

# Di che cosa è fatto l'Universo?

Graciela Gelmini, University of California, Los Angeles (UCLA)

## Contenuto

- L'Universo in espansione
- “Pesiamo” le galassie
- La sorpresa più recente (alle scale più grandi)
- Il Modello Standard della Cosmologia

# Visione medievale dell'Universo



Influenza di Aristotele. Dopo, dal 1500 al 1700: Nicola Copernico, Galileo Galilei, Isaac Newton... misero il Sole al centro del sistema solare...

# L'Universo in espansione

**Un poco di storia:** Cominciamo con Albert Einstein nel 1905



## Un po' di storia

- 1905- Einstein - Relatività Speciale:  $E = mc^2$  e  $v \leq c$   
( $c$ = velocità della luce- nessun segnale può essere più veloce della luce!)
- 1915- Einstein- Relatività Generale (la teoria della gravità)
- 1917- Einstein credeva che l'Universo fosse statico! Introdusse la **Costante Cosmologica  $\Lambda$**  per equilibrare l'attrazione gravitazionale della materia e dell'energia lui necessitava una interazione gravitazionale **REPULSIVA** precisamente nella giusta quantità)
- 1920- Le “nebulose a spirale” sono parte della nostra galassia?

(immagine di una “nebulosa a spirale” e stelle)



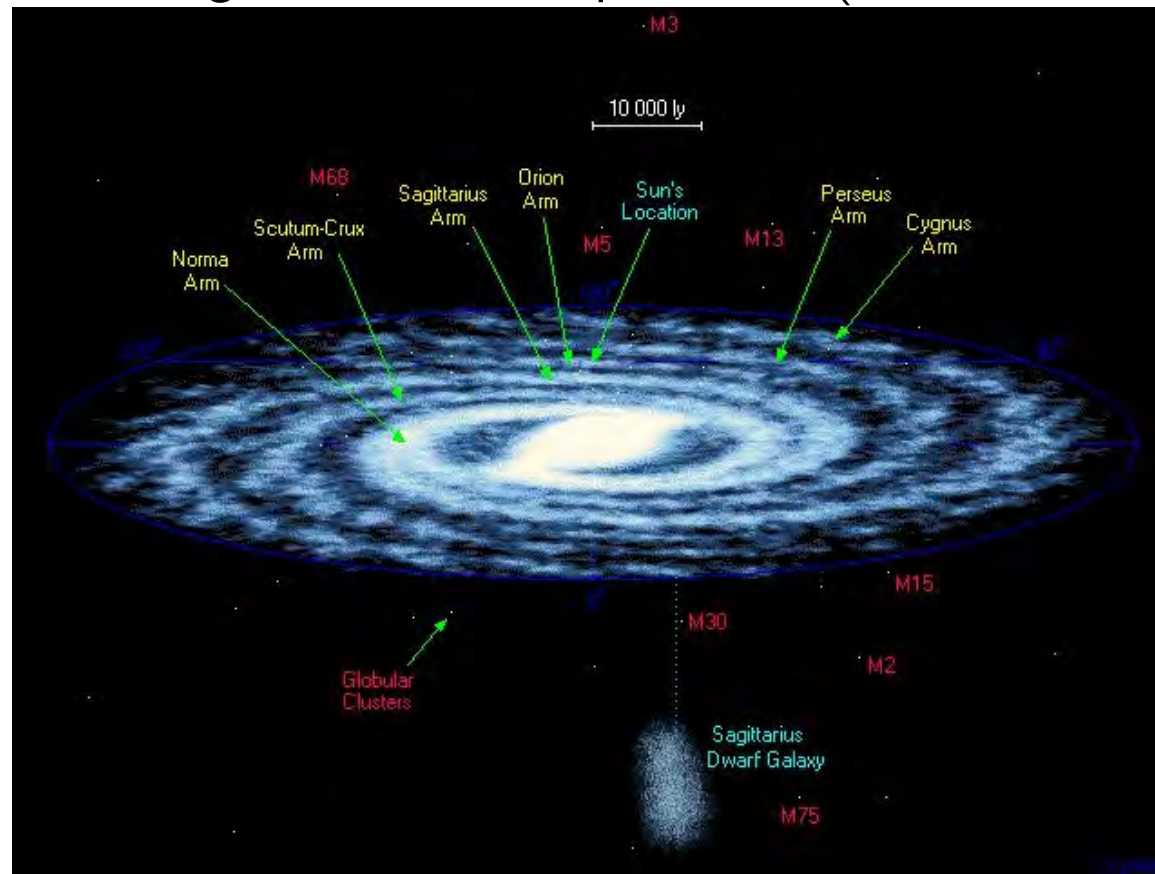
- 1924- Edwin Hubble- misurò la distanza di una "nebulosa a spirale" la **Galassia Andromeda** (usò stelle variabili la cui luminosità intrinseca è collegata al periodo di variazione)



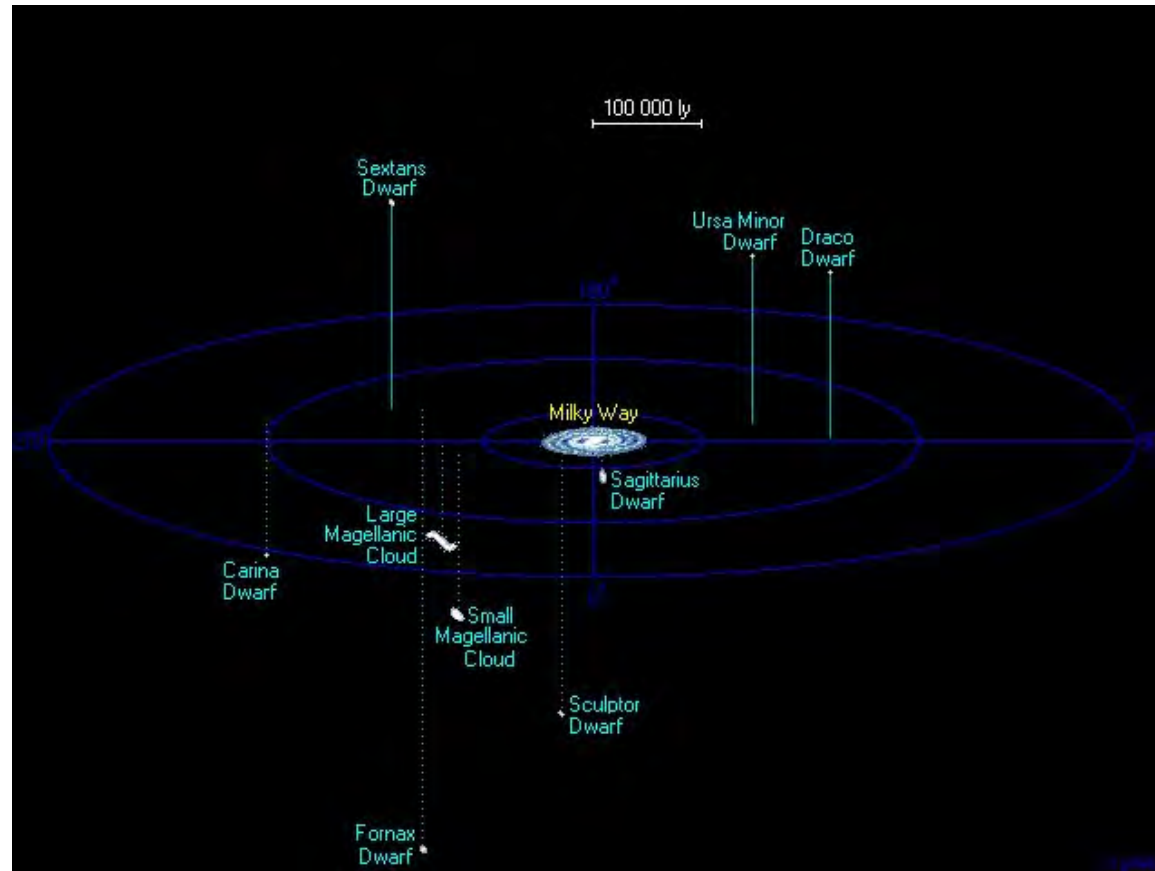
La galassia Andromeda



- Usando diversi metodi per misurare le distanze, oggi sappiamo che le galassie sono i mattoni dell'Universo. La [Via Lattea e la Galassia Nana Sagittarius](#), la sua galassia satellite più vicina (in via di distruzione)

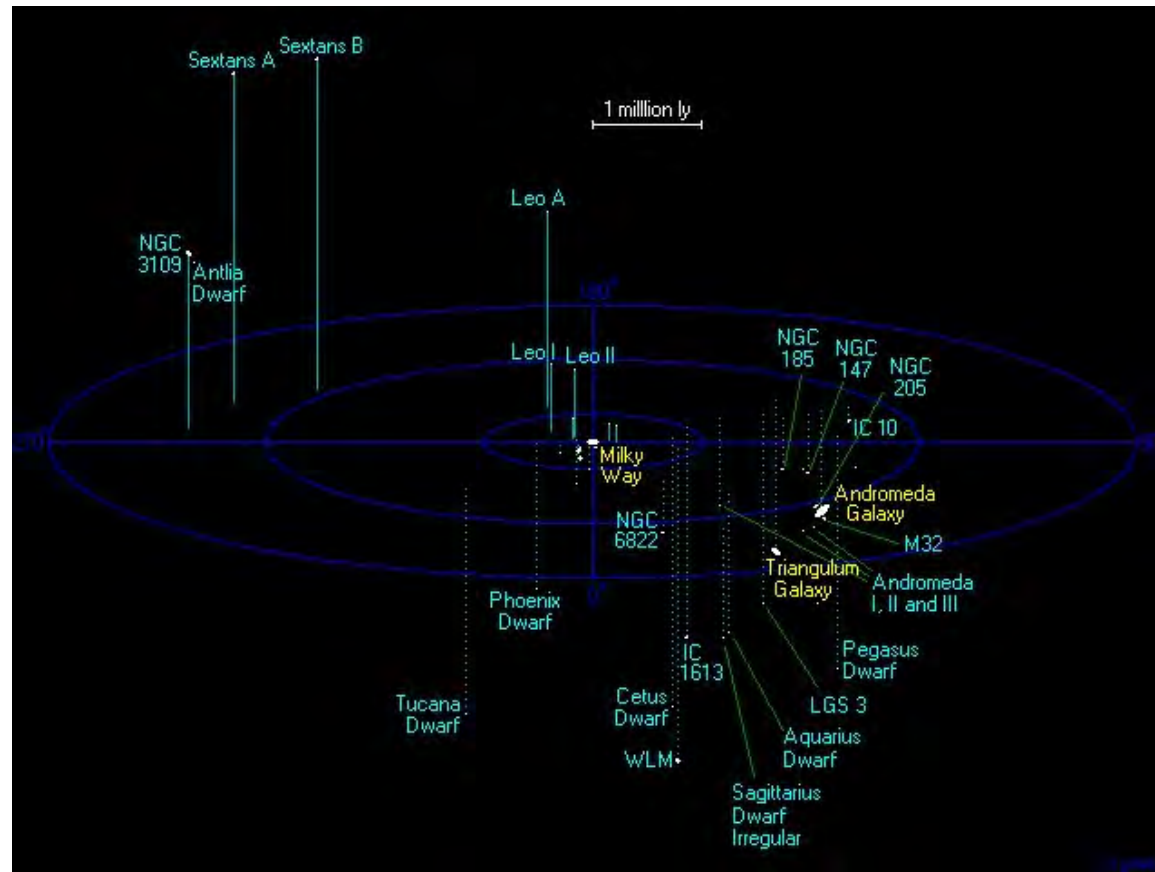


- La Via Lattea ha molte piccole galassie satellite (centinaia di satelliti più piccole sono state scoperte di recente!)

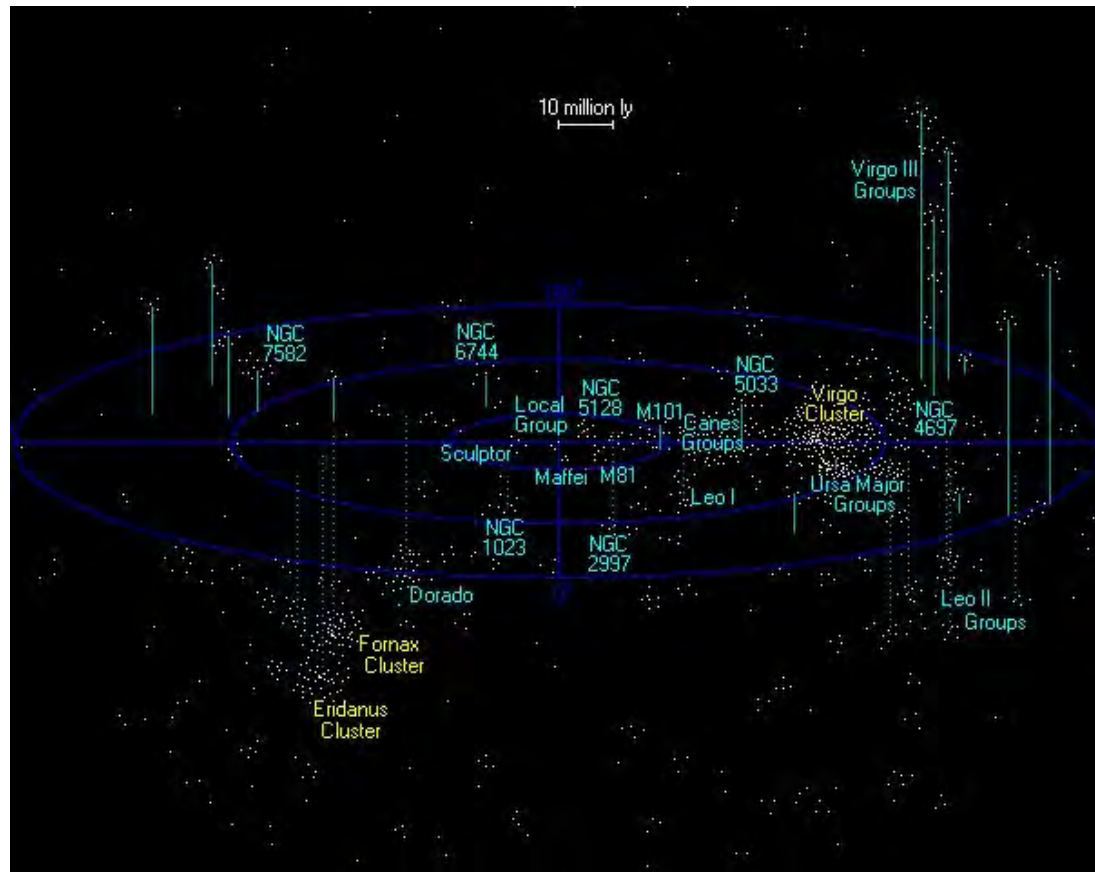




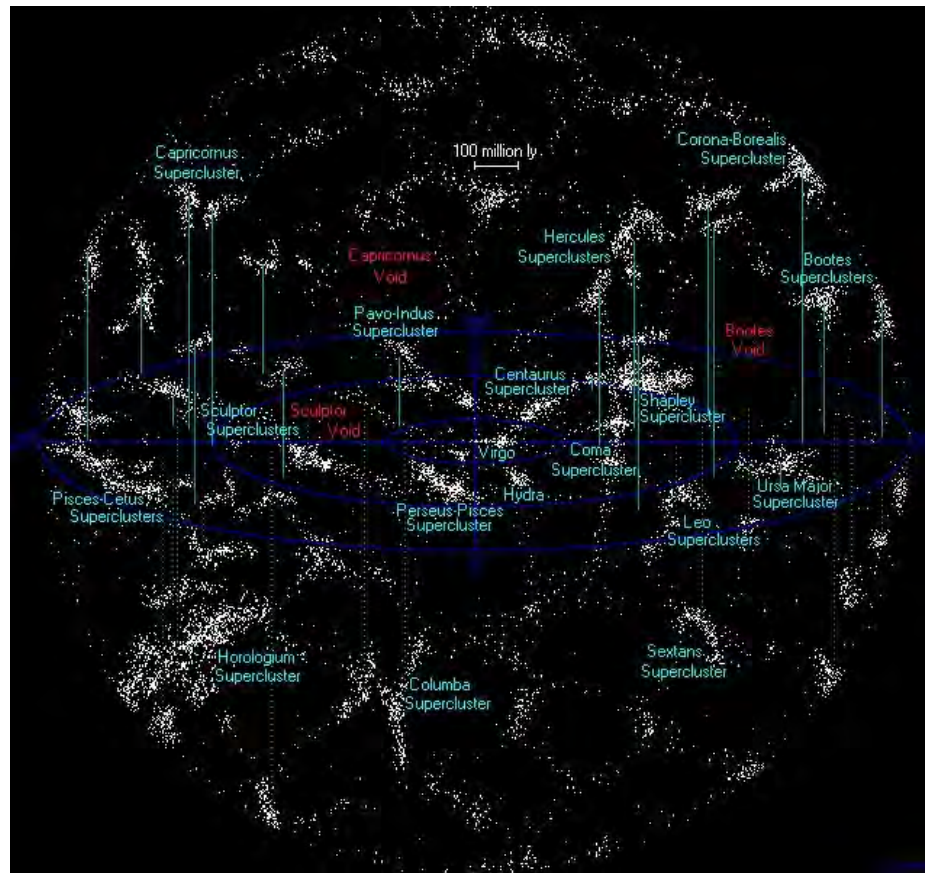
- Le galassie formano gruppi, ammassi, superammassi... Il nostro **Gruppo Locale di galassie**



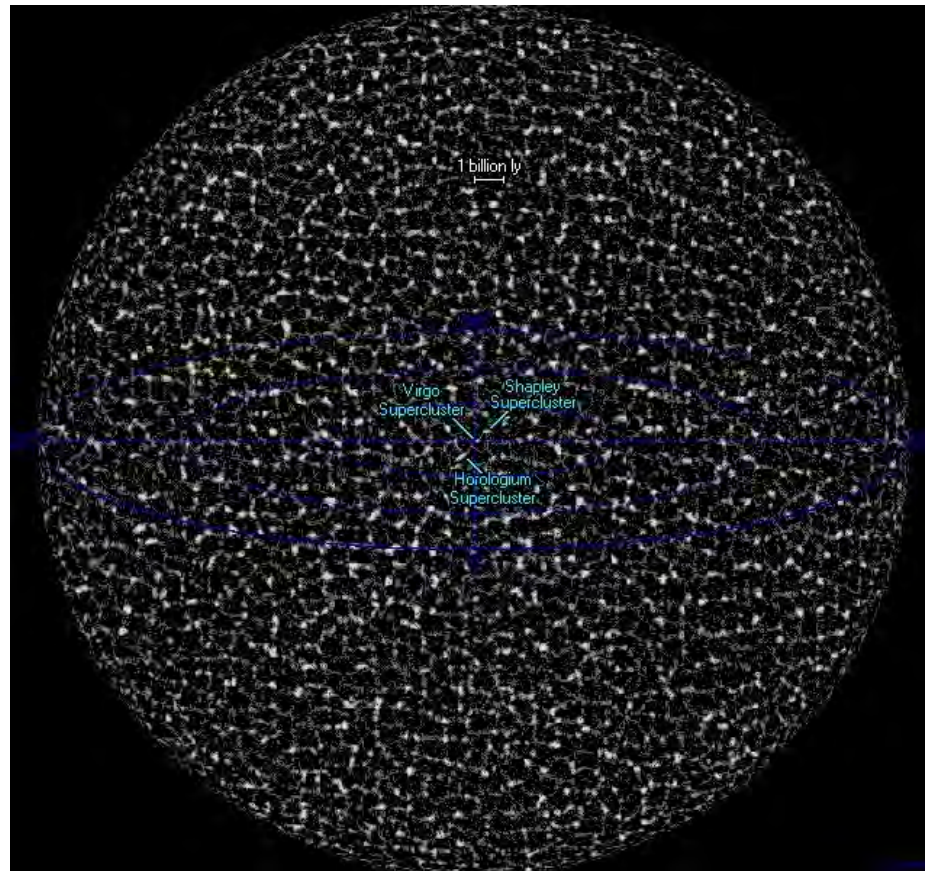
- Le galassie formano gruppi, ammassi, superammassi... Il nostro Gruppo Locale è nella periferia dell'**Ammasso della Vergine (Virgo Cluster)**



- Le galassie sono i mattoni dell'Universo: gli ammassi formano superammassi, "filamenti, muri e vuoti"



- A distanze maggiori di 300 milioni di anni luce, l'Universo è **omogeneo e isotropo...** (rappresentazione artistica)



## Riprendiamo la nostra storia

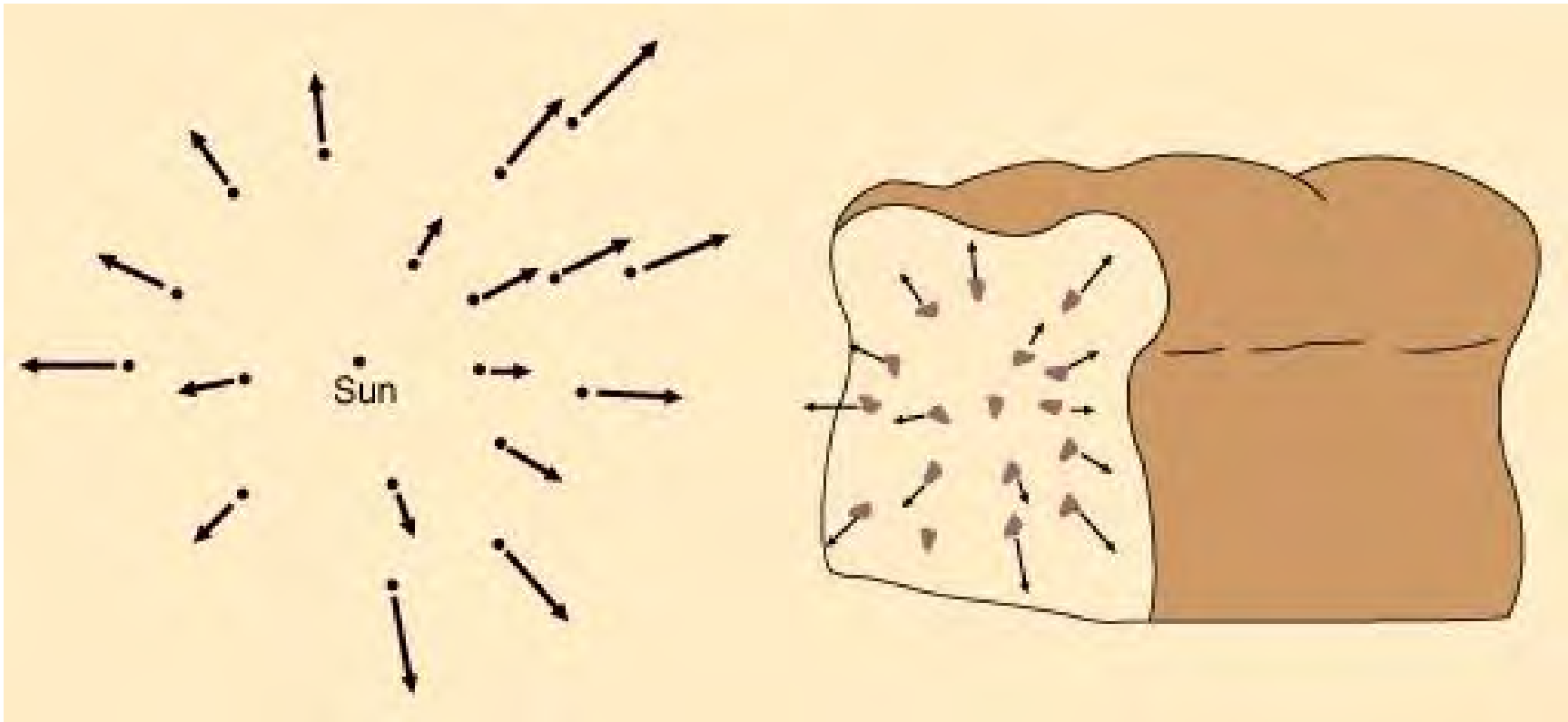
- 1929- Hubble- le galassie distanti si allontanano da noi con  $v = Hd$  “Hubble Law”  
+ Principio Cosmologico che dice che “la nostra posizione non è speciale”



**= L'Universo si espande**

- L'Universo non è statico: Einstein disse che introdurre la costante cosmologica  $\Lambda$  fu “il più grande errore della sua vita”!
- L'espansione non ha un centro: le distanze tra tutti i punti crescono allo stesso modo

# L'espansione dell'Universo

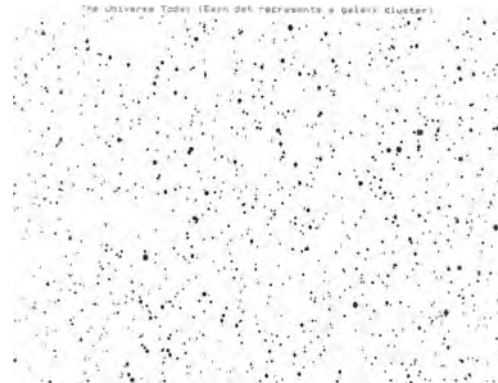




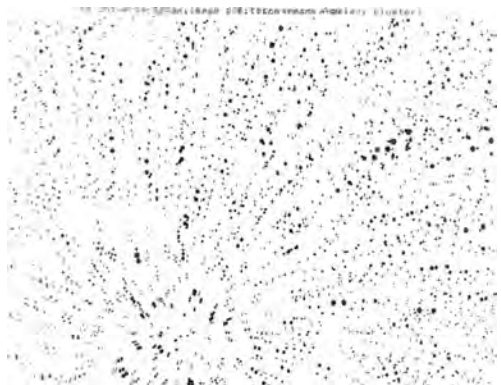
# L'espansione dell'Universo



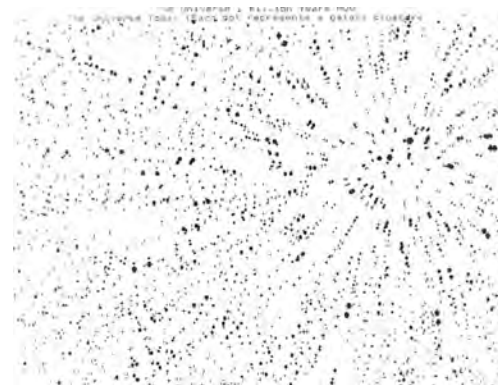
Passato



Presente



Il nostro posto d'osservazione,



sembra il centro dell'espansione

## Ancora un po' di storia

- 1929- Hubble- le galassie distanti si allontanano da noi  
+ Principio Cosmologico “non siamo speciali” = **l'universo si espande**

- **“Big-Bang”?** (grande-” bang”)

(George Gamow, 1946)

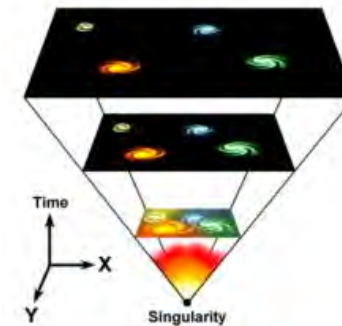
Inizio caldo, raffreddamento via espansione.

Predisse la nucleosintesi dell' elio e una

**Radiazione Cosmica di Fondo (CMB)**

**luce fossile prodotta nel Bang**

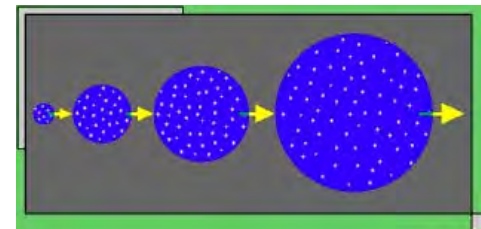
(Prima, 1927, 1931 padre George Lemaître “atomo primordiale”)



- o **“Universo Stazionario”?**

(Fred Hoyle, 1948)

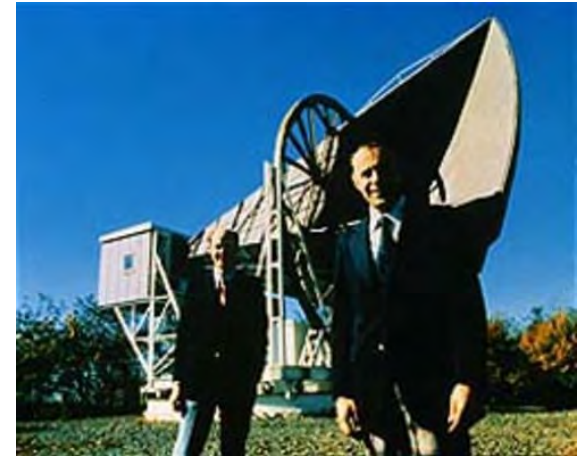
senza radiazione di fondo?





## Un poco di storia

- 1965- Penzias e Wilson osservano la CMB:  
**il Big-Bang è confermato!**  
(Premio Nobel 1978)

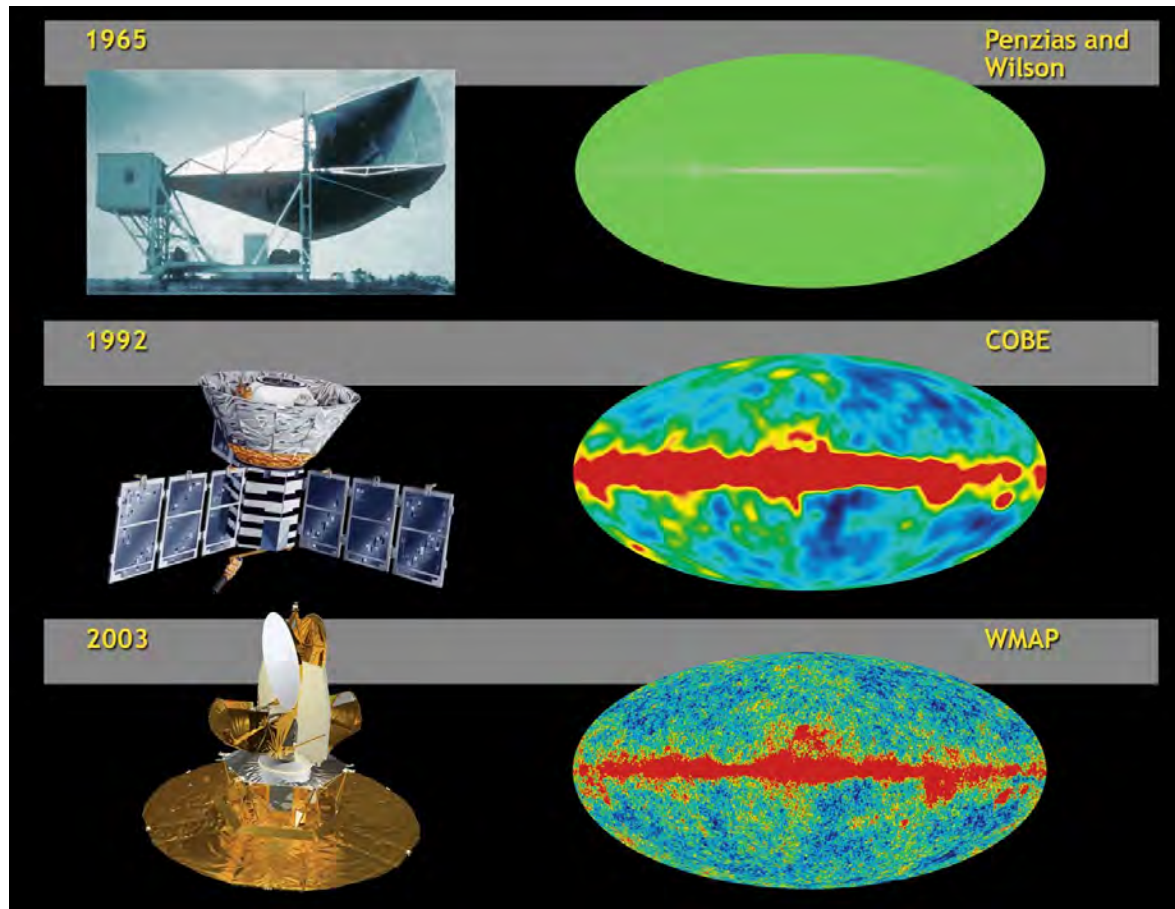


Ci arriva d'ovunque con  $2.73^{\circ}\text{K}$ .

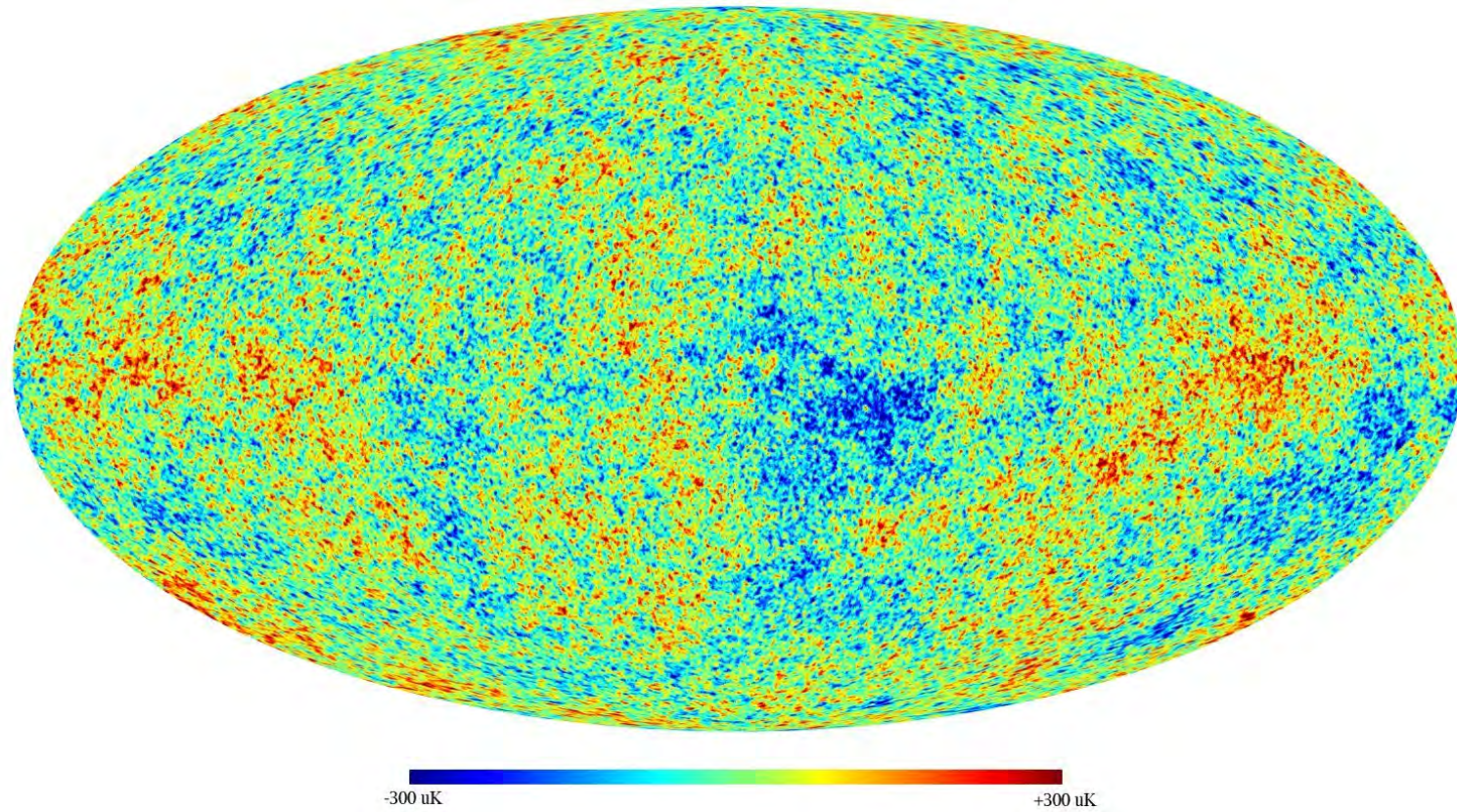
- 1992- Il satellite COBE (COsmic Background Explorer) scopre piccole **anisotropie nella CMB** di  $1/10000^{\circ}\text{K}$ . (come è necessario avere per formare la struttura dell'universo per il colasso gravitazionale di piccole disomogeneità: **un'altra conferma del Big Bang**)  
(Premio Nobel 2006-  
J. Mather e G. Smoot)



# Radiazione Cosmica di Fondo (CMB)

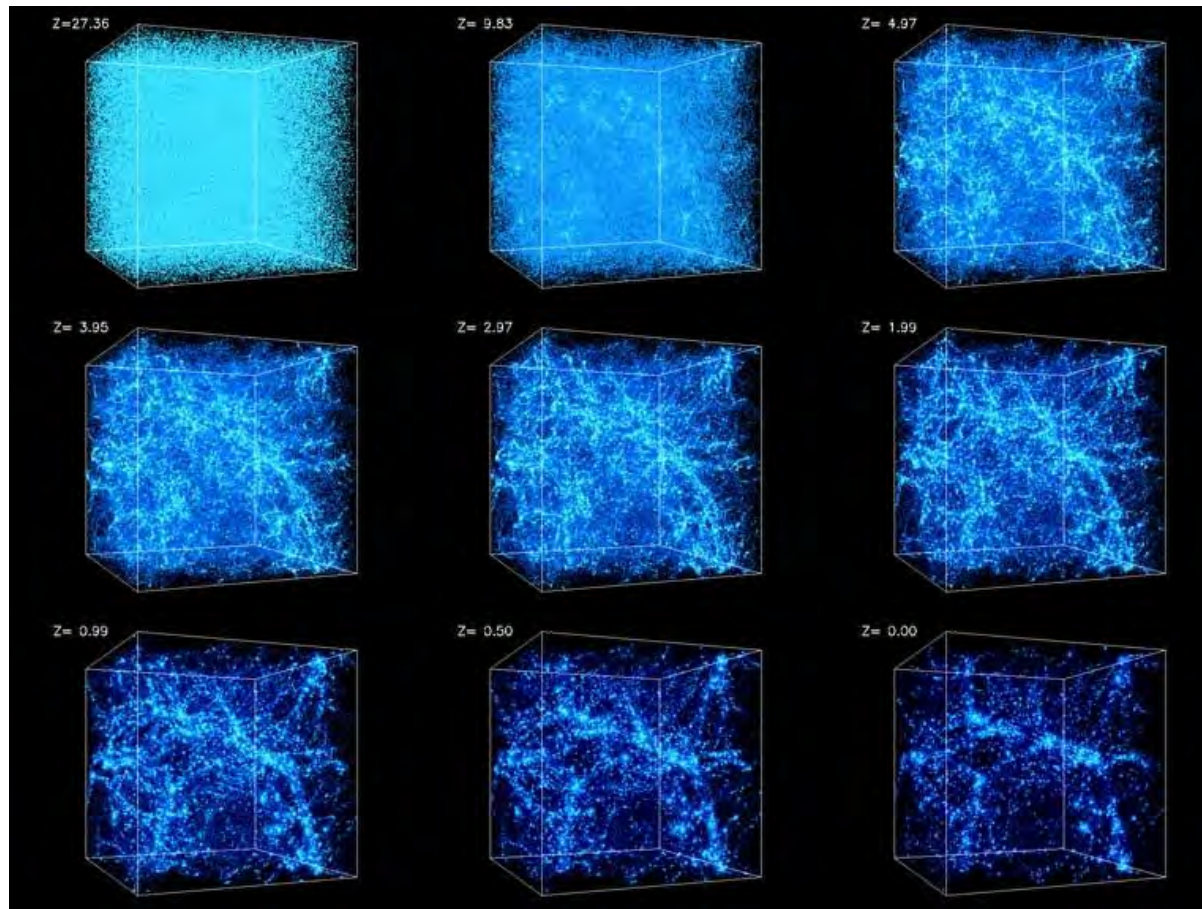


# Anisotropie della CMB $1/10000$ °K

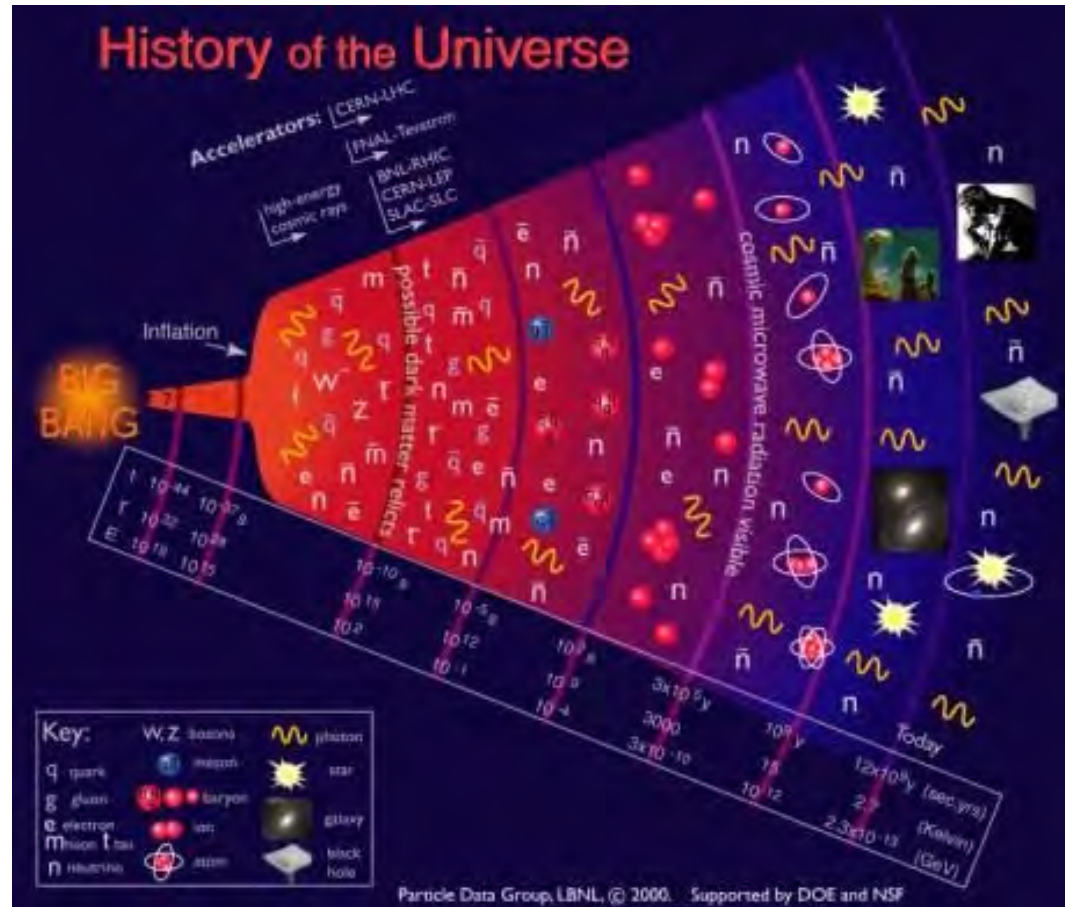




# La formazione delle strutture



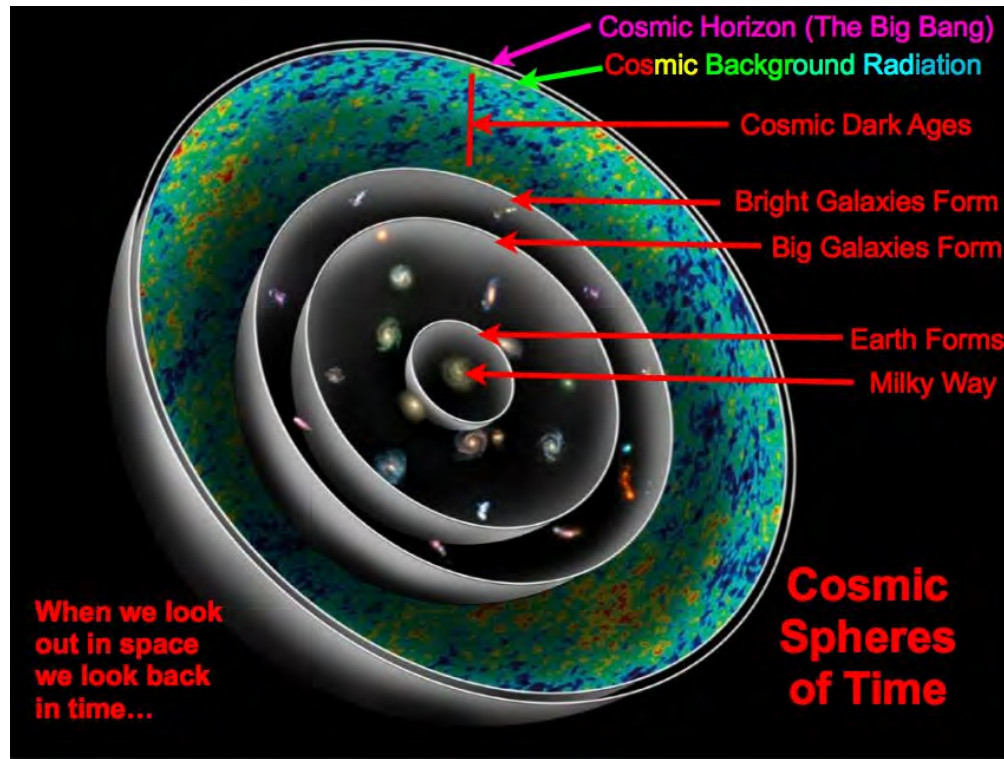
# Storia dell'universo



Età: 13 700 000 000 anni

# Più lontano è, prima è

Sfere di Tempo Cosmico Fig da J. Primack

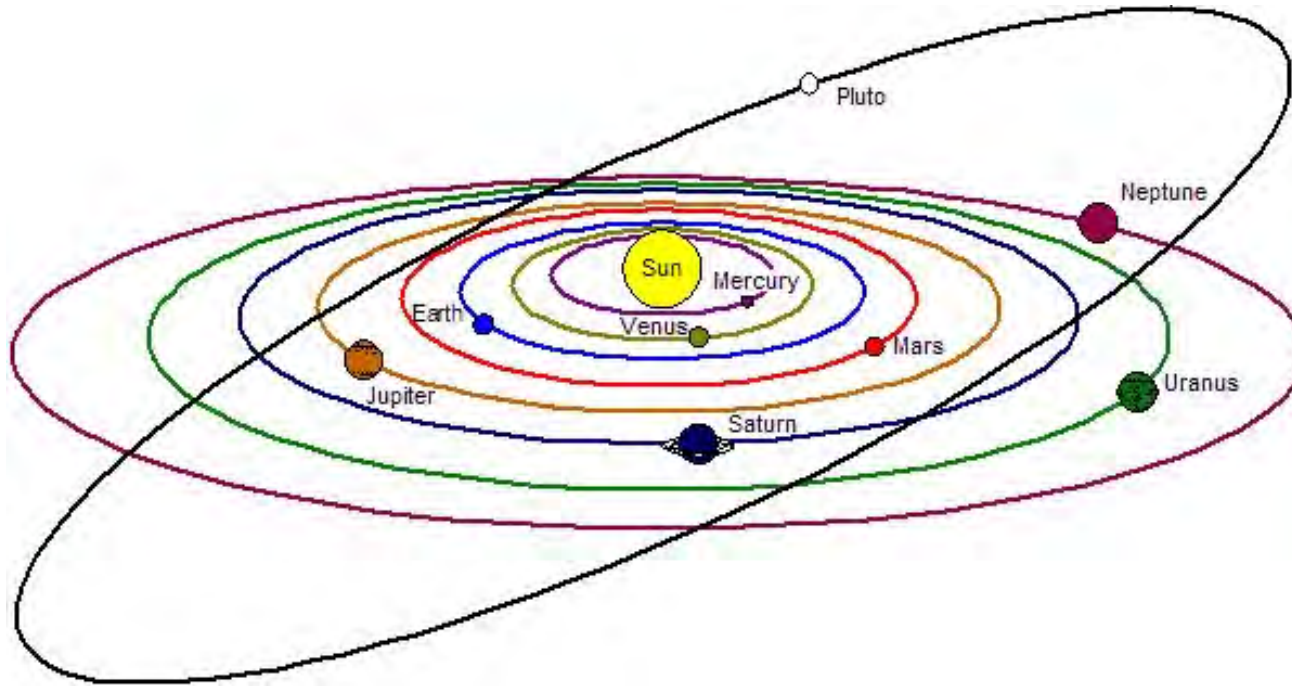


Quando guardiamo lontano nello spazio guardiamo indietro nel tempo...

# La maggior parte dell'Universo non è come noi

- Intorno a noi: atomi e luce.
- Negli atomi: elettroni e nuclei atomici
- Nei nuclei ci sono neutroni e protoni.
- I nuclei leggeri provengono dal Big Bang, quelli più pesanti dalle stelle (**Siamo composti dalla materia delle stelle!**)
- Però “pesiamo” l' Universo e scopriamo ...
- che la maggior parte dell' Universo non consiste di tutto questo!

# Cominciamo con “pesare” il Sole



Qual è la massa del Sole? Si ottiene guardando come cambia la velocità di rotazione dei pianeti con la distanza dal Sole



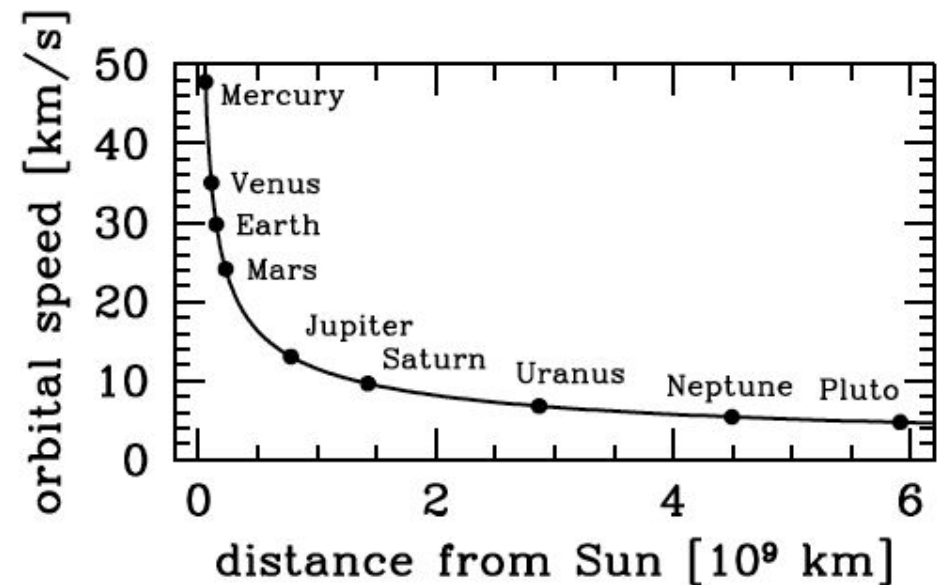
# Qual è la massa $M_{\odot}$ del Sole?

$v$  velocità di rotazione di un pianeta;  $r$  sua distanza dal Sole

$$\frac{GM_{\odot}m}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}}$$

dove  $G$  è una costante

$$\Rightarrow M_{\odot} = 1.9889 \times 10^{30} \text{ kg}$$

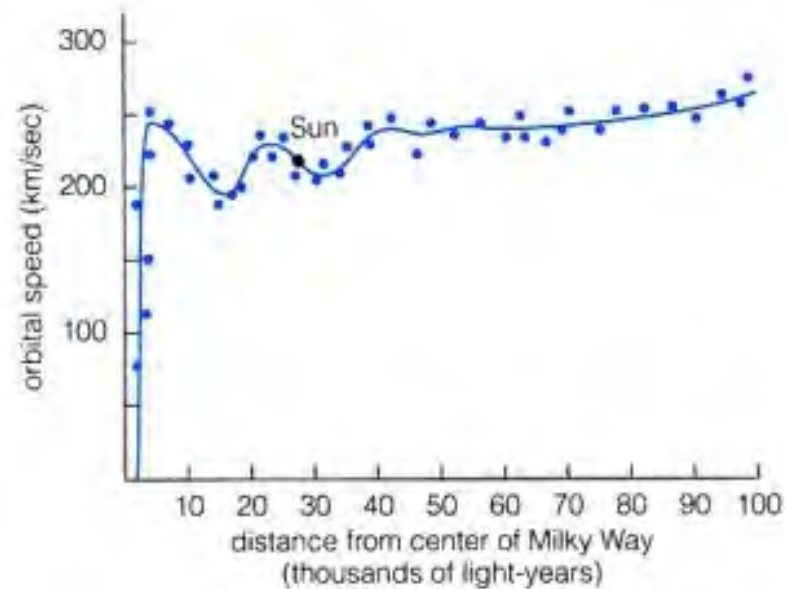


Corpi che ruotano attorno a una massa centrale a causa della gravità si muovono più lentamente quanto più sono lontani dal centro.

**Facciamo lo stesso con la nostra galassia...**

# “Pesiamo” la nostra galassia

Negli anni '70 Vera Rubin provò con lo stesso metodo; la velocità orbitale di oggetti visibili legati alla galassia **NON DECRESCERE** con la distanza dal centro...



la massa non è concentrata nel disco galattico (non finisce dove la luce finisce) **La maggior parte della massa non può essere “vista” (nè emette nè assorbe luce).** La chiamiamo **MATERIA OSCURA**

# “Pesiamo” le galassie

La velocità orbitale non decresce!

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = \text{costante}$$

$$\Rightarrow M(r) \sim r$$

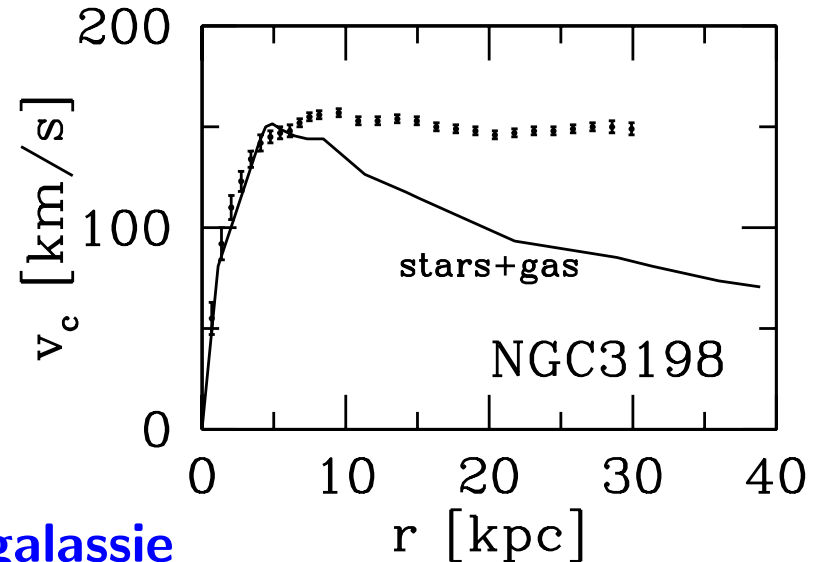
la massa cresce anche dove non c'è luce!

La Materia Oscura domina nelle galassie

e.g. in NGC3198

$$M = 1.6 \times 10^{11} M_{\odot} (r/30\text{kpc})$$

$$M_{\text{stars+gas}} = 0.4 \times 10^{11} M_{\odot}$$



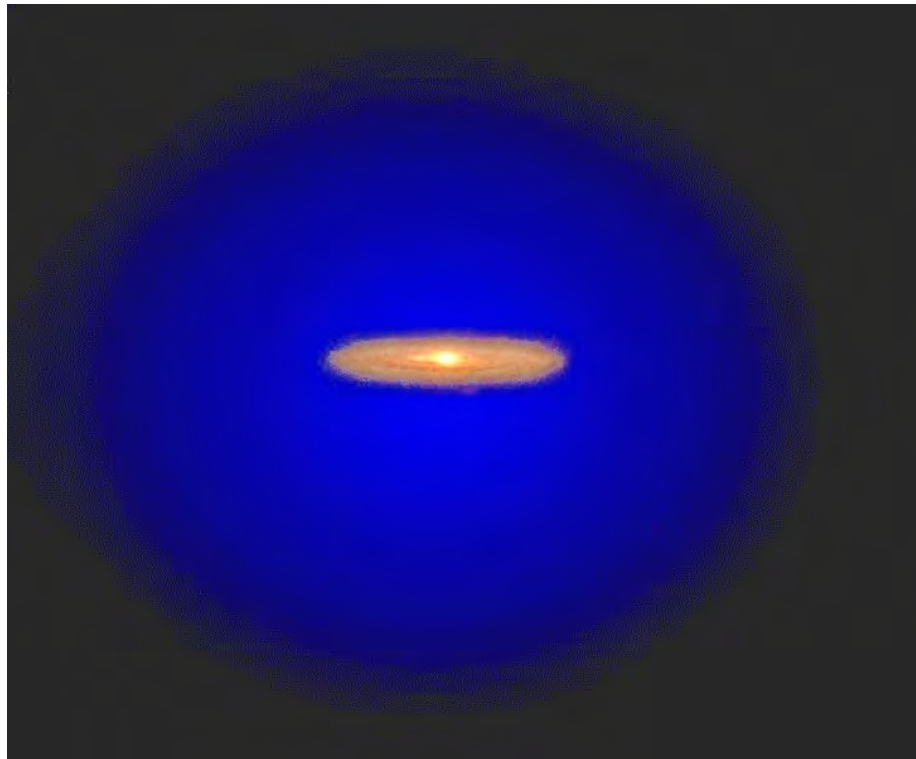
$$\frac{M}{M_{\text{vis}}} > 4$$

1pc = 3.2ly

# Alone di Materia Oscura

Contiene il 70 -80% della massa della galassia

(rappresentazione artistica)

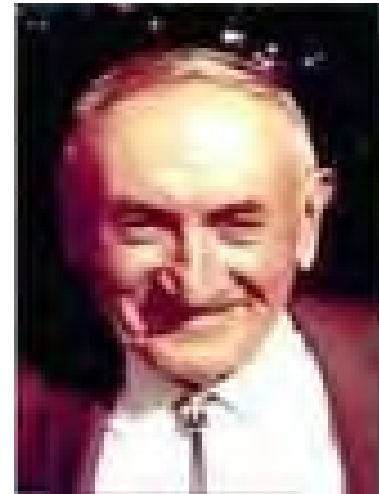


# “Pesiamo” gli ammassi

Nel 1933 Fritz Zwicky scoprì il primo indizio della MATERIA OSCURA (“Massa Mancante” la chiamò lui)

Nell’ Ammasso della Chioma (Coma Cluster) scoprì che le galassie si muovono troppo velocemente per restare aggregate solo a causa della massa visibile dell’ ammasso!

Più tardi: anche il gas negli ammassi si muove troppo rapidamente (è troppo caldo, secondo misure con raggi X) per rimanere nell’ ammasso.

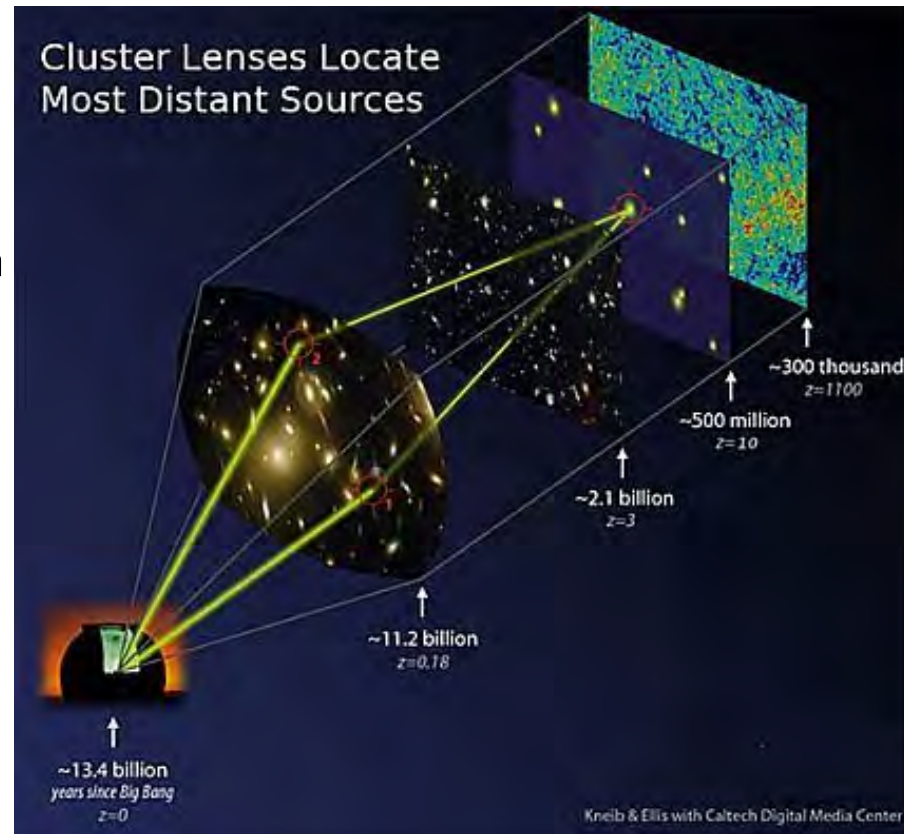


## Un altro metodo per “pesare” gli ammassi di galassie: lente gravitazionale

L'attrazione gravitazionale  
curva la luce come curva  
la traiettoria di una particella

La lente gravitazionale  
dipende da TUTTA  
la massa nel mezzo

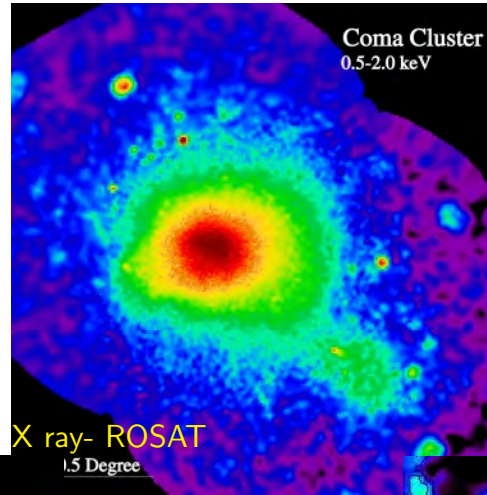
Conclusione...



# La MO domina negli ammassi



Coma cluster optical-Kitt Peak



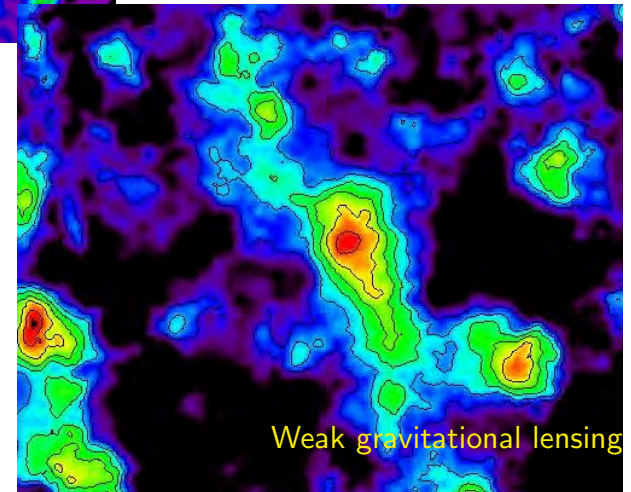
X ray- ROSAT

$$\frac{M}{M_{\text{vis}}} \simeq 6$$



NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECCF) • STScI-PRC00-08

Strong gravitational lensing



Weak gravitational lensing



## MO, non gravità modificata “bullet cluster” Agosto 2006



Due galassie si scontrarono lasciando la materia visibile (interagente) dietro, nel mezzo (gas caldo rivelato in raggi X, in rosa), e non DOVE È LA MAGGIOR PARTE DELLA MASSA (misurata con lente gravitazionale, in azzurro)

MOND (MOdified Newtonian Dynamics)? M. Milgrom, 1983

Solo materia visibile e gravità modificata non possono spiegare questa segregazione: la lente gravitazionale dovrebbe essere più forte dove c'è il gas



# Alle scale più grandi

Si usa la Relatività Generale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu})$$

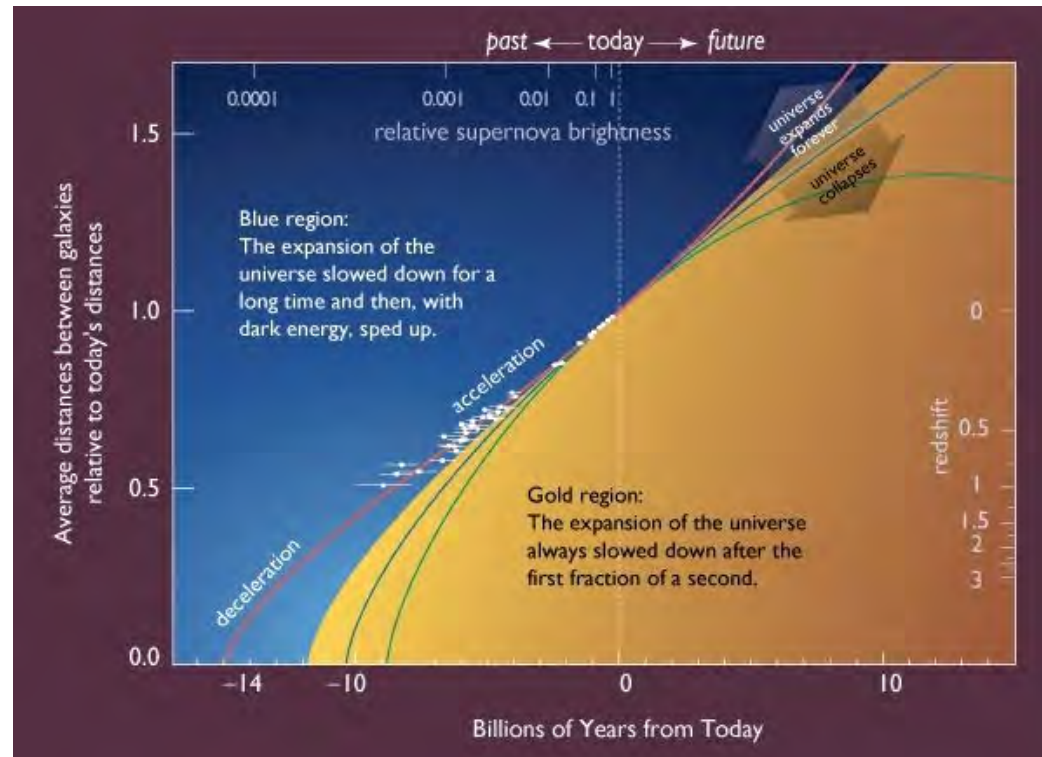
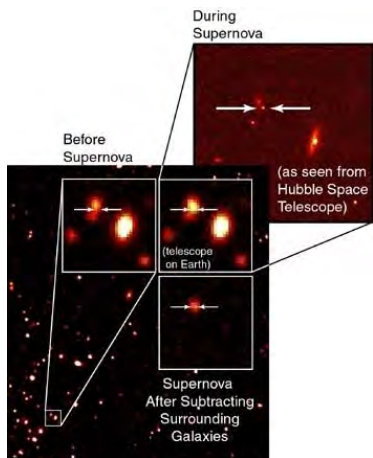
Per collegare:

**Geometria dello spaziotempo**  $\longleftrightarrow$  **Densità di massa ed energia**

# La sorpresa più recente

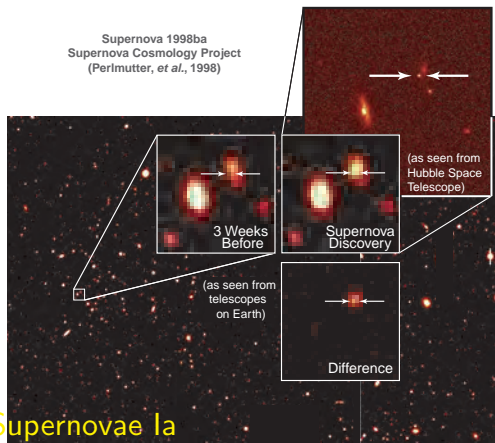
## 1998 Supernovae SNIa: L'espansione è accelerata!

La componente principale dell'Universo è la **Energia Oscura** con interazioni gravitazionali repulsive, come la Costante Cosmologica  $\Lambda$

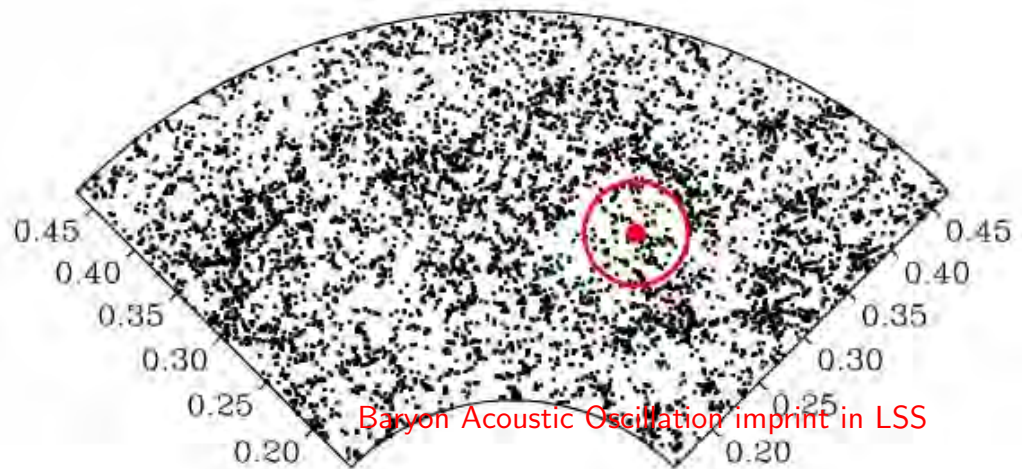
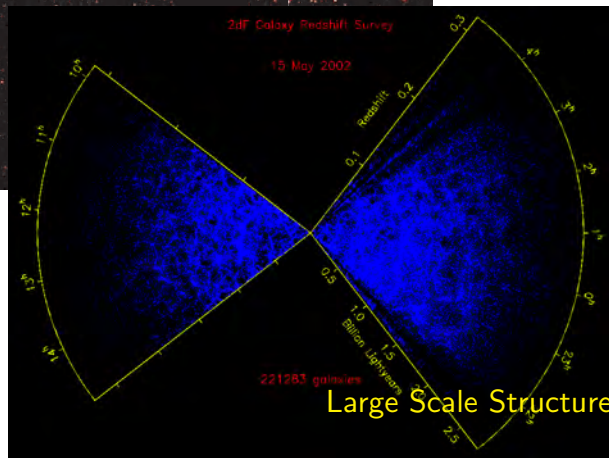
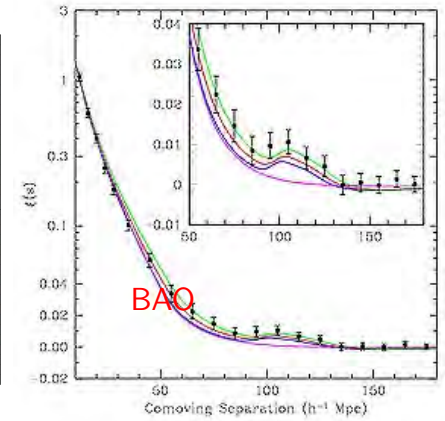
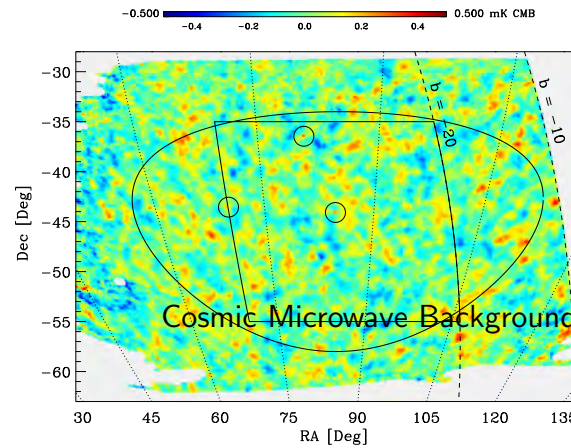


(Premio Nobel 2011 a Perlmutter, Reiss e Schmidt)

# Alle scale più grandi 4 tipi di dati



Supernovae Ia



Portano alla....

# Concordanza Cosmologica

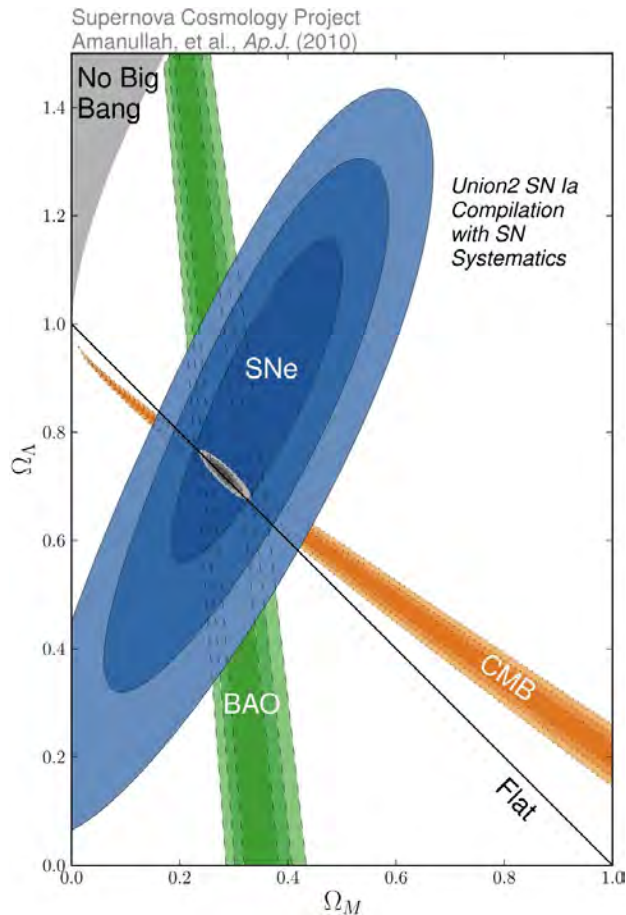


Fig: Amanullah et al 2010 (The Supernova Cosmology Project)

$\Omega$  = frazione di ogni componente

WMAP7, BAO, SN1a: E. Komatsu, et al., 2010

$$\Omega_\Lambda = 72.2 \pm 1.5\% \quad \Omega_M = 27.8 \pm 1.5\%$$

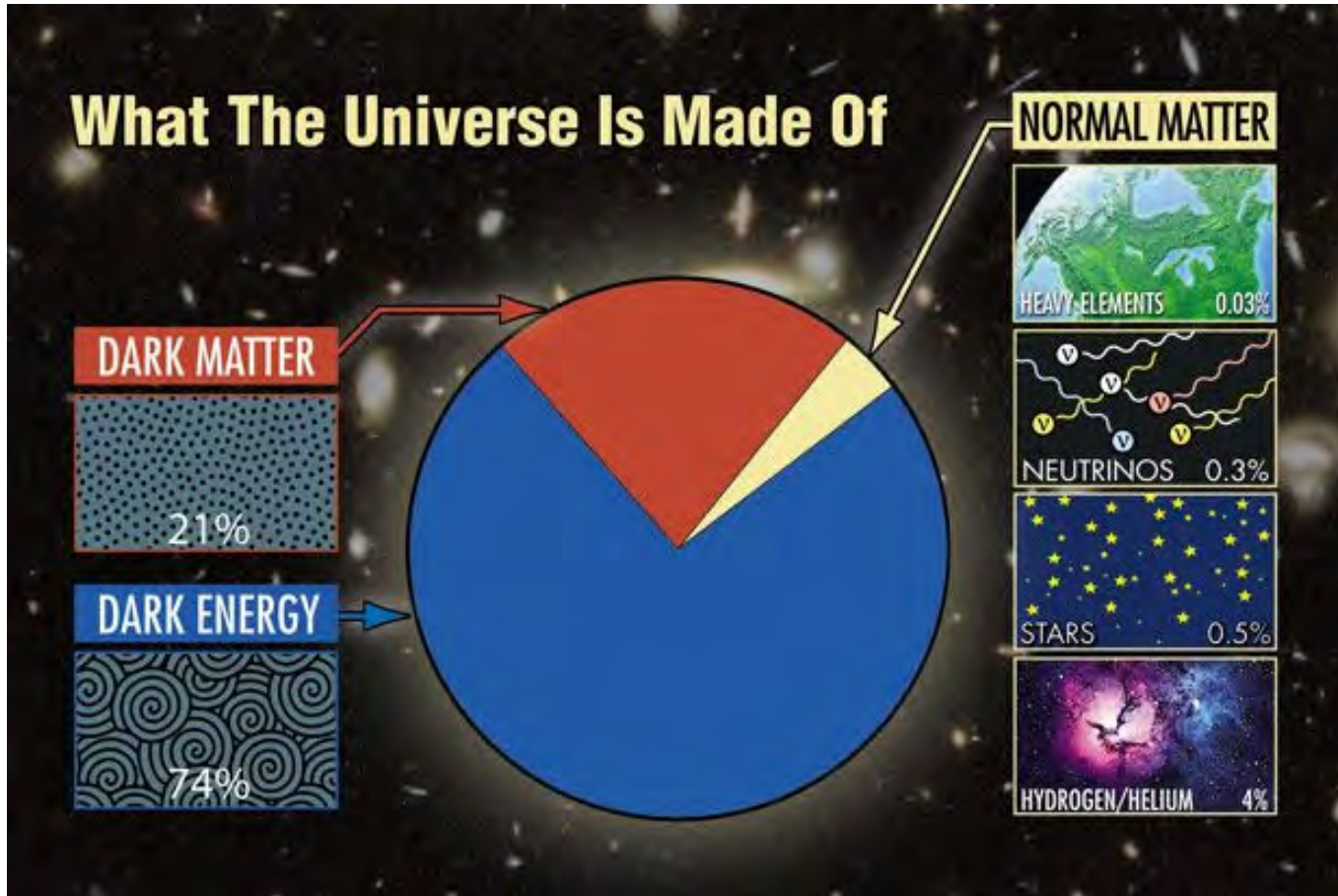
dove  $\Omega_{\text{Matter}}$  è:

$$\Omega_{(\text{protoni,neutroni})} = 4.61 \pm 0.15\%$$

$$\Omega_{\text{MO}} = 23.2 \pm 1.3\%$$



# Ciò di cui è fatto l'Universo Fig: from HETDEX



# che sono la EO e la MO?

- La Energia Oscura: forse è l'energia del vuoto (cioè una proprietà intrinseca dello spazio)?

Crediamo che la EO sia stata presente nell'Universo dall'inizio, anche se è diventata la componente dominante solo recentemente (6 miliardi di anni fa): la densità di materia ed energia diminuisce con la espansione, però quella della EO rimane costante (o quasi)

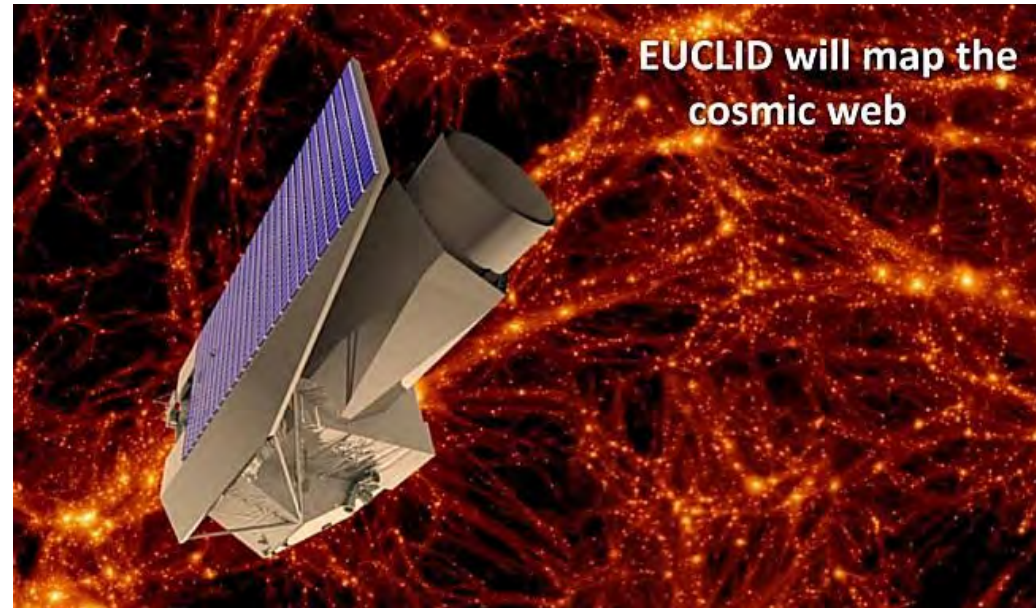
- La Materia Oscura: forse sono nuove particelle elementari?

Molti esperimenti e osservazioni sono in corso per tentare di scoprire che cosa sono la Energia Oscura e la Materia Oscura... alcuni di loro sono...

## Energia Oscura



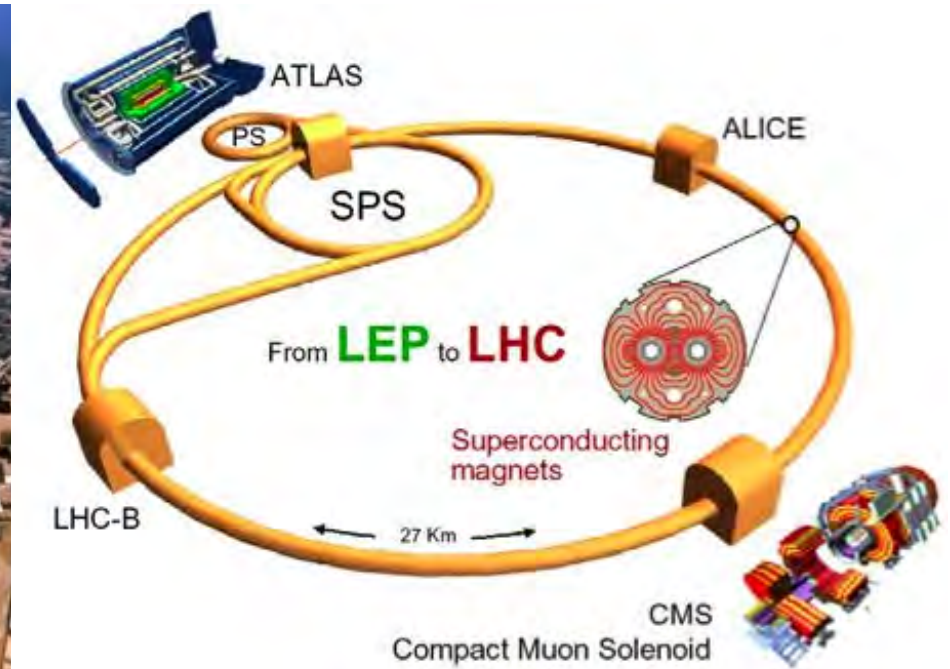
ESA Planck Space Observatory



Euclid Space Telescope ESA Mission



# Materia Oscura: LHC (Large Hadron Collider) al CERN

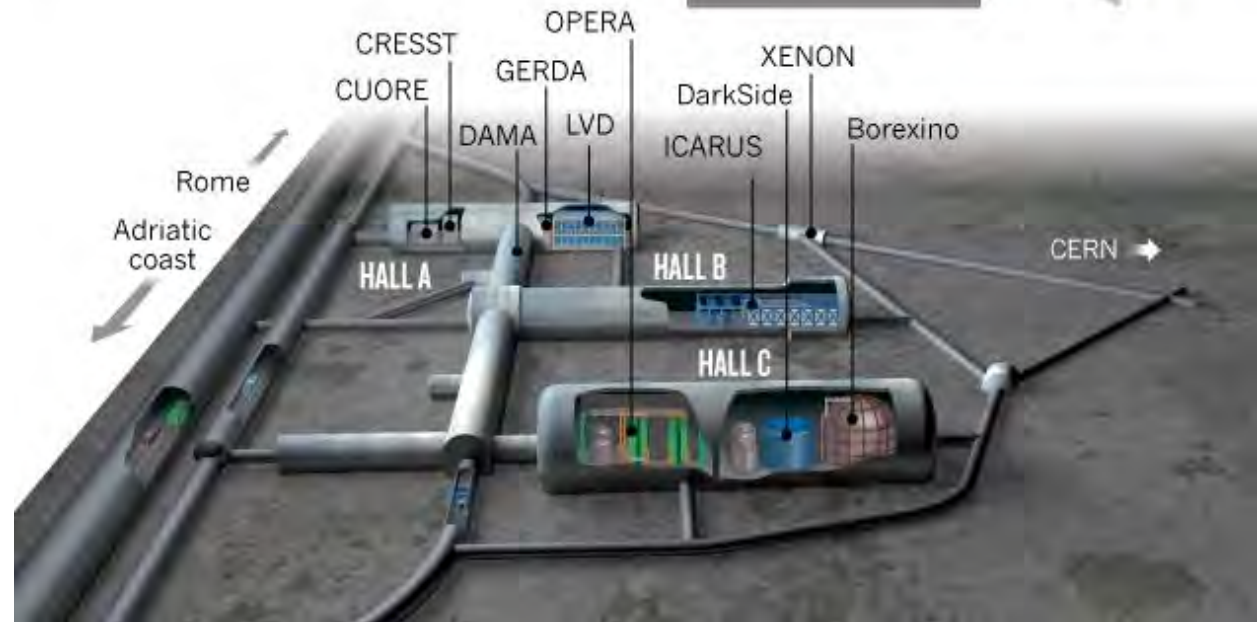
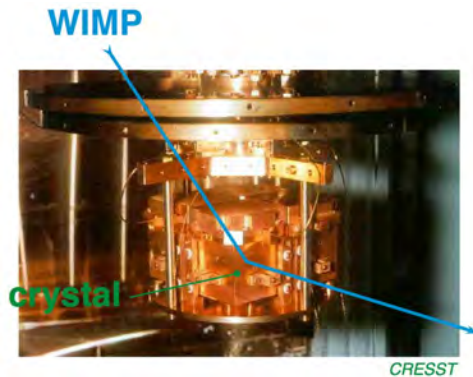




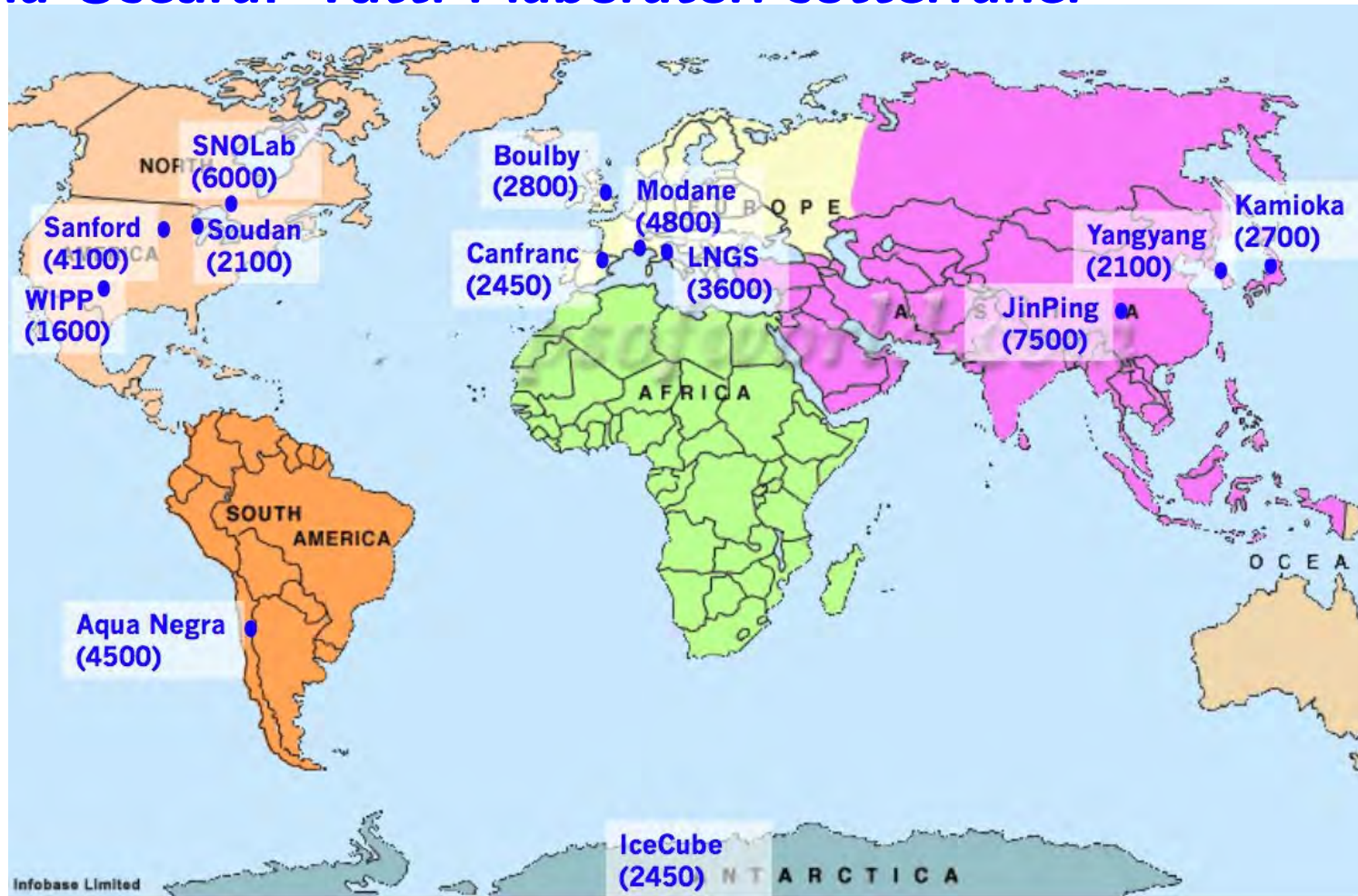
# Materia Oscura: rivelazione diretta- Laboratori sotterranei

## THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.



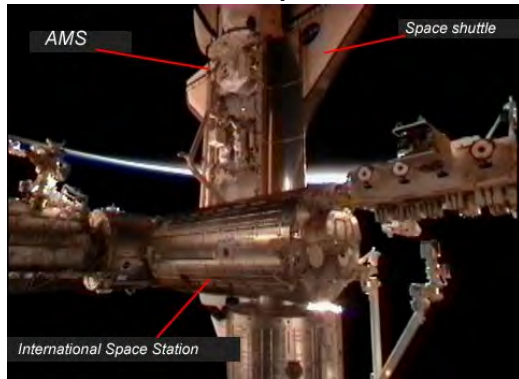
## Materia Oscura: Tutti i laboratori sotterranei



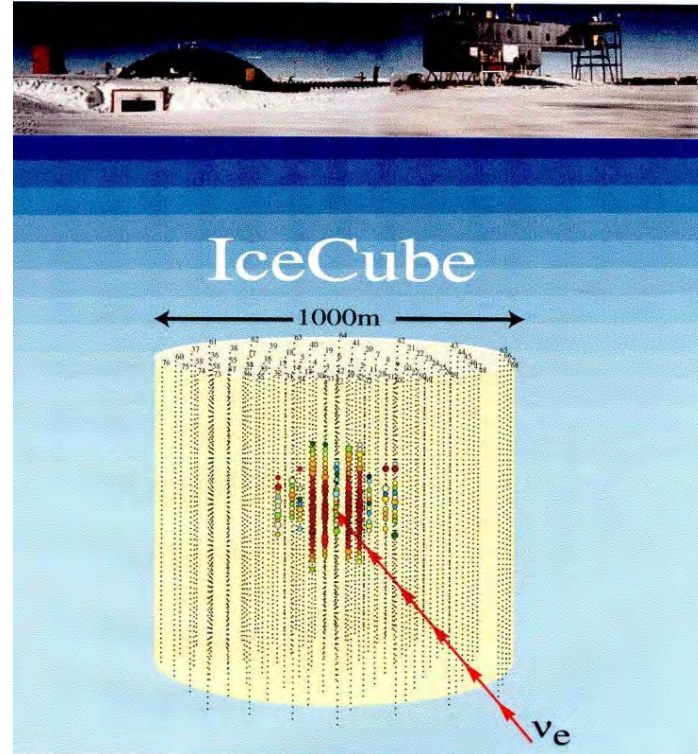
# Materia Oscura: rivelazione indiretta - con altre particelle



NASA Fermi Telescope



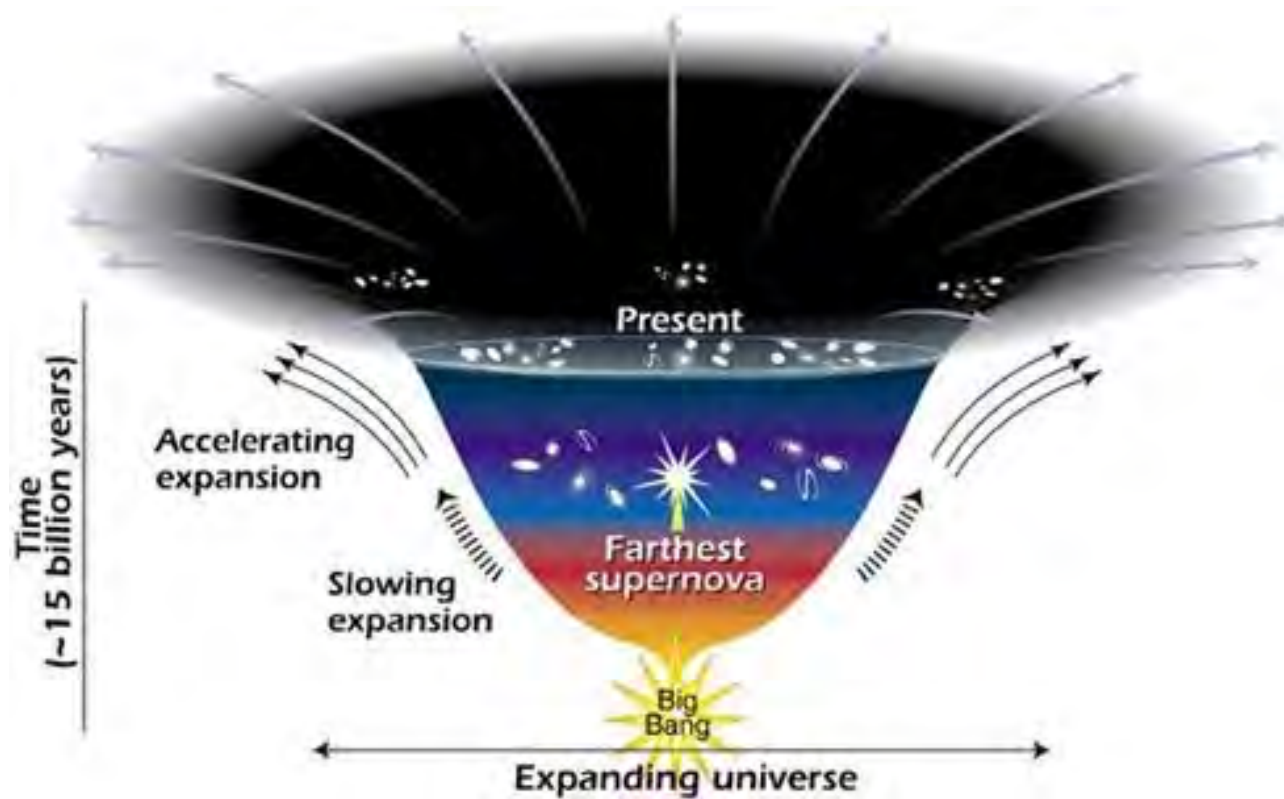
- 
- AMS- space station



NSF IceCube- km-cubo di ghiaccio- Polo Sud



# Il Futuro dell' Universo? vuoto?



# Contenuto dell'Universo

- 72% Energia Oscura [con interazioni gravitazionali repulsive]
- 23% Materia Oscura [neutrini solo  $< 0.1\%$ , nuove particelle?]
- 5% nuclei atomici [la Rivoluzione Copernicana definitiva!]
- $10^{-5}$  radiazione [dominata dalla CMB]

95% del contenuto dell'Universo è sconosciuto!

C'è molto lavoro affascinante di ricerca da fare!

Forse potremmo essere la prima generazione umana che sappia di cosa è fatto l'Universo e quale sarà il suo destino!

