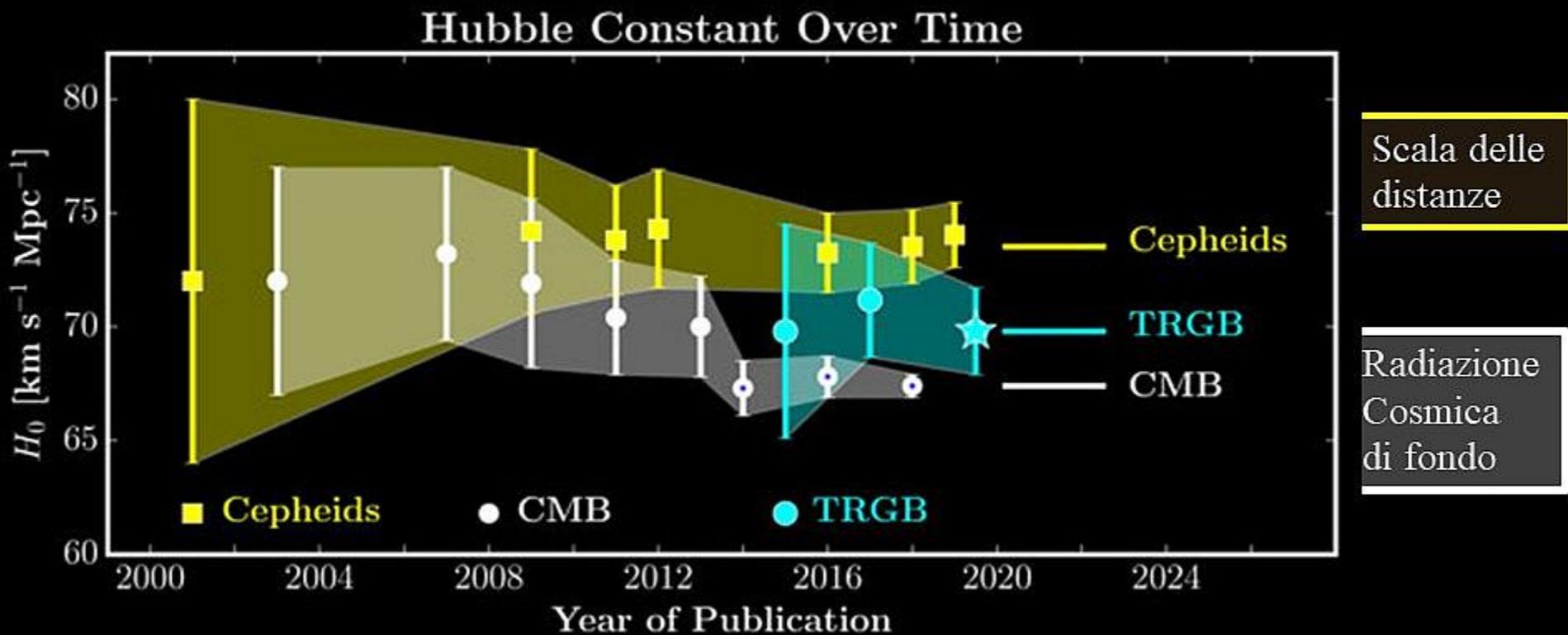
$$M(\text{univ}) = \frac{1}{2} R^3 \frac{H_0^2}{G}$$

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

# La Costante di Hubble

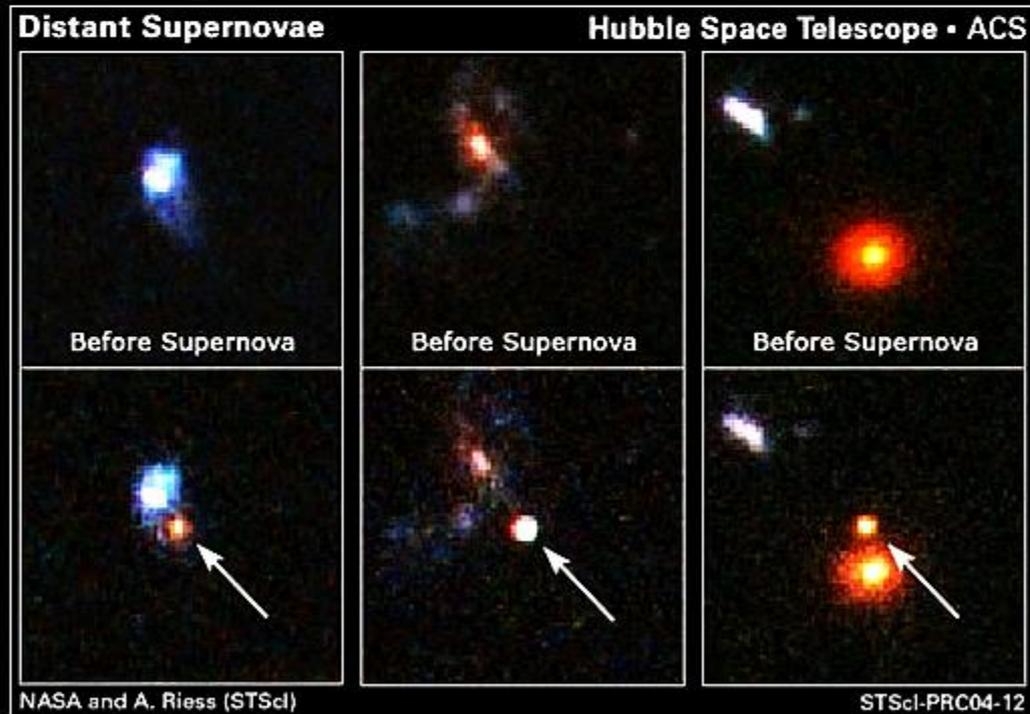
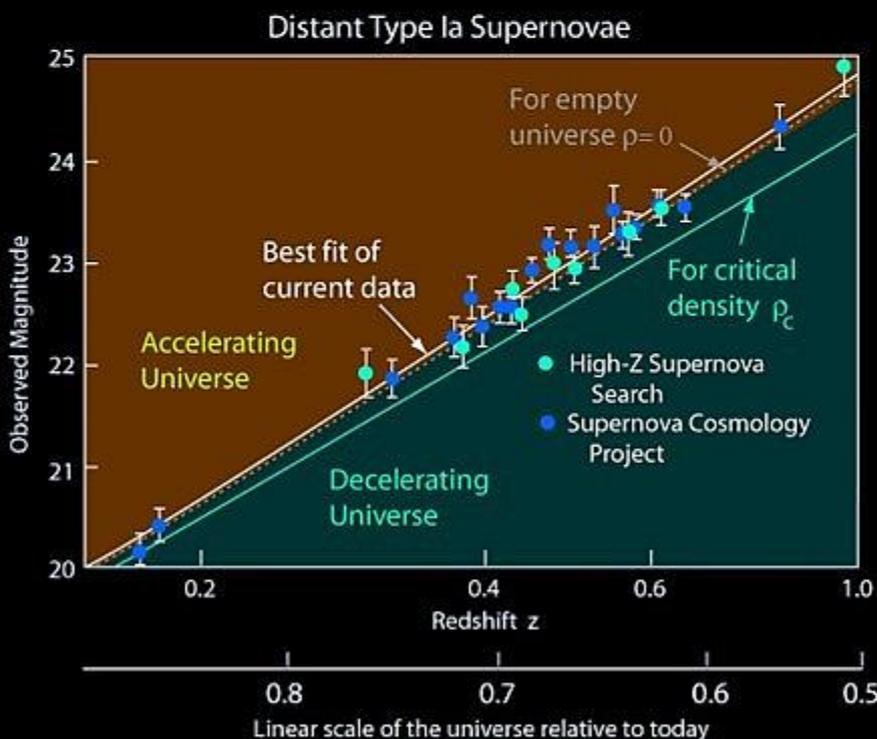


# TRGB : le giganti rosse più luminose



# LA SCOPERTA DELL' "ENERGIA OSCURA"

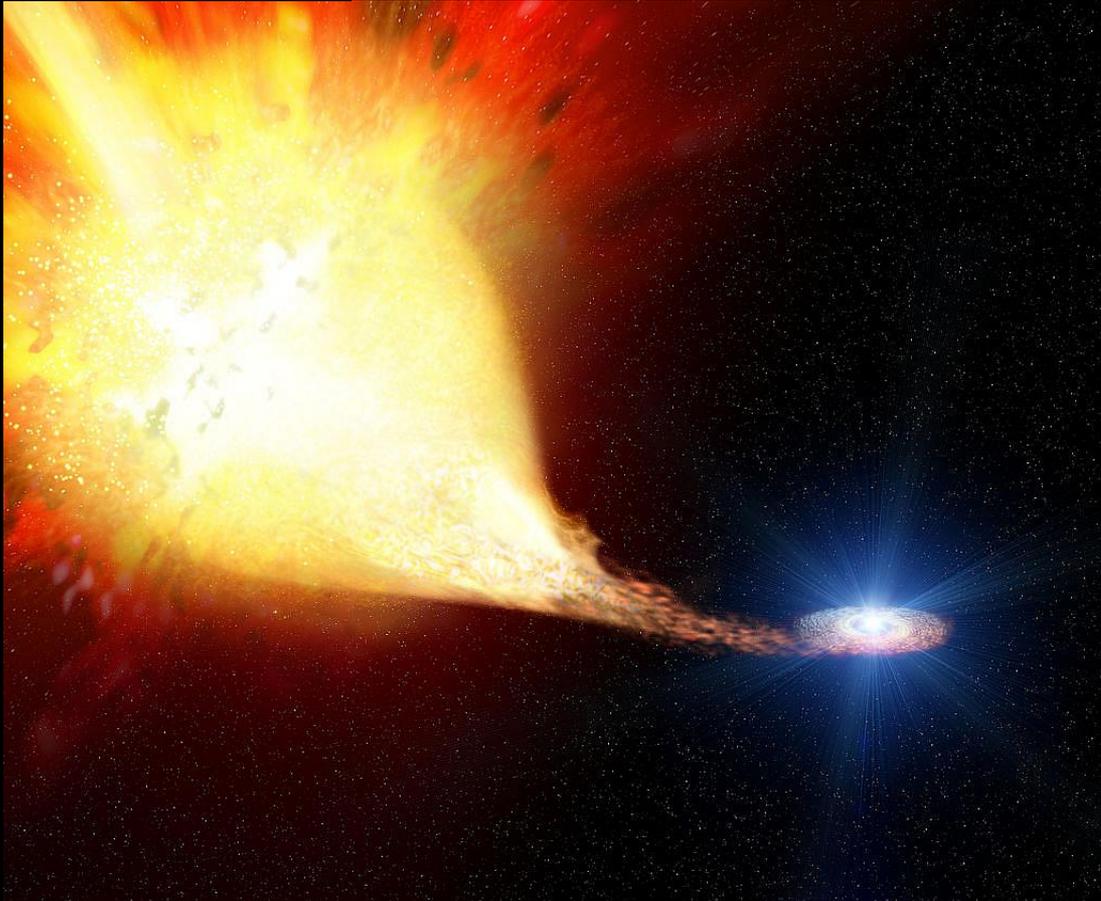
## DERIVA DALLO STUDIO DEL REDSHIFT DELLE SUPERNOVAE Ia MOLTO DISTANTI



# 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.

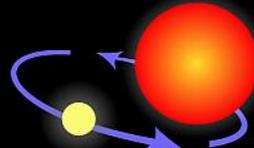
# Supernova di tipo Ia



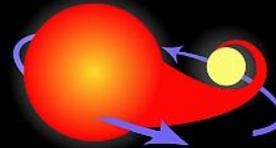
## Come si forma una supernova di tipo Ia



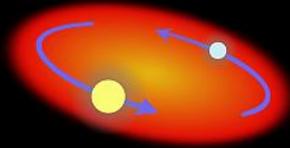
Due stelle normali si trovano in un sistema binario.



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.



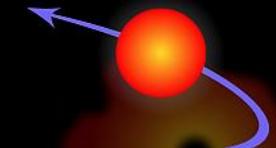
Il nucleo collassa in una nana bianca.



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

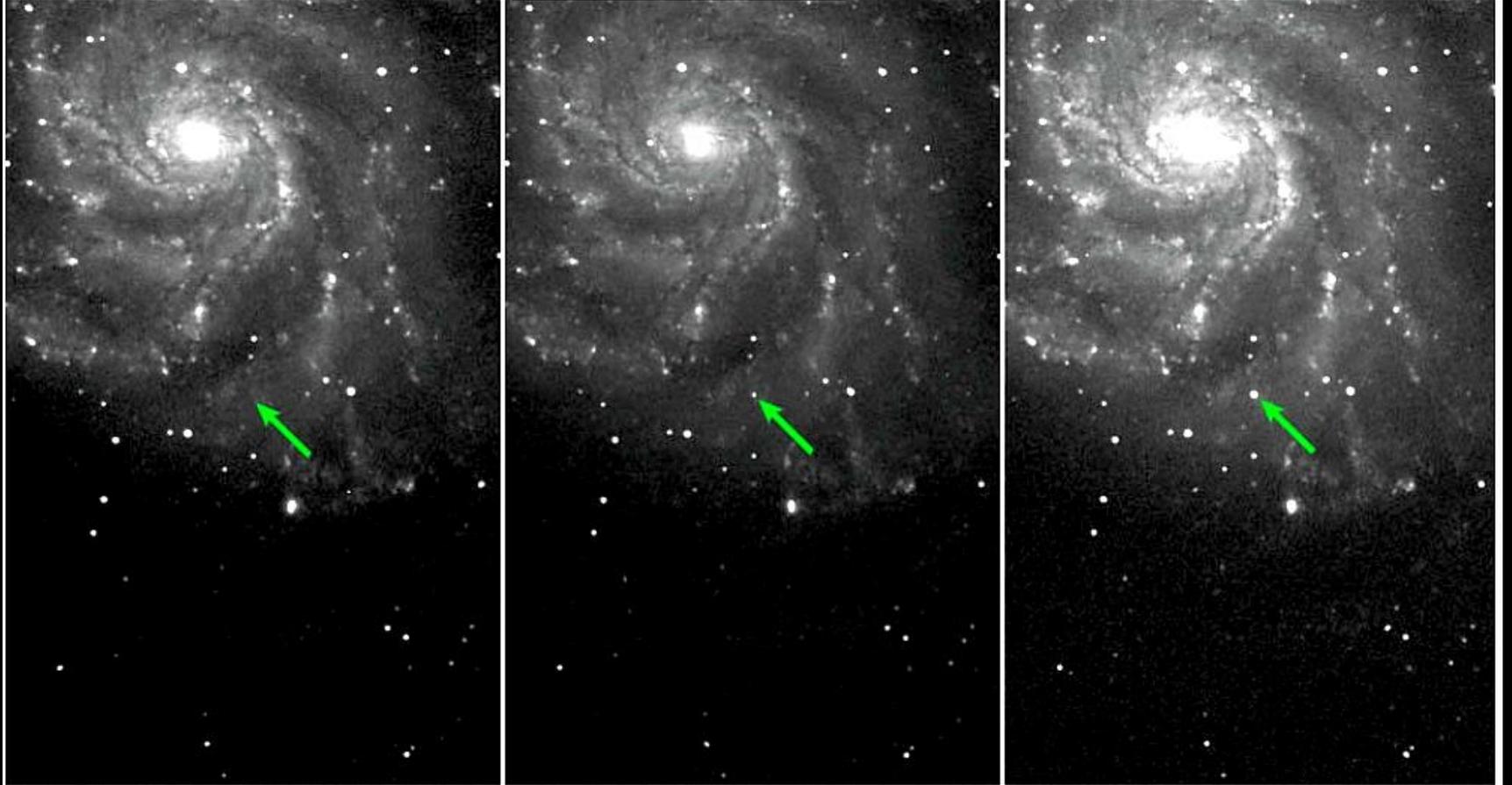


La massa della nana bianca aumenta sino a raggiungere il valore critico, ed esplose...



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

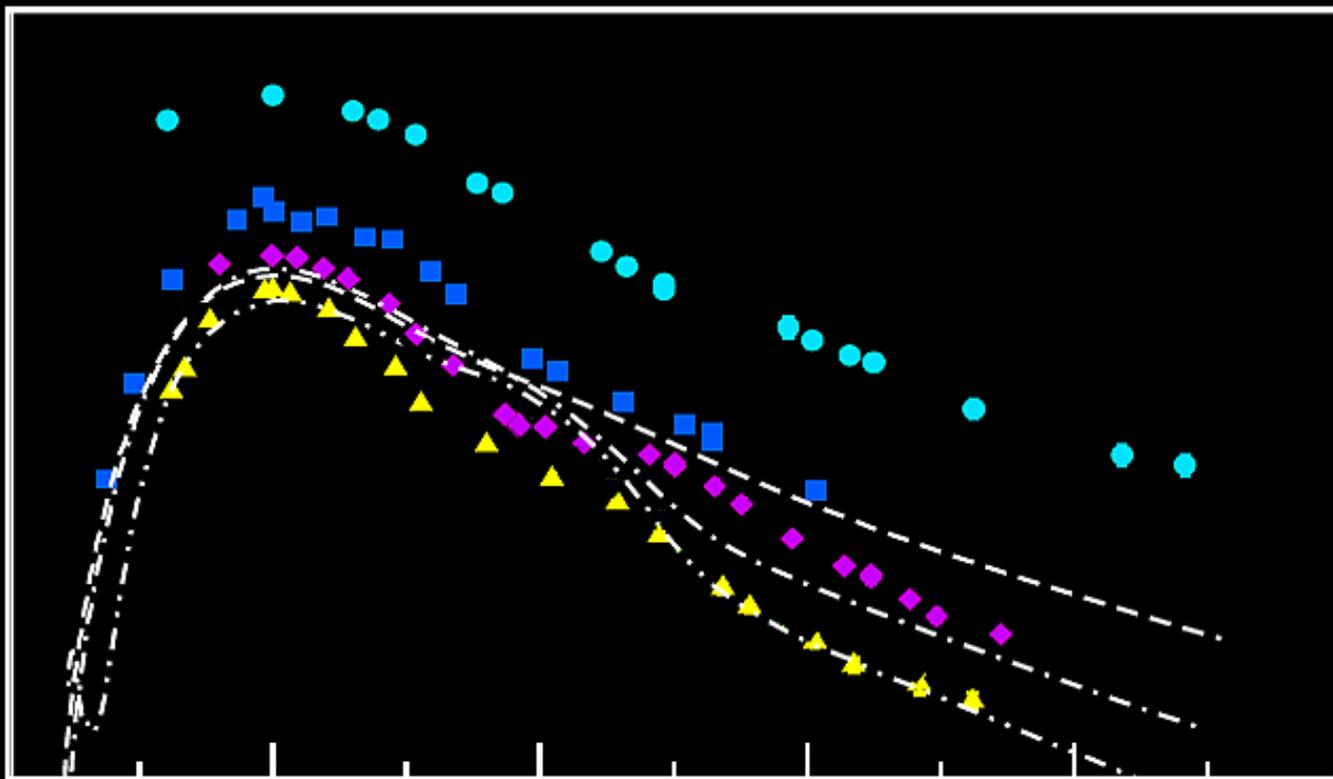
# SN2011e





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*

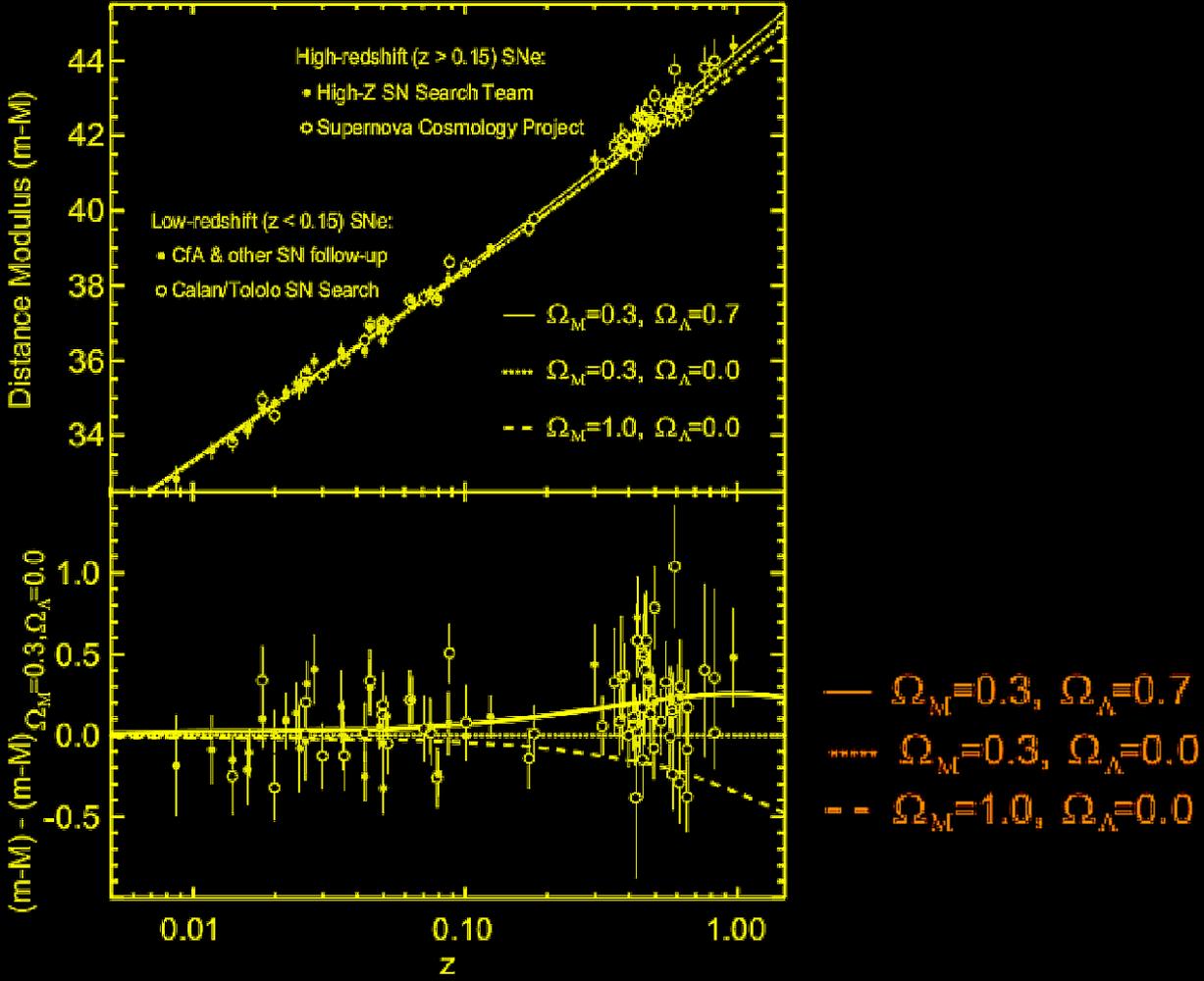
**M** = *magnitudine assoluta*

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



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 si 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...

Questi esperimenti **misurano**  $\Lambda$  , ci dicono quanto vale ! ...  
Ora la misura ci dice che  $\Lambda$  è piccolissima se confrontata  
col **valore pazzesco dell'energia del vuoto** che, secondo  
Zeldovich e non solo, dovrebbe appunto dare contributo a  $\Lambda$  .

Se invece confrontiamo il **valore misurato di Energia Oscura**  
col budget di Materia ed Energia dell'Universo, scopriamo che  
**L'Energia Oscura costituisce una frazione molto grande**  
**dell'intero budget energetico dell'Universo :**

Ragioniamo in grande...

# Multiverso





Tutto chiaro  
fin qui?

*Il bello deve  
ancora venire...*

**...nelle prossime lezioni!**