Università della Terza Età "Cardinale Giovanni Colombo" – Milano

A. A. 2022 - 2023

Corso di Astrofisica

Docente:
Adriano Gaspani

Il Modello Standard per l'Universo

PRINCIPALI ASSUNZIONI IN COSMOLOGIA:

PRINCIPIO COSMOLOGICO

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

PRINCIPIO COPERNICANO

-NON OCCUPIAMO UNA POSIZIONE PRIVILEGIATA NELL'UNIVERSO

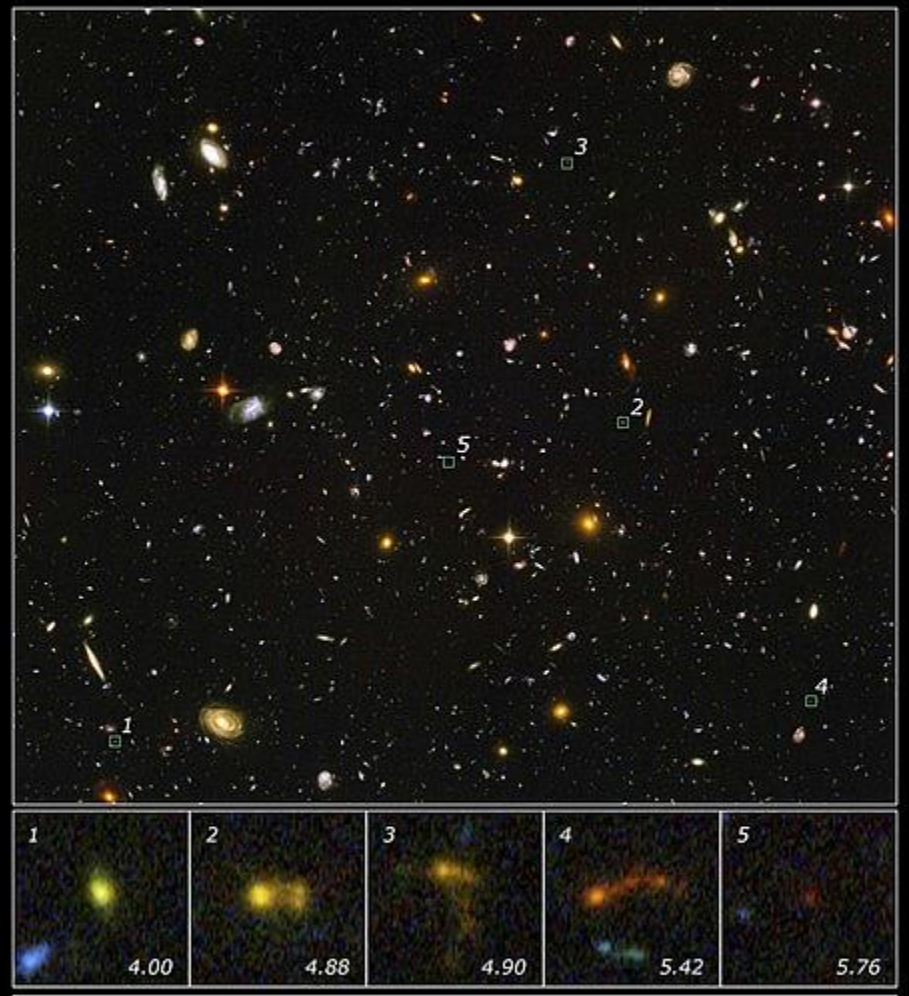
-NON ESISTONO POSIZIONI PRIVILEGIATE

IMPLICAZIONI DEL PRINCIPIO COSMOLOGICO

-LA DENSITA' MEDIA DELLA MATERIA E DELL'ENERGIA E' UGUALE IN TUTTO L'UNIVERSO.

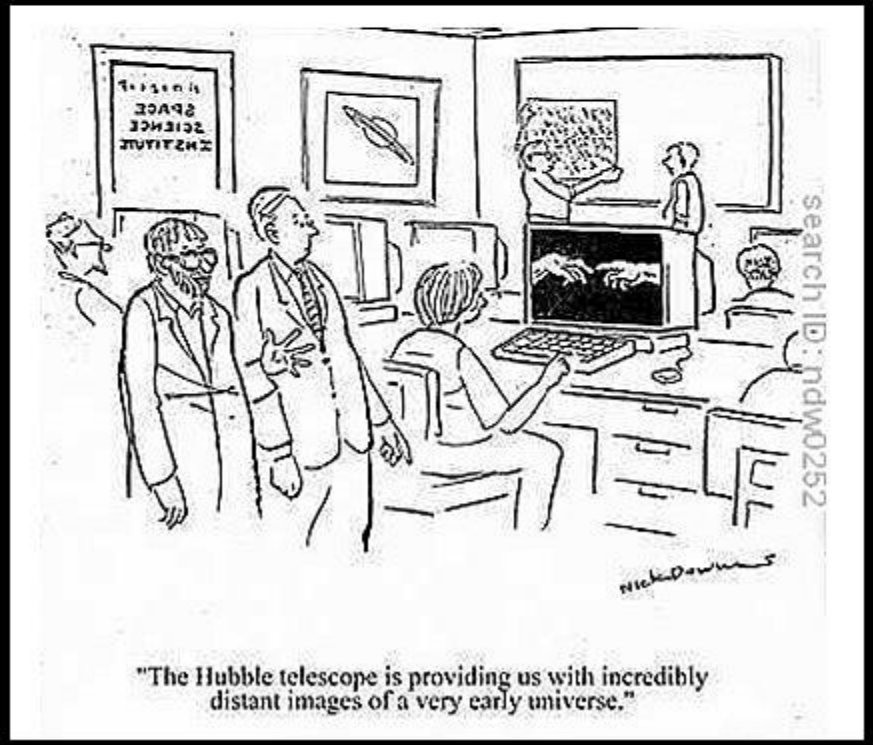
-QUALSIASI OSSERVATORE NELL'UNIVERSO PERCEPISCE L'ESPANSIONE NELLO STESSO MODO.

-LA CURVATURA DELL'UNIVERSO E' LA STESSA IN OGNI LUOGO.



LA VOLTA CELESTE APPARE COSTELLATA DI GALASSIE.

LA TEORIA DEL BIG BANG NON SPIEGA LA LORO ORIGINE



Il modello cosmologico standard

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

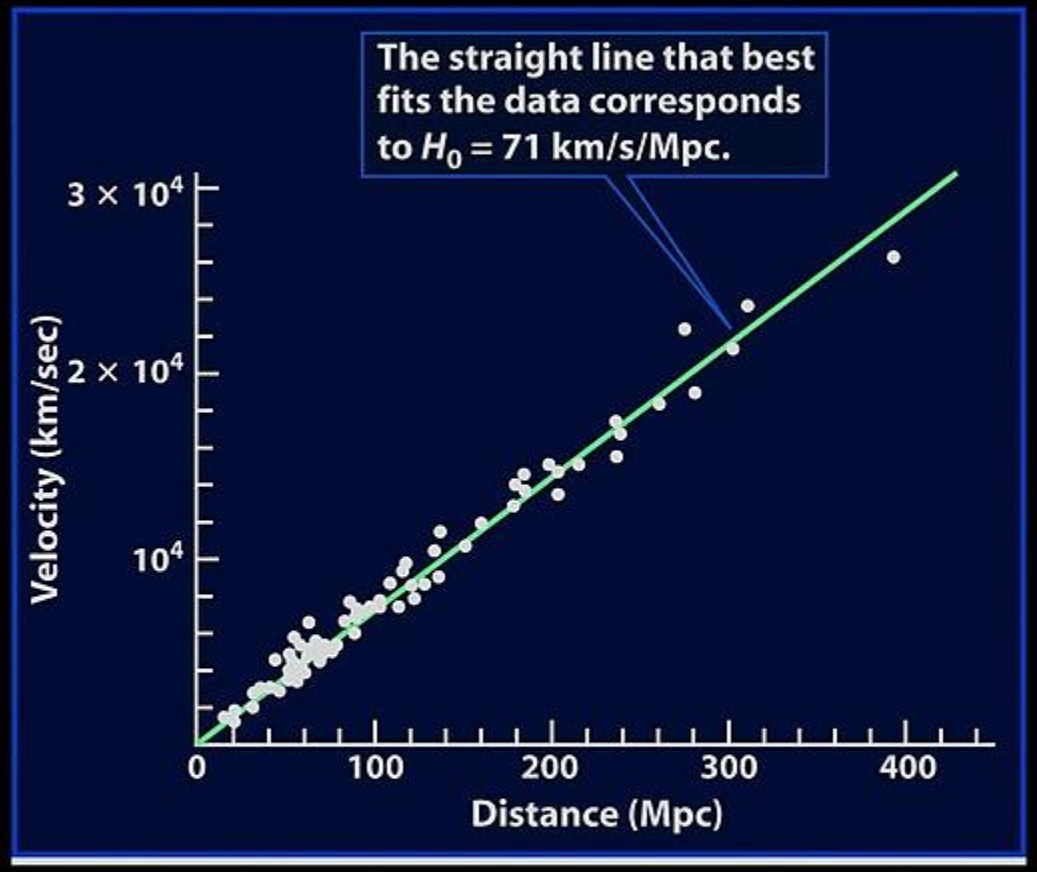
legge di Hubble ⇒ $v = H_0 r$

Edwin Hubble

v e la velocita` 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 realta' il redshift cosmologico non e' in senso stretto interpretabile come effetto Doppler, infatti si ottiene facilmente v>c per gli oggetti piu' distanti.

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



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

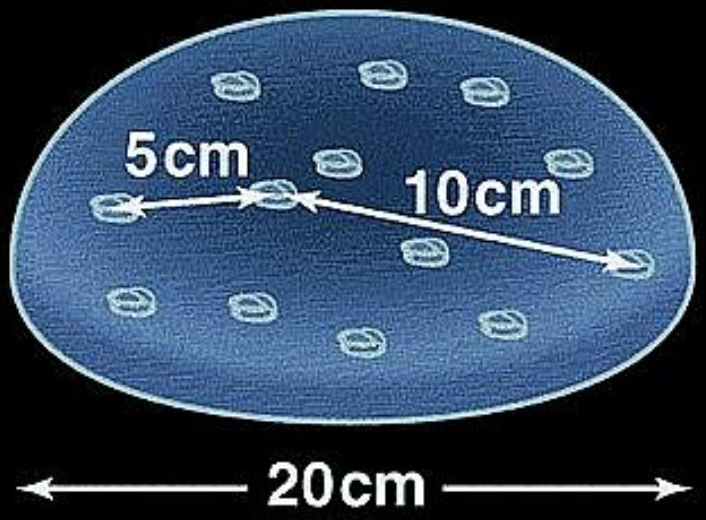
LE GALASSIE SI ALLONTANANO RECIPROCAMENTE AD UNA VELOCITA' PROPORZIONALE ALLA LORO DISTANZA

LEGGE DI HUBBLE

$$v = H_0 D$$

COSTANTE DI HUBBLE

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



LA LEGGE DI HUBBLE
E' IN PERFETTO ACCORDO
CON UN UNIVERSO
OMOGENEO IN ESPANSIONE,
COME PREVISTO DALLA
TEORIA DEL

BIG BANG

Il Principio Cosmologico o Copernicano

- Noi non occupiamo una posizione privilegiata nell'Universo.
- Tutti gli osservatori "co-moventi" – alla stessa epoca cosmica - troveranno la stessa legge di Hubble.
- Mediando sulla scala tipica delle piu' estese disomogeneita' cosmiche, l'Universo e' omogeneo ed isotropo.
- L'Universo e' ben descritto dalla geometria di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker.

Friedmann vs. Newton

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) d\ell^2$$

Metrica di Robertson-Walker

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

Fattore di scala

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{\kappa c^2}{a^2}$$

$$\dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right)$$

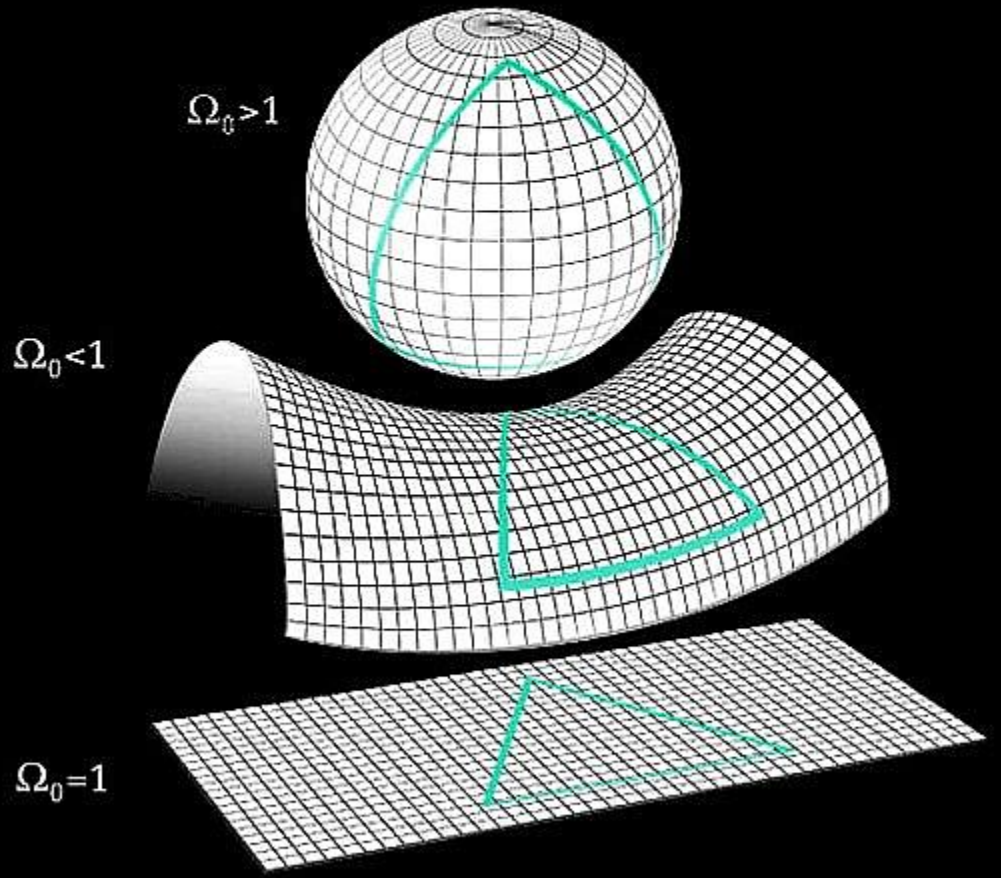
F = ma
E = const.
M = const.

ρ = densita' di energia
P = pressione

$H_0 = \frac{\dot{a}_0}{a_0}$	costante di Hubble
$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0 a_0}{\dot{a}_0^2}$	parametro di decelerazione
$\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{0c}} \equiv \frac{8\pi G\rho_0}{3H_0^2}$	parametro di densita'
Λ	costante cosmologica

parametri cosmologici

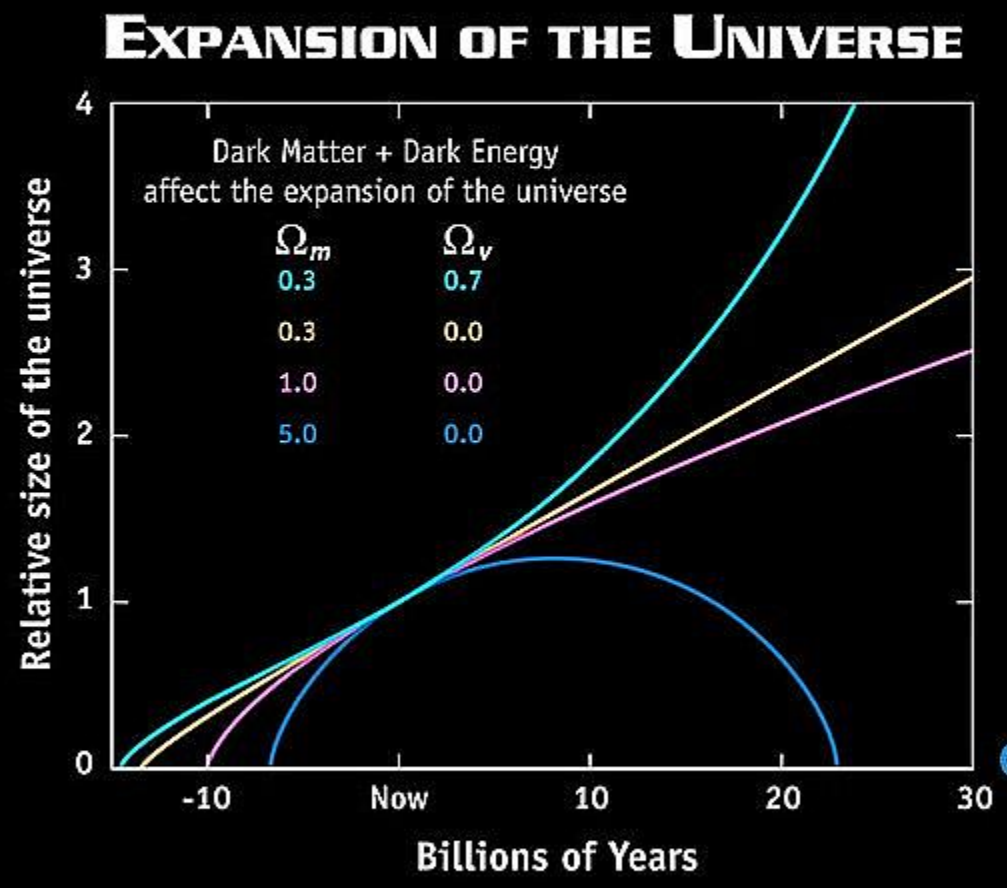
IN UN UNIVERSO ISOTROPO ED OMOGENEO LO SPAZIO-TEMPO, CURVATO DALLA PRESENZA DELLA MATERIA/ENERGIA, PUO' ASSUMERE SOLO TRE FORME:



UNIVERSO CHIUSO: FINITO

UNIVERSO APERTO: INFINITO

UNIVERSO PIATTO:INFINITO



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

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

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

*L'abbondanza e la distribuzione della luce nel cielo **non** rappresentano in modo fedele abbondanza e distribuzione dell'energia nel cosmo!!*

Evidenza di materia oscura dalle curve di rotazione di galassie spirale

Lo studio delle galassie a spirale mostra che la curva della velocita' di rotazione rimane costante, o piatta, all'aumentare della distanza dal centro galattico. Sulla base della teoria Newtoniana la velocita' di rotazione dovrebbe diminuire per le componenti piu' lontane dal centro galattico. La curva di rotazione piatta suggerisce che le galassie sono circondate da una significativa quantita' di materia oscura, ldistribuita in massicci aloni oscuri di forma approssimativamente sferica. Nelle parti piu' esterne delle galassie la luminosita' e' trascurabile; nubi di gas che orbitano in tali regioni permettono di measurare lcome varia la velocita' di rotazione con la distanza dal centro galattico, portando alla conclusione che essa tende a rimanere costante. La masss deve continuare a crescere poiche' la velocita' di rotazione deve soddisfa alla legge (di Keplero):

$$v^2 = GM/r$$

dove **M** *e' la massa entro il raggio* **r**; *quindi* $M \propto r$. *Il rapporto massa/luminosita' della galassia e' molto lmaggiore di quello stimato dalla regione luminosa interna.*

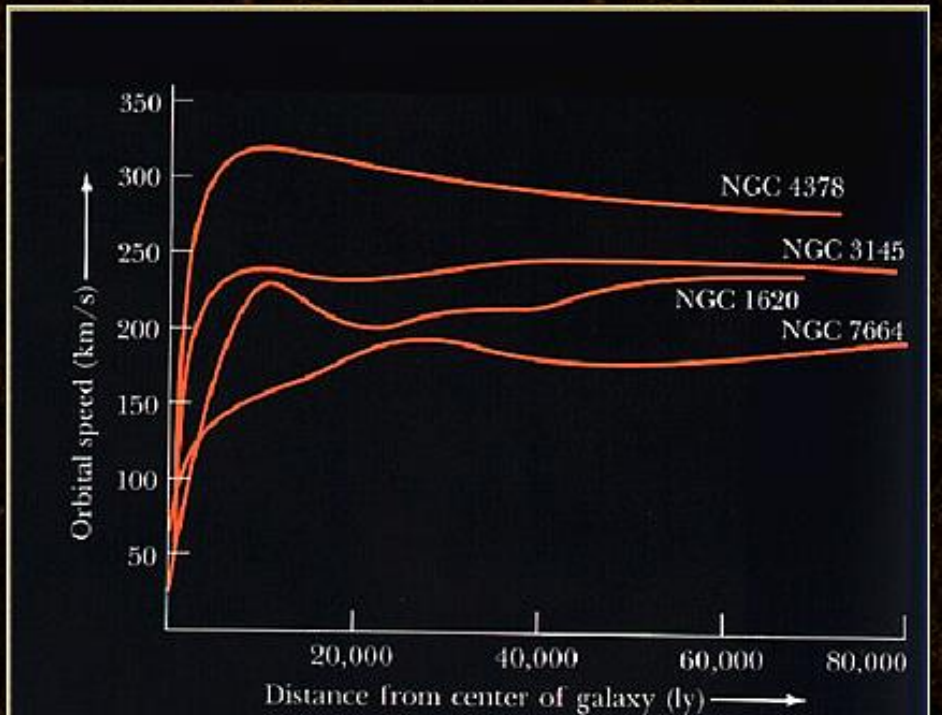
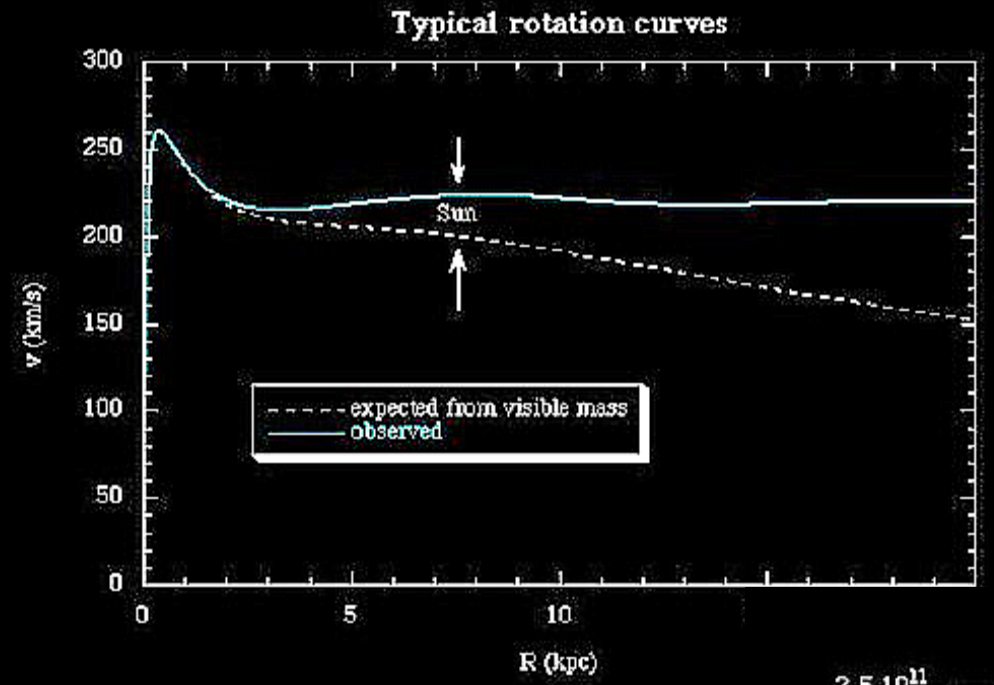
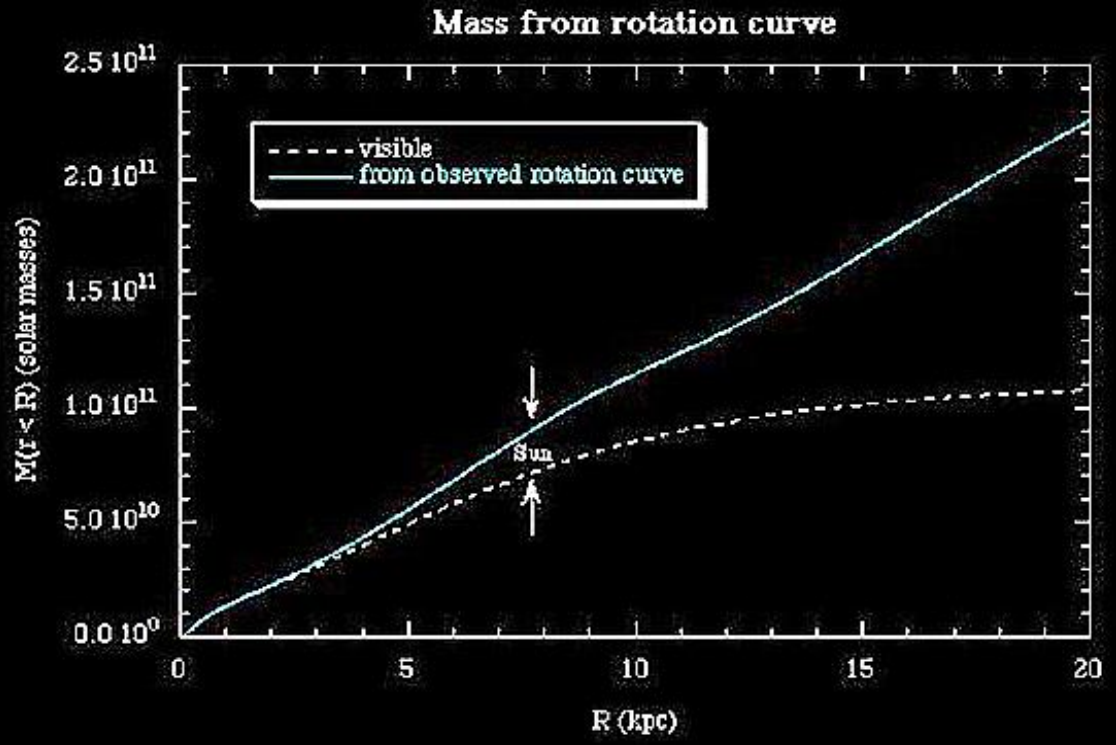


FIGURE 26-25 The Rotation Curves of Four Spiral Galaxies This graph shows the orbital speed of material in the disks of four spiral galaxies. Many galaxies have flat rotation curves, indicating the presence of extended halos of dark matter. (Adapted from V. Rubin and K. Ford)

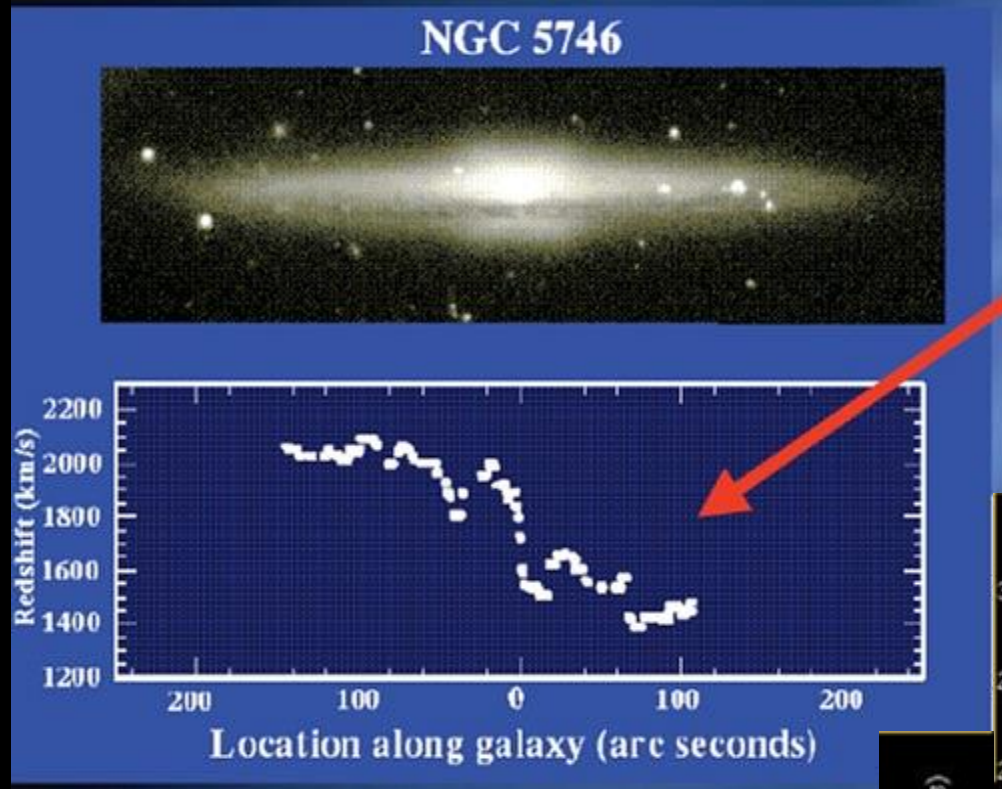


$v^2 \sim G\,M/R$

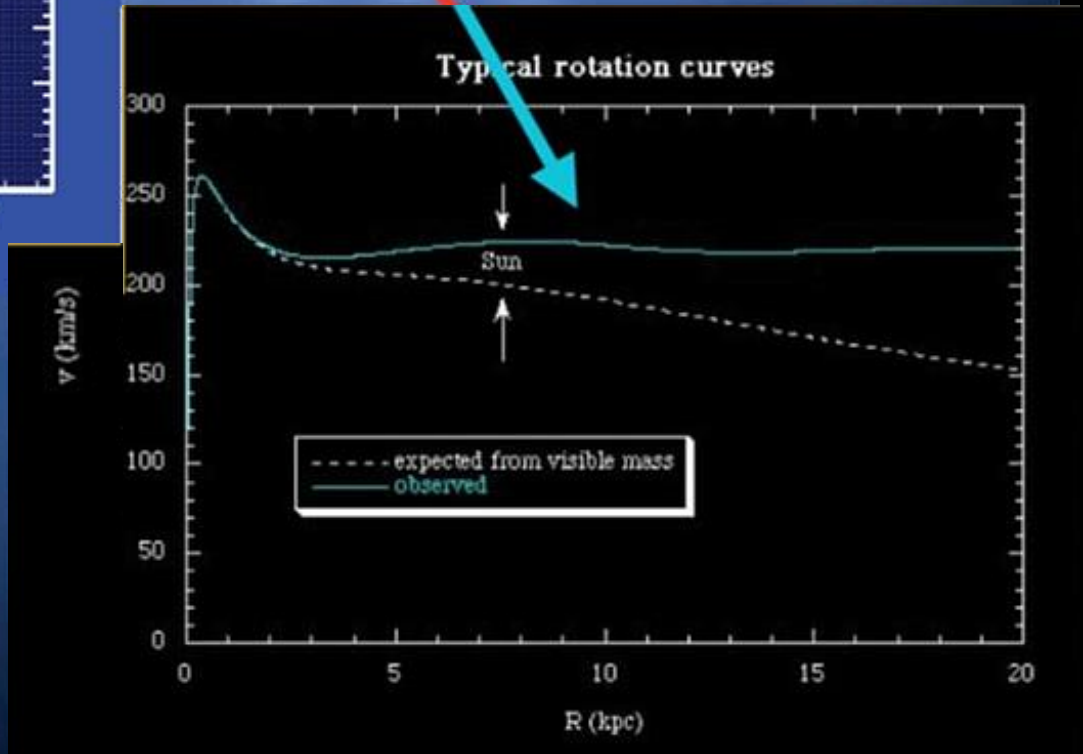
$M \propto v^2 R$



Le evidenze dell'esistenza di Materia Oscura

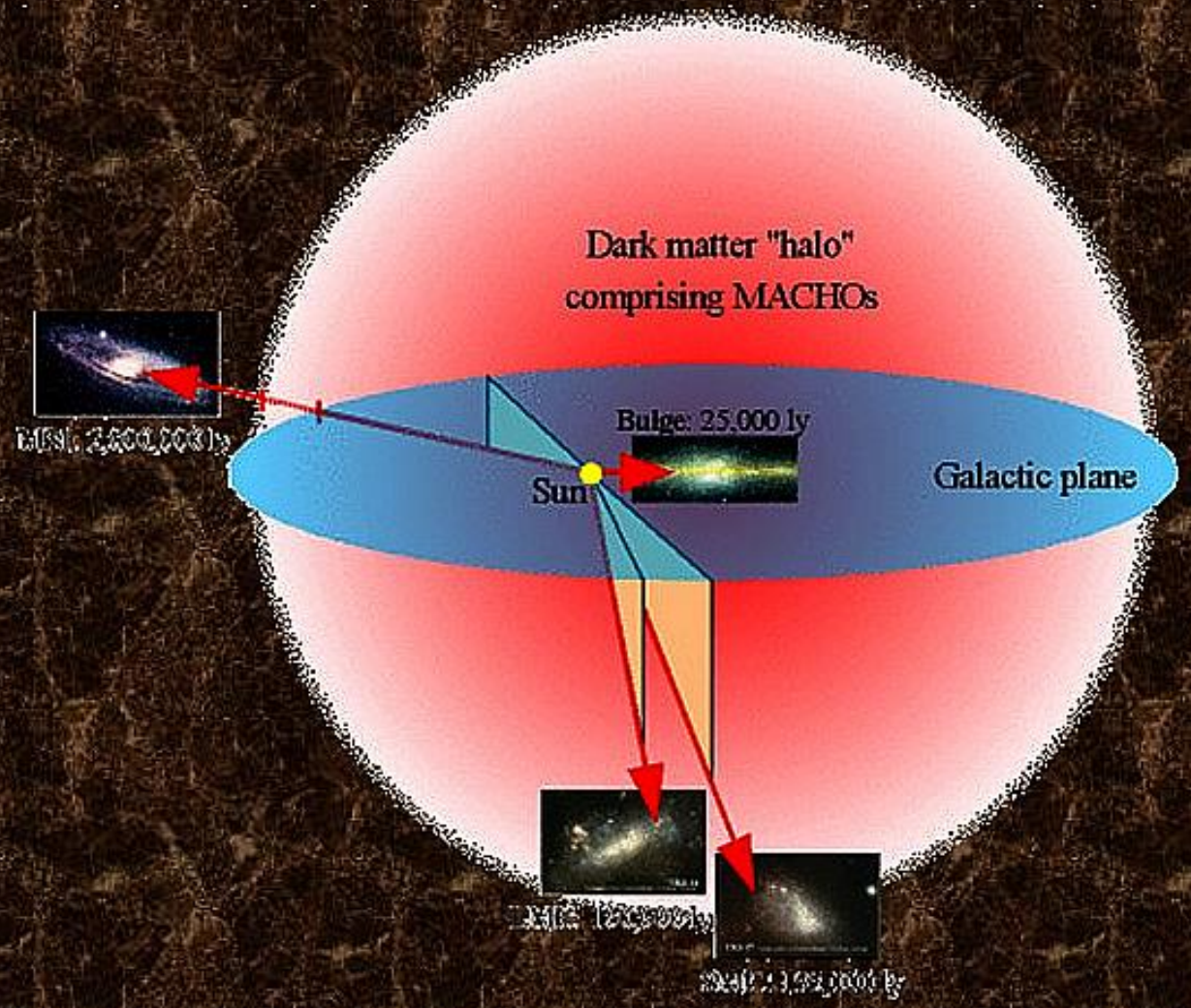


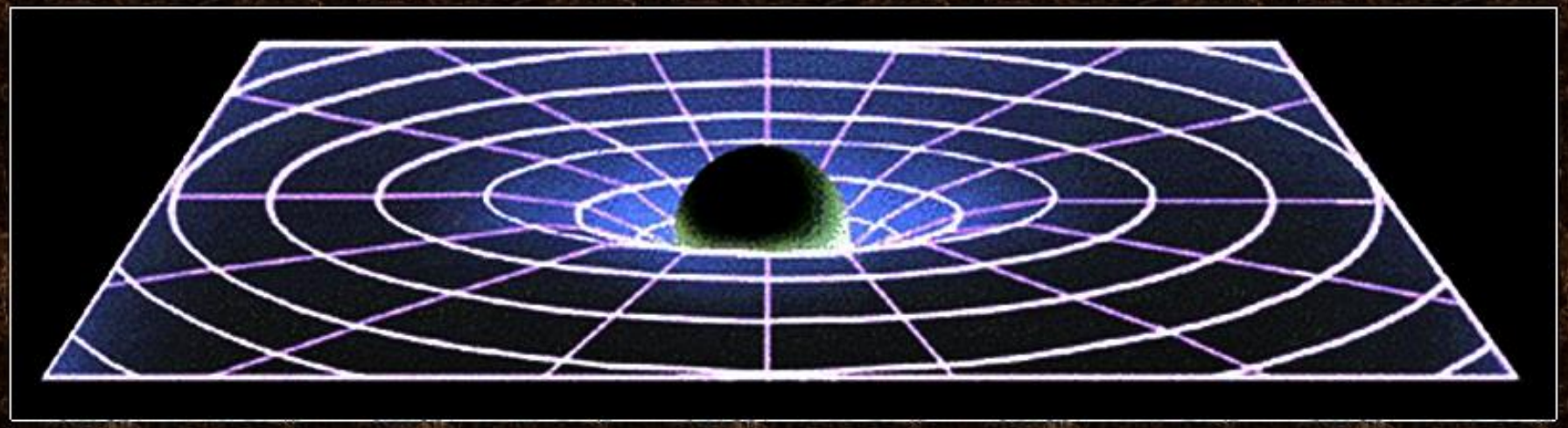
$V^2(R) \sim M(R)/R$



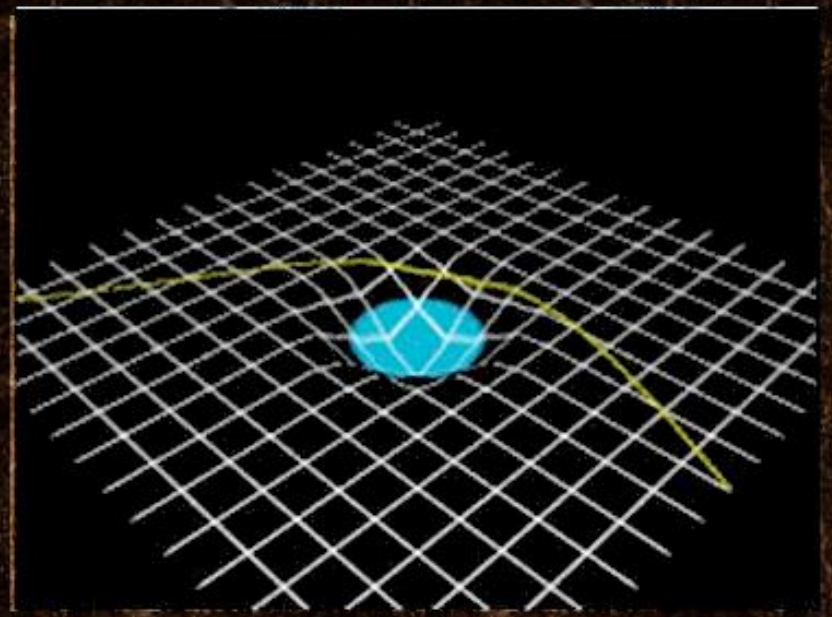
La maggior parte della massa nelle galassie non si vede

Alone di materia oscura





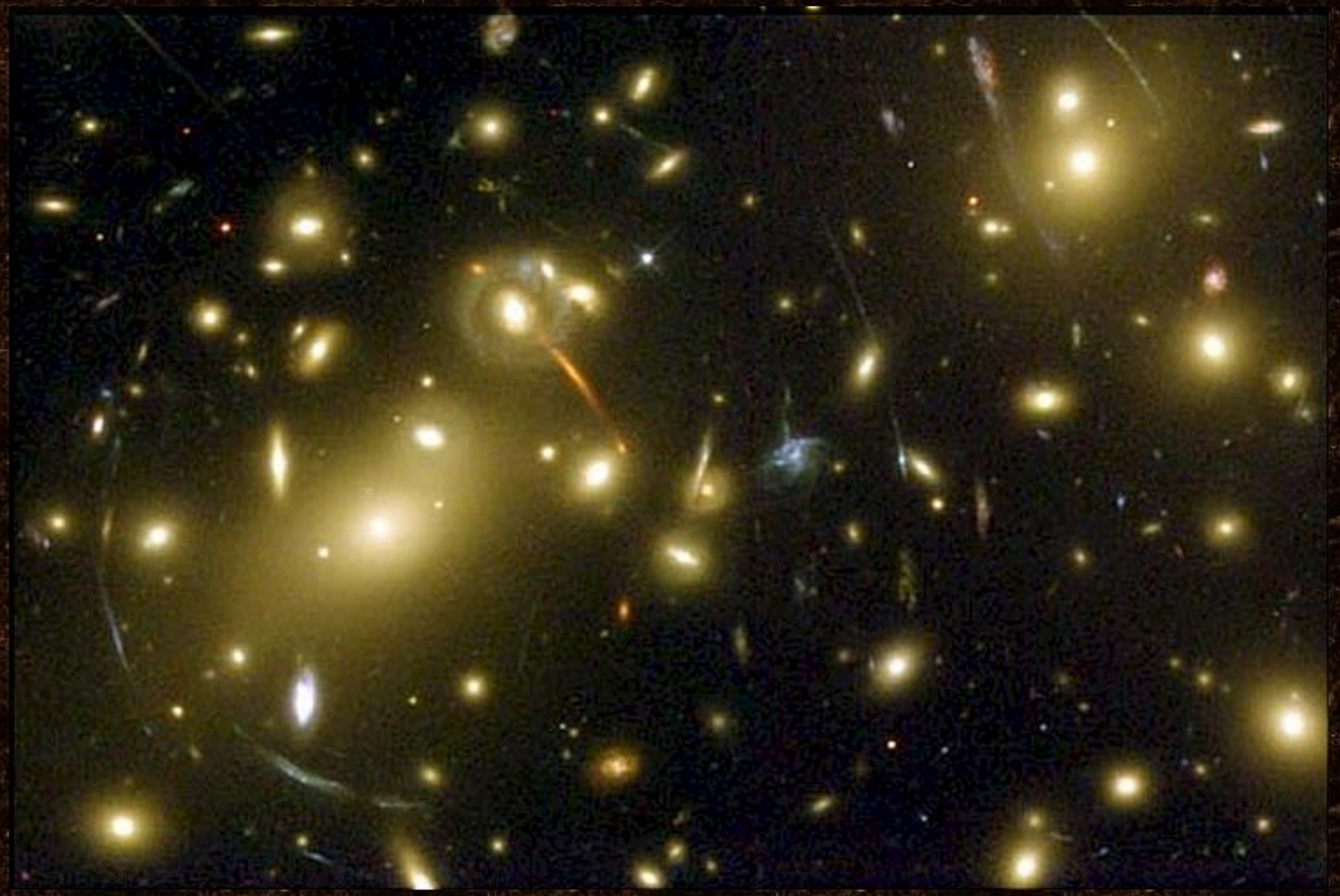
La geometria dello spazio (e del tempo) non e` un dato fisso, come per Newton, ma dipende dalla materia in esso contenuta



Le traiettorie dei corpi celesti seguono le linee piu` brevi (geodetiche).

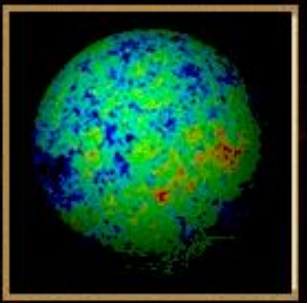
Vicino a una massa lo spazio è curvo e la linea più breve non è la linea retta!

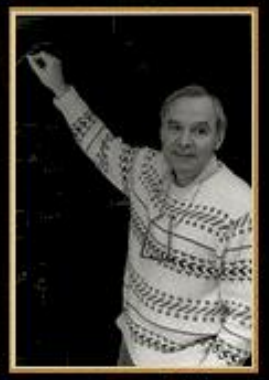
Il Lensing Gravitazionale



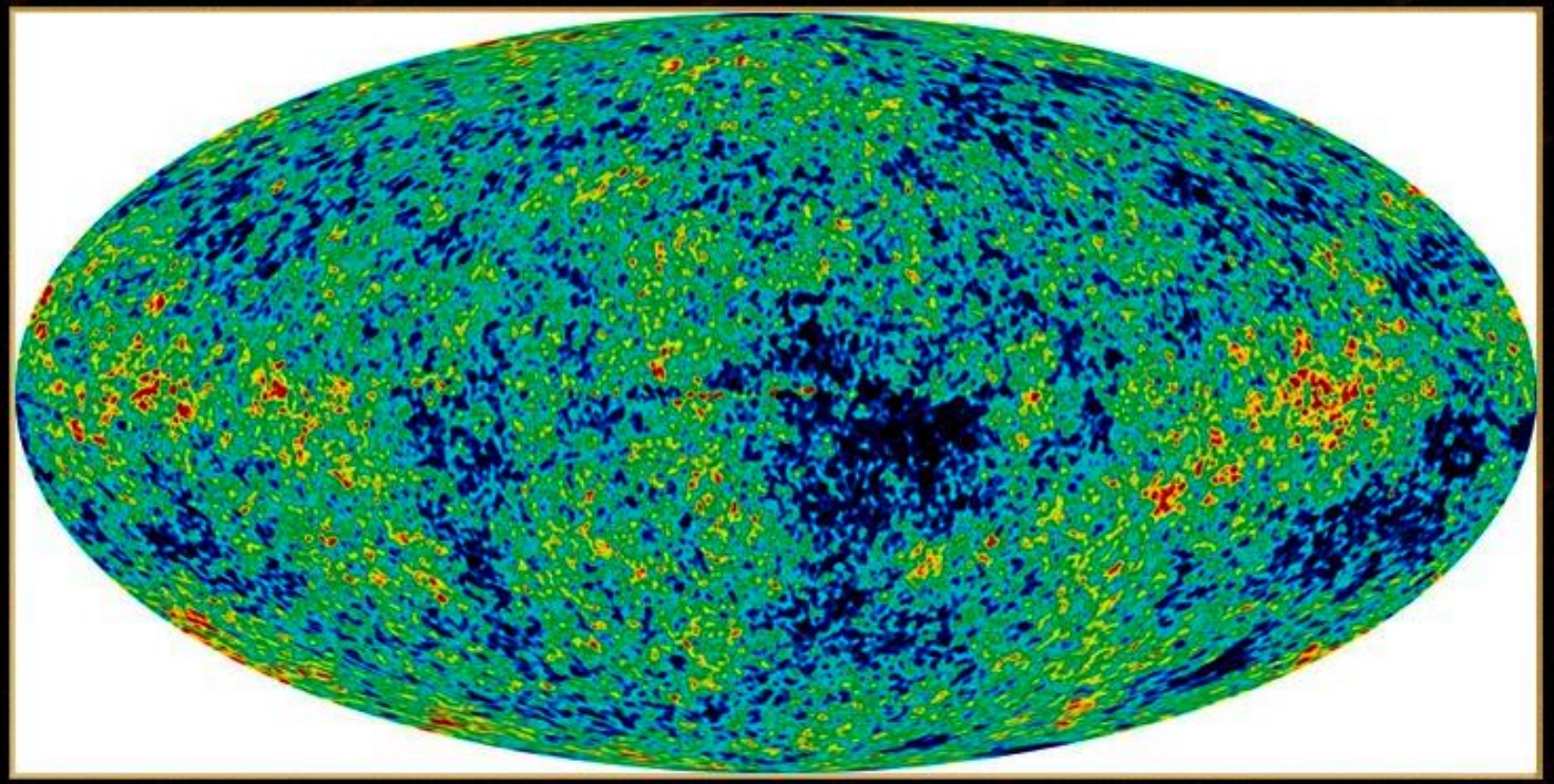
Abell 2218: A Galaxy Cluster Lens, Andrew Fruchter et al. (HST)

Il cielo a microonde nei dati del satellite WMAP (2003)

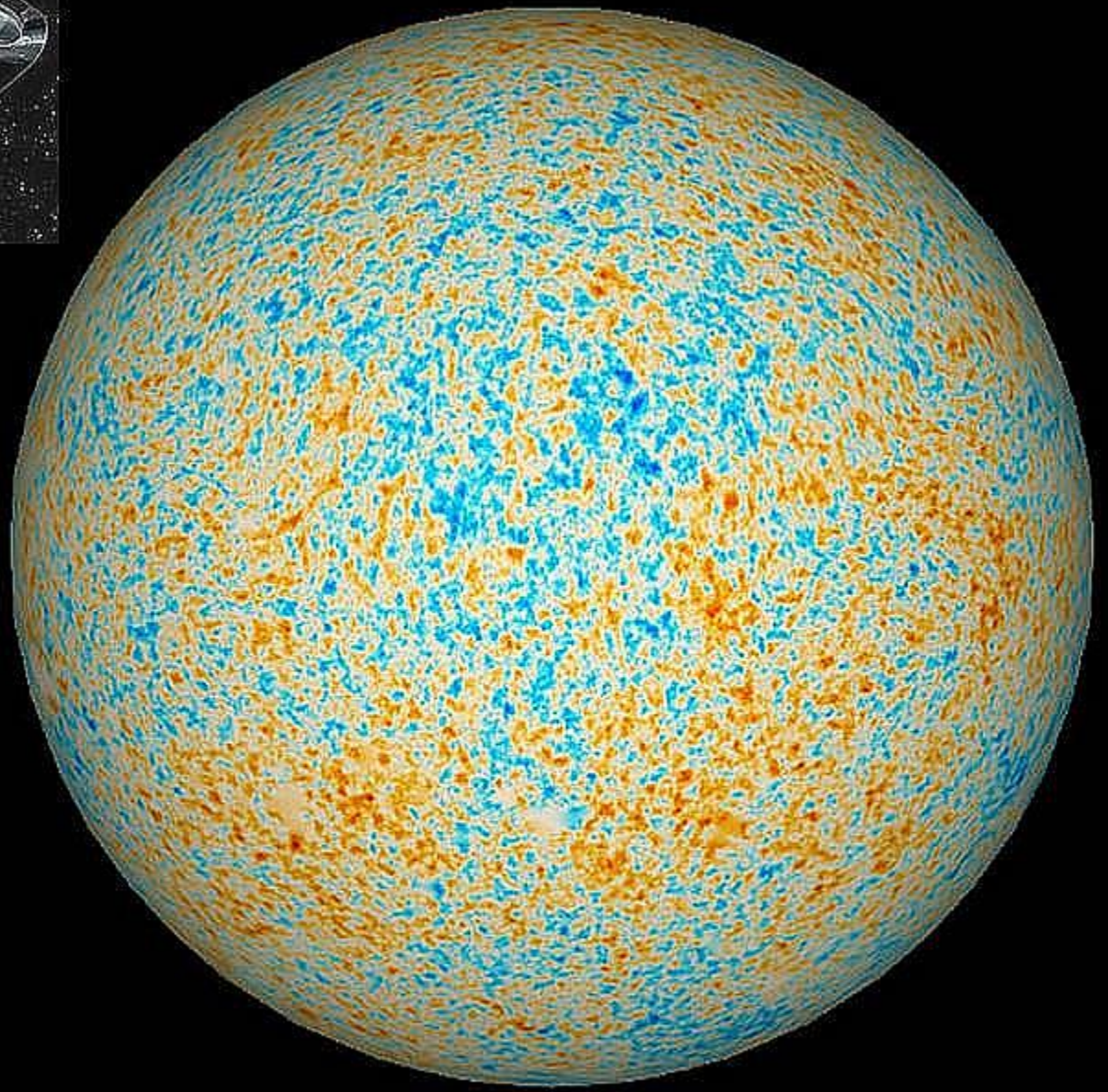




David Wilkinson



Plank
2018

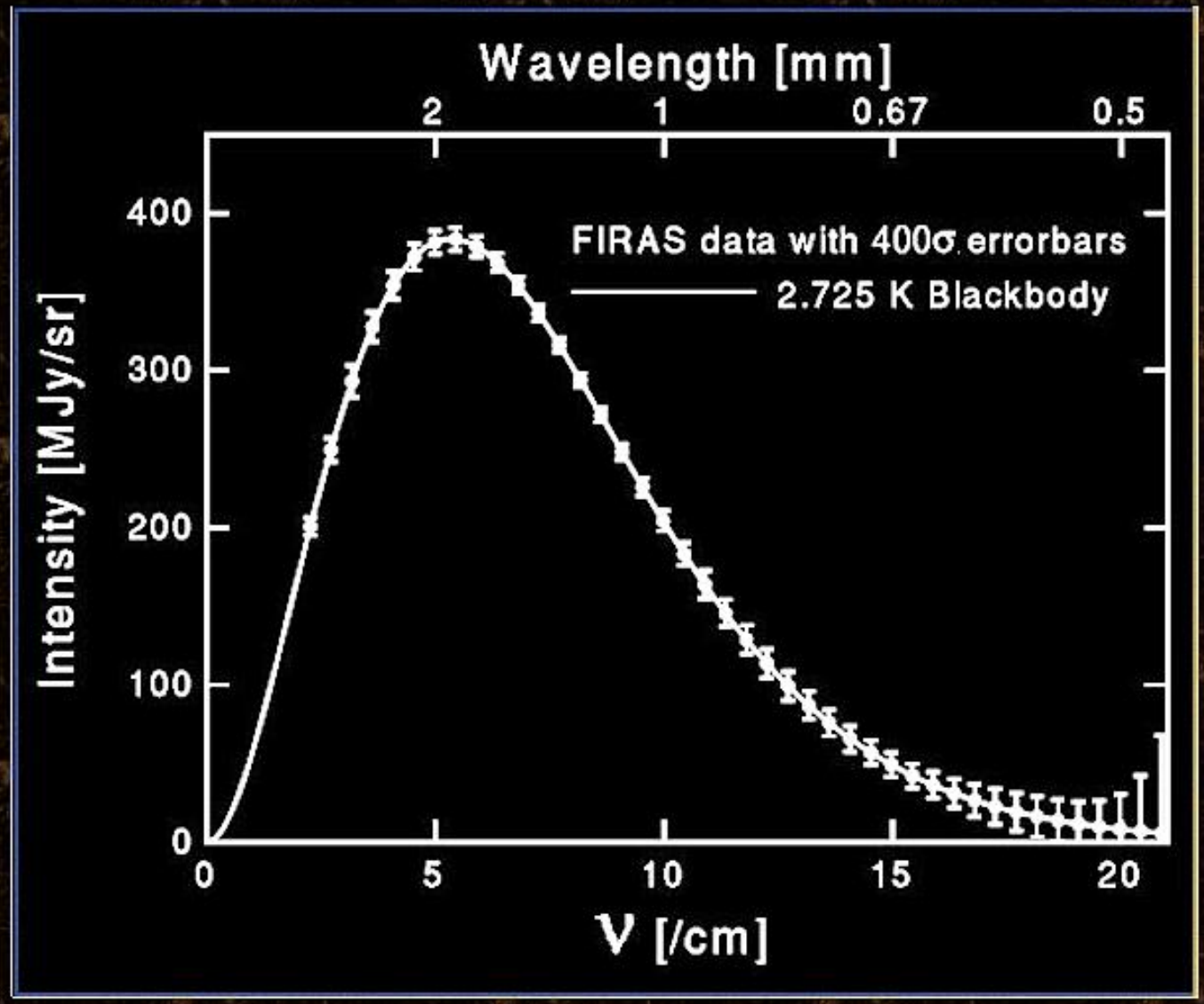


CMB flux (Cosmic Microwaves Background)
anisotropia termica

Il CMB come perfetto blackbody

La radiazione di fondo cosmica alle microonde (CMB) e' un corpo nero quasi perfetto ad una temperatura media di

$T = 2.726 \pm 0.010\ K$



WMAP: dati sull'anisotropia in temperatura

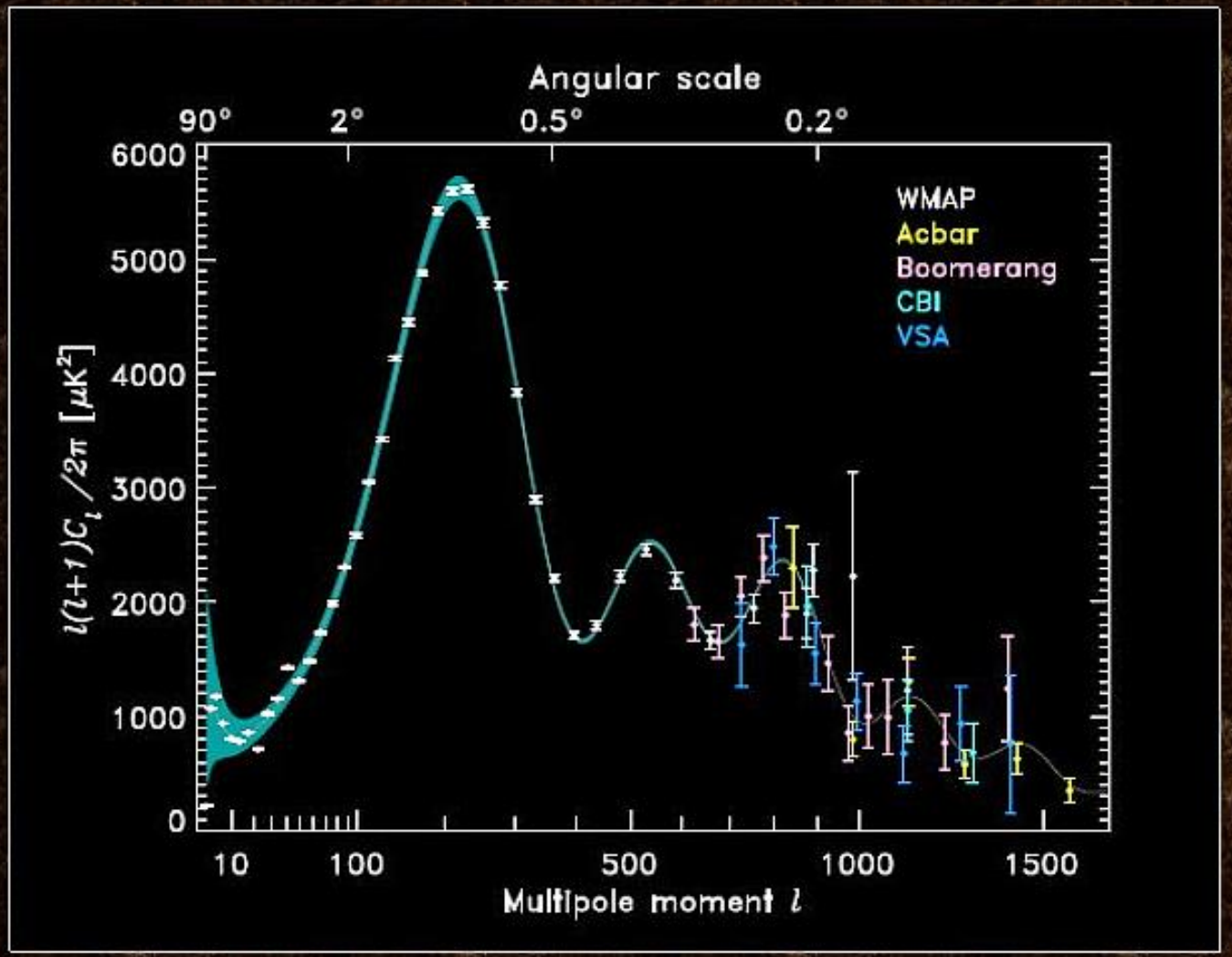
Temperature fluctuations in the sky can be expanded in spherical harmonics

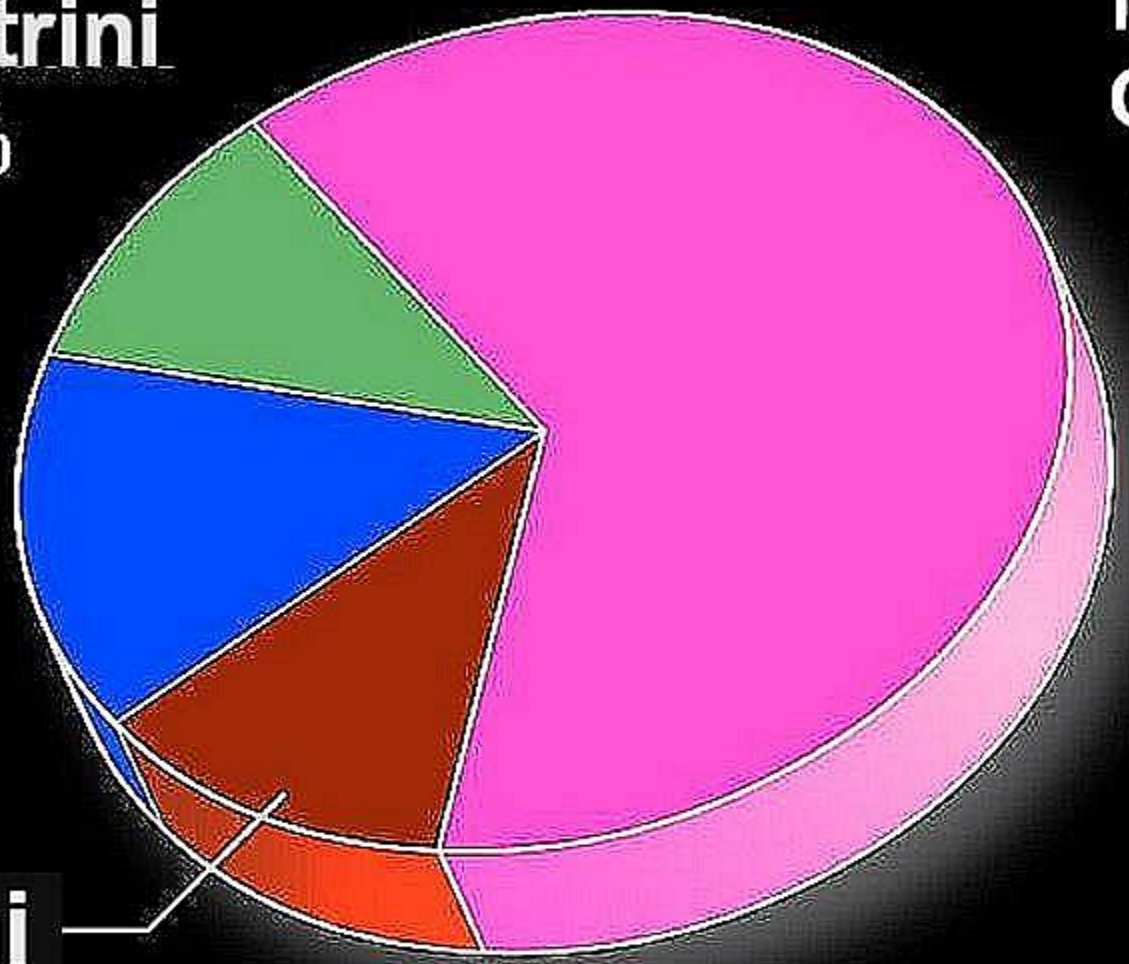
$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell,m} a_\ell^m Y_\ell^m(\theta,\phi),$$

Angular power-spectrum

$$C_\ell = \langle |a_\ell^m|^2 \rangle.$$

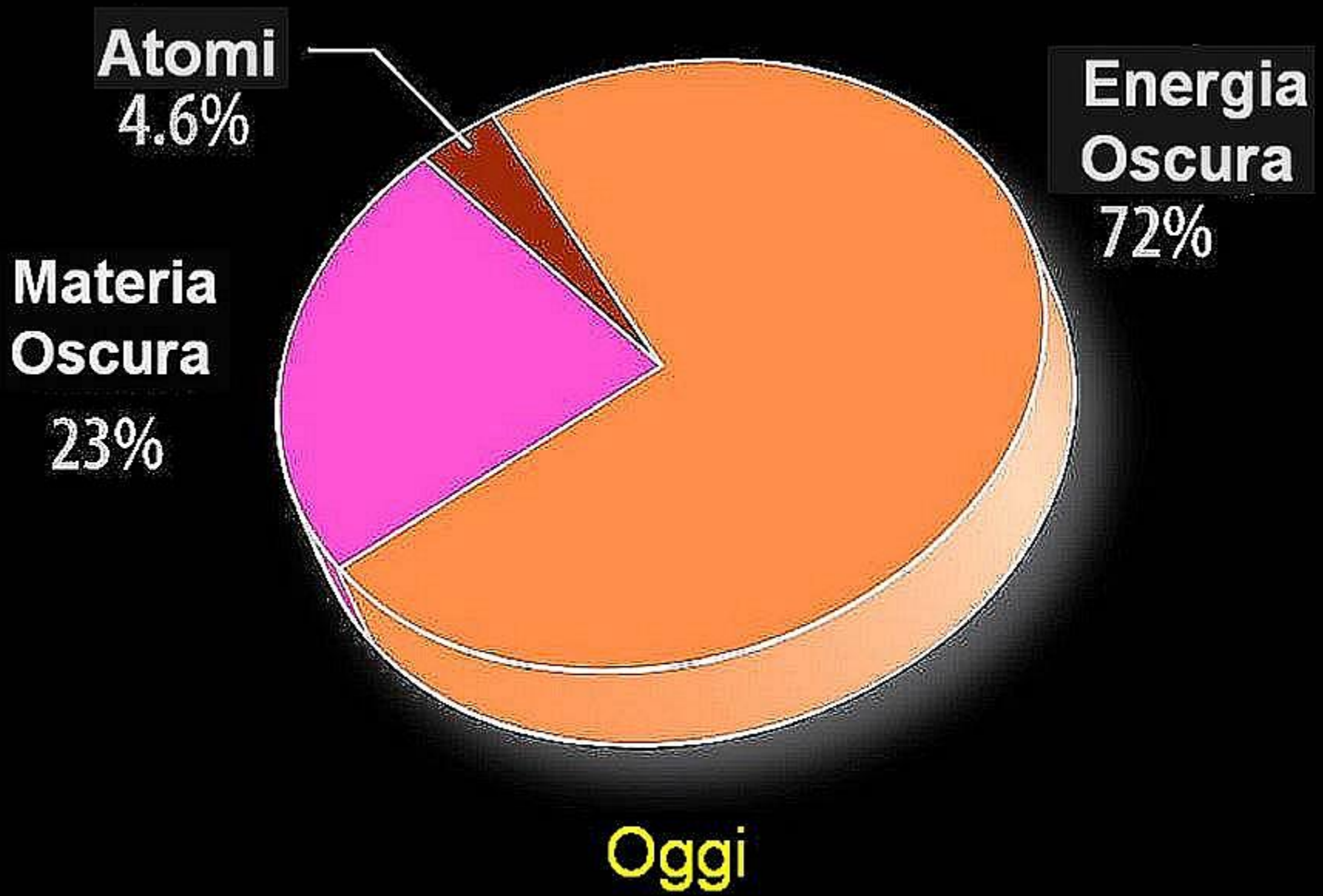
of WMAP temperature anisotropies





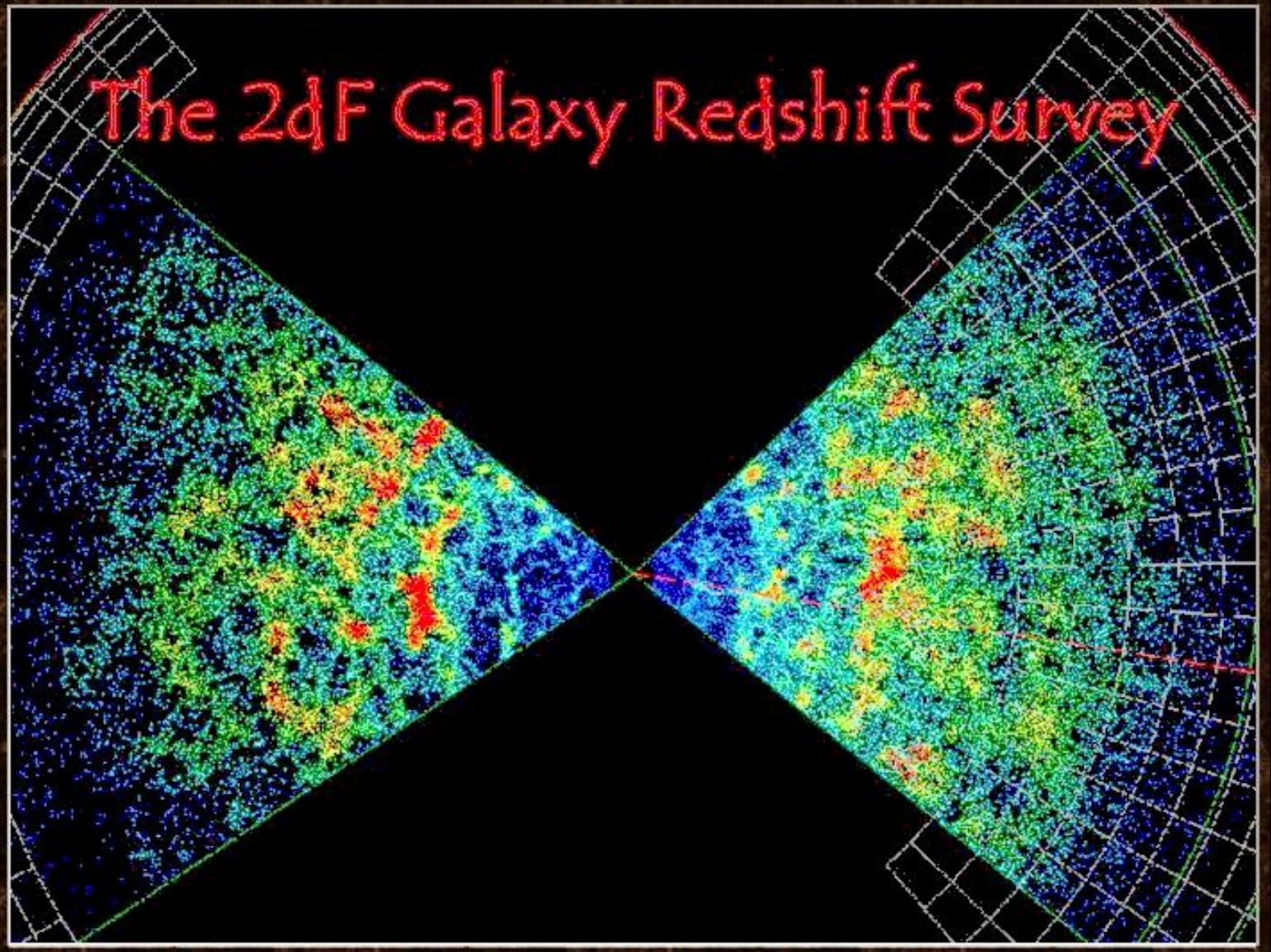
13,7 Miliardi di anni fa

(età dell'Universo: 380.000 anni)


Atomi
4.6%
Materia
Oscura
23%
Energia
Oscura
72%
Oggi

Il survey di galassie 2dF

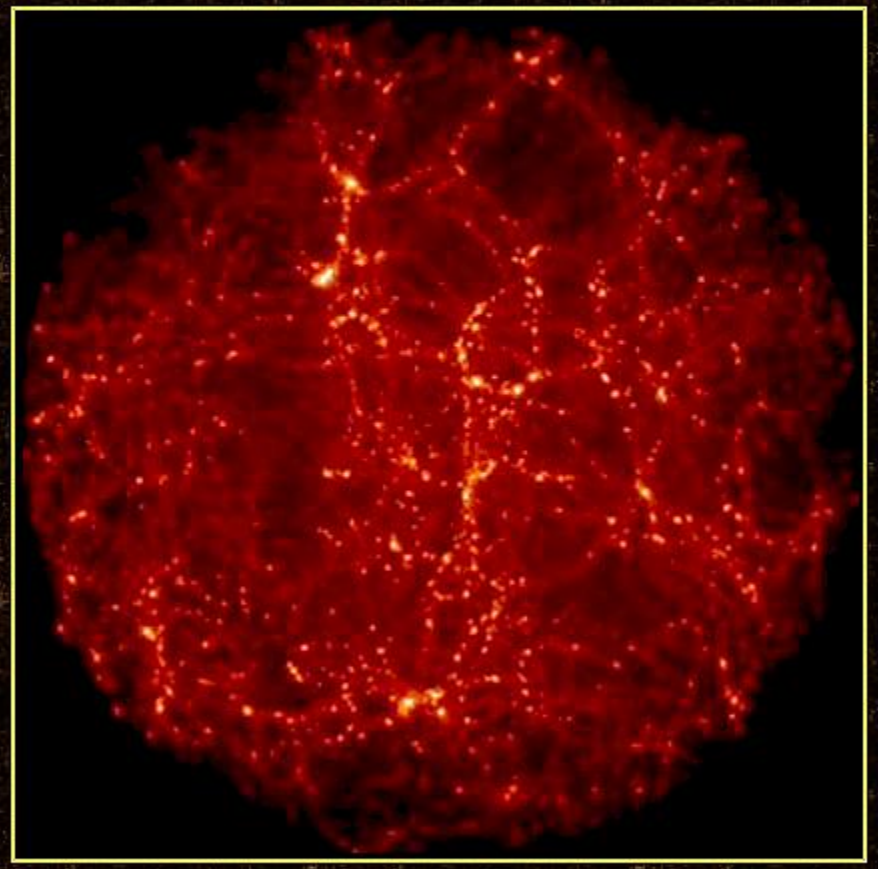
Il 2dFGRS contiene ~250,000 galassie con redshifts misurati



The Anglo-Australian Telescope

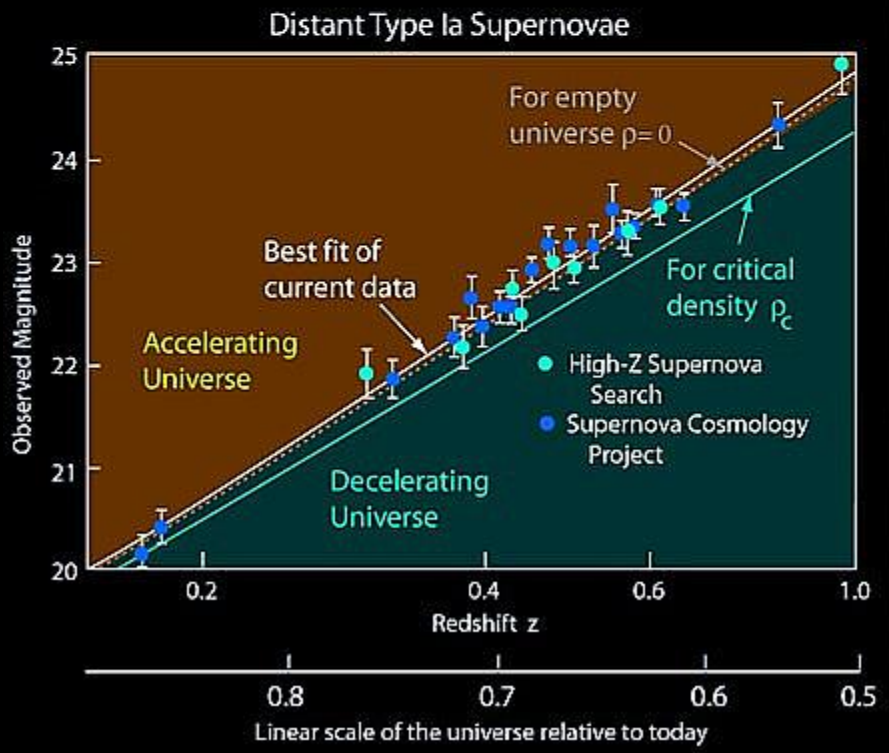
La distribuzione della Materia Oscura

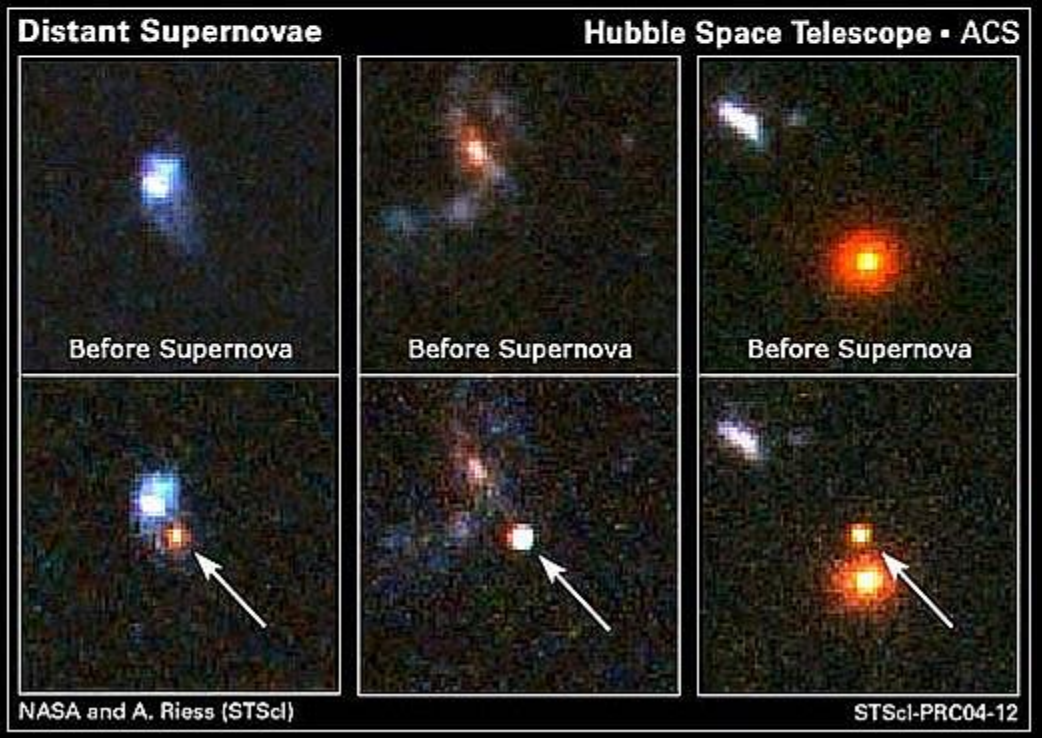
La materia oscura forma la struttura dell'Universo su grande scala, mentre la materia "ordinaria", luminosa, viene gravitazionalmente attratta da questa.



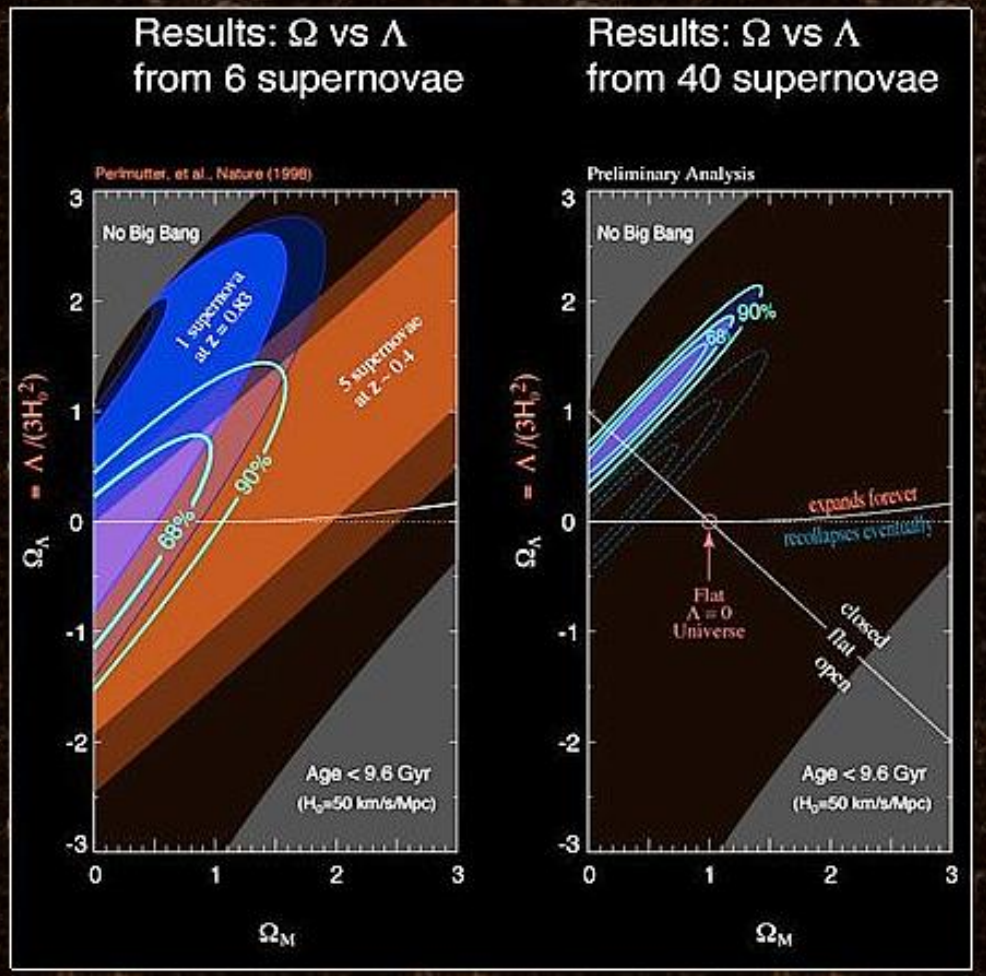
N-body Simulation by the VIRGO Consortium

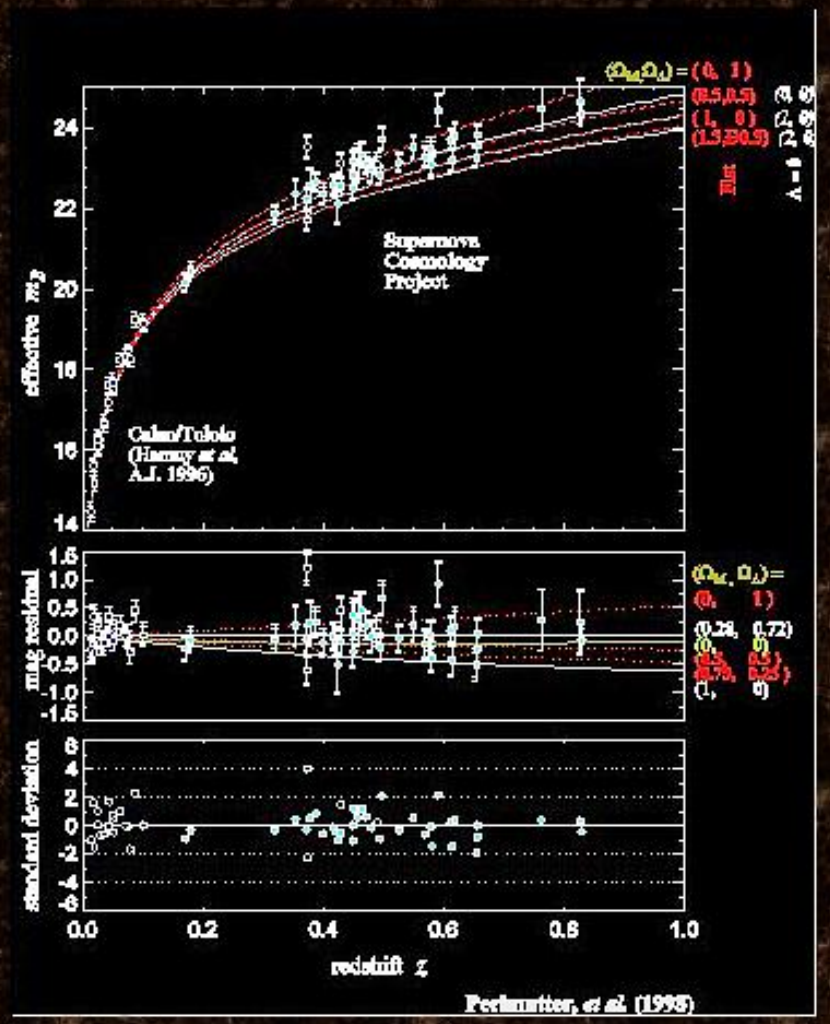
LA SCOPERTA DELL'
"ENERGIA OSCURA"
DERIVA DALLO STUDIO
DEL REDSHIFT
DELLE SUPERNOVAE Ia MOLTO
DISTANTI





Evidenza di energia oscura dalle Supernovae piu' distanti





L'Universo accelera!

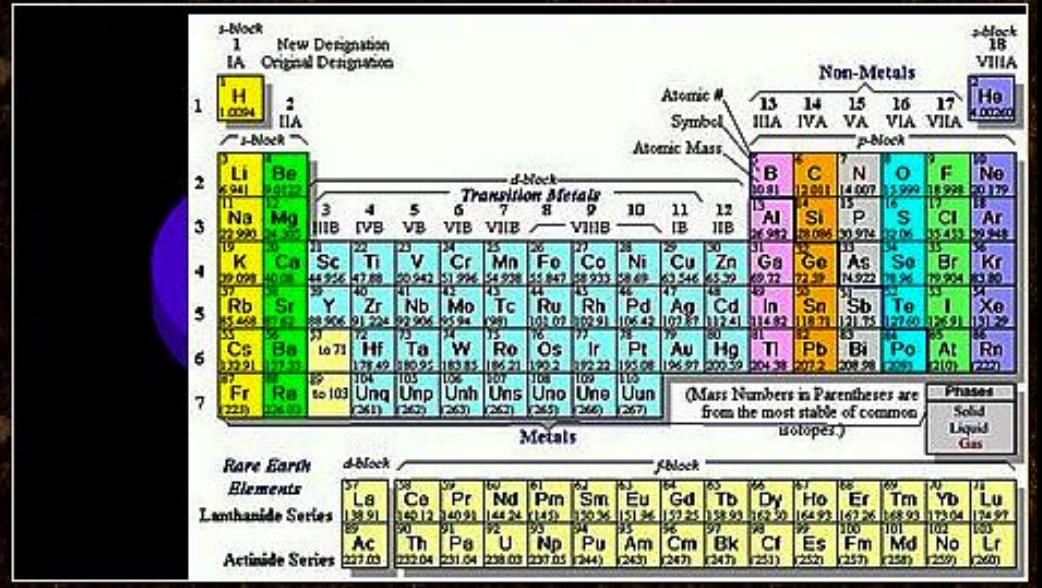
$$d_L = \frac{c}{H_0}\left[z + \frac{1}{2}(1 - q_0)z^2 + ... \right]$$

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}_0 a_0}{\dot{a}_0^{\,2}} = \frac{\Omega_0}{2} + \frac{3}{2}\sum_i w_i \Omega_i < 0, \quad w_i = \frac{P_i}{\rho_i}$$

L'accelerazione sembra richiedere l'esistenza di un fluido con pressione isotropa negativa:

ENERGIA OSCURA

Il "budget" cosmico

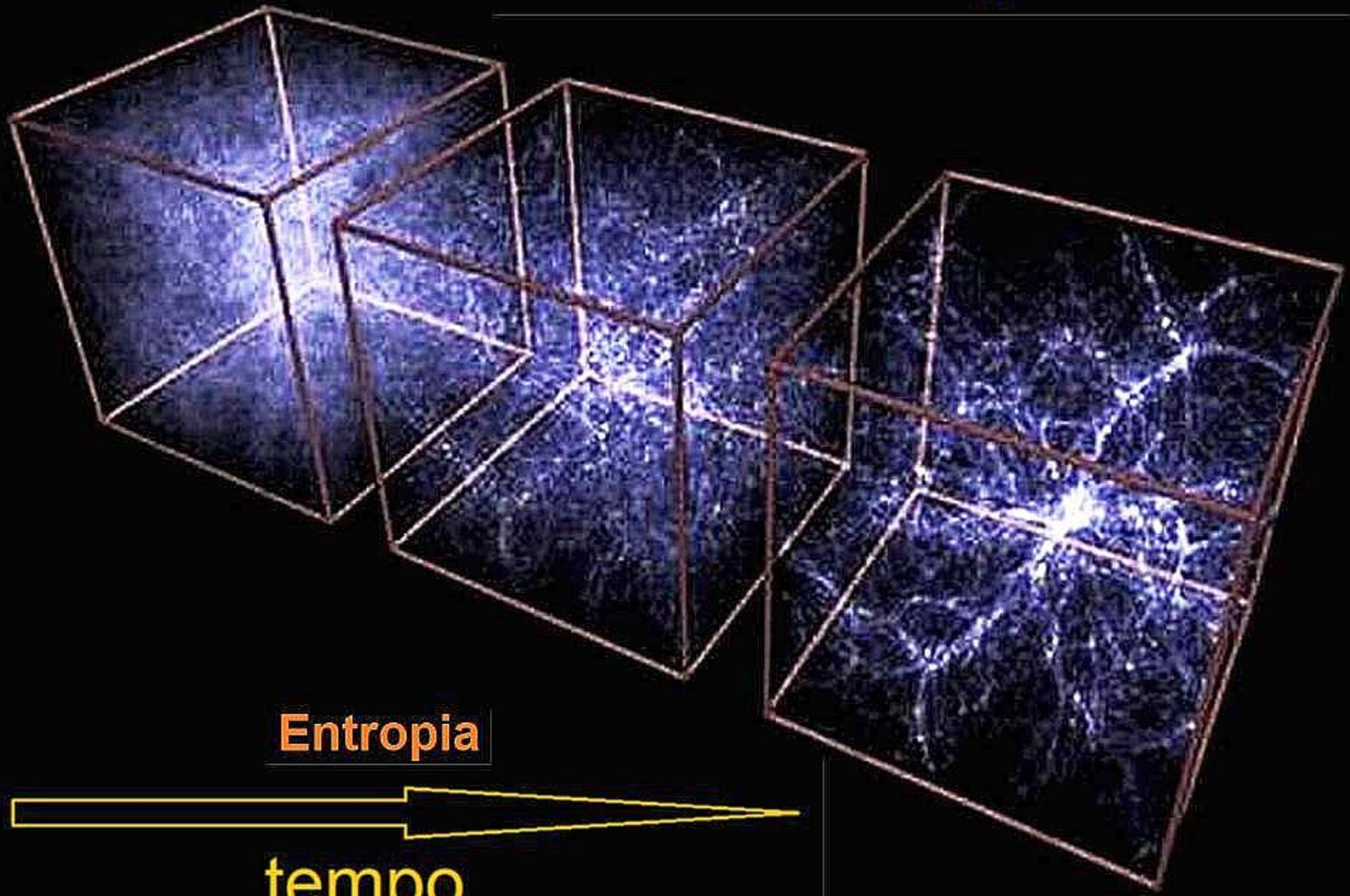


- *Solo circa il 4% del budget cosmico e' sotto forma di materia ordinaria ("barioni"), della quale solo una piccola frazione brilla nelle galassie (molto probabilmente la maggior parte della materia ordinaria e' localizzata in "filamenti" di gas ad alta temperatura nel mezzo intergalattico).*

- *Circa il 23% del budget cosmico e' fatto di Materia Oscura, una componente della quale percepiamo la presenza solo gravitazionalmente.*

- *Circa il 73% del contenuto energetico del nostro Universo e' sotto forma di una componente "esotica", chiamata Energia Oscura, o "Quintessenza" (quando e' causata dall'energia di un opportuno campo scalare), che causa una forma di repulsione cosmica su grande scala tra gli oggetti celesti, mimando una sorta di effetto di anti-gravita'.*

Effetti dell'Energia Oscura



Di cos'e` fatta
l'energia oscura?

Energia oscura ed energia del vuoto

L'accelerazione sembra richiedere l'esistenza di un fluido capace di sviluppare una forza repulsiva, una sorta di antigravita'. Tale forza repulsiva e' generata se l'universo e' permeato da un fluido con pressione isotropa negativa, detto

Energia Oscura.

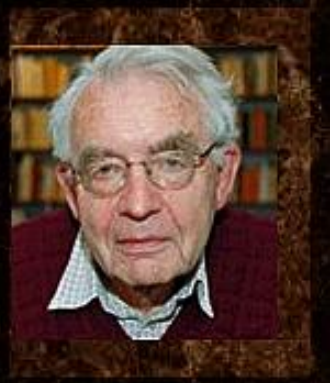
Per ottenere un sistema con pressione negativa e' necessario ricorrere alle proprieta' dell'energia del vuoto nella Teoria Quantistica dei Campi.

Un esempio e' dato dall'effetto Casimir in elettrodinamica quantistica.

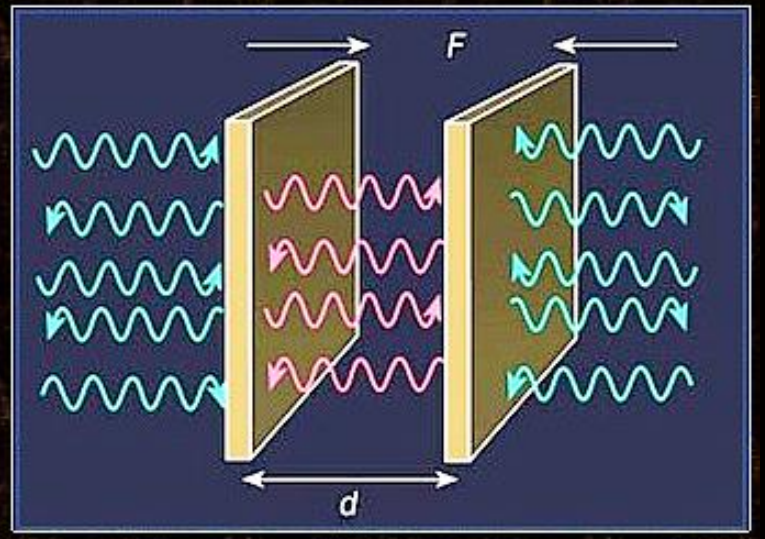
$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right)a$$

$$\ddot{a} > 0 \Leftrightarrow p < -\frac{1}{3}\rho c^2$$

L'effetto Casimir



Nel 1948 il fisico olandese Hendrick Casimir propose un test sull'esistenza dell'energia del vuoto, che, nella teoria quantistica dei campi, prende la forma di particelle (dette "virtuali") che costantemente si formano e scompaiono su scala microscopica. Normalmente, il vuoto e' riempito di tali particelle su tutte le lunghezzze d'onda. Egli argui' che, se due sottili piastre metalliche scariche e parallele vengono piazzate a piccola distanza reciproca le lunghezze d'onda piu' grandi vengono escluse tra le piastre. Le particelle al di fuori delle piastre con le lunghezze d'onda escluse all'interno tendono a spingere le piastre l'una contro l'altra: tanto piu' vicine sono le piastre, tanto piu' forte e' l'attrazione. Lamoureuex (1996) misuro' l'effetto Casimir trovando buon accordo con la teoria. La prima misura con piastre parallela e' stata effettuata da Bressi et al. (2002).

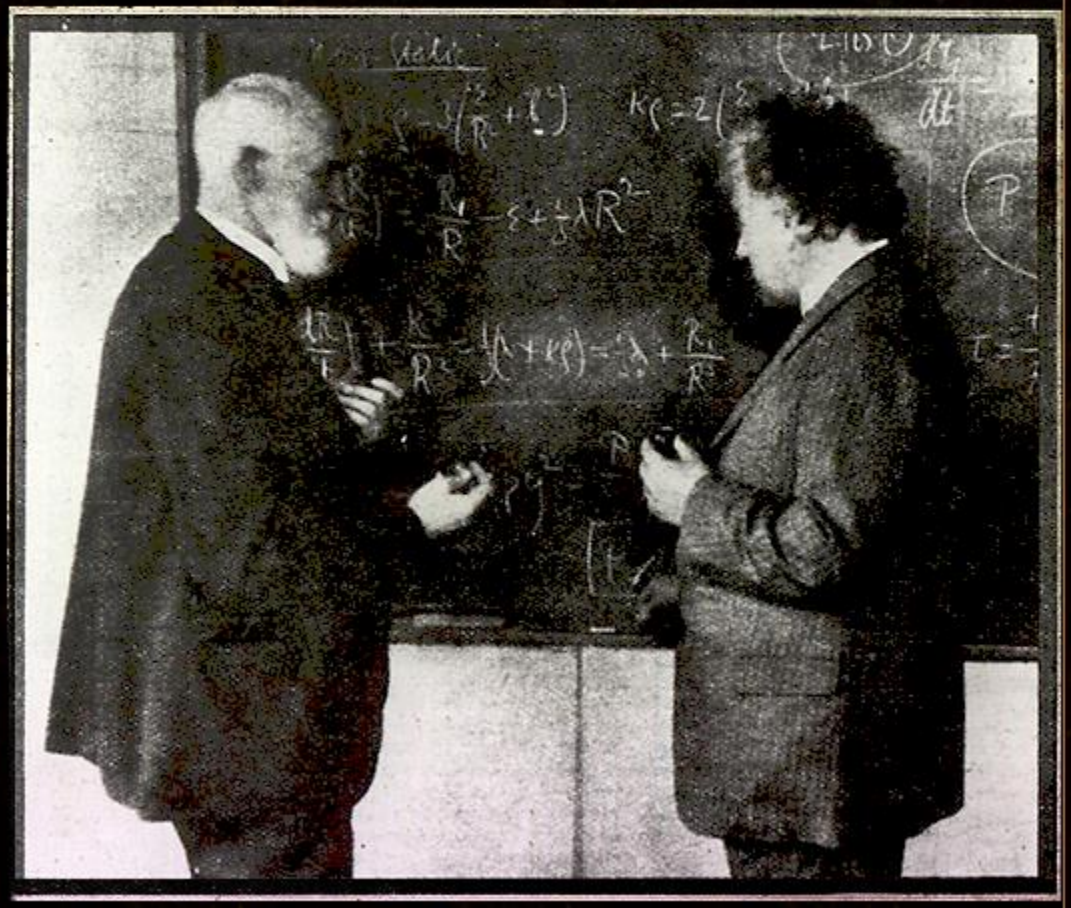


Forza di Casimir

$F \sim A / d^4$

(**A** = area delle piastre,
d = distanza reciproca)

L'errore di Einstein



1917: Einstein propone di introdurre una Costante Cosmologica per ottenere una soluzione statica delle sue equazioni: la gravita' e' attrattiva, la materia tende a far decelerare l'Universo; Λ spinge gli oggetti ad allontanarsi reciprocamente rendendo cosi' possibile una soluzione statica se l due effetti si bilanciano esattamente

Giugno1922: Friedmann dimostra che la soluzione statica di Einstein e' instabile

Settembre 1922: Einstein pubblica una nota: "ho dei sospetti", "le soluzioni non appaioni compatibili"

Maggio 1923: Einstein torna sui suoi passi: "La mia obiezione si basava su un errore di calcolo."

1929: Edwin Hubble scopre l'espansione dell'Universo

1934: Einstein confessa a Gamow che l'introduzione della Costante Cosmologica nelle sue equazioni era stato il piu' grosso errore della sua vita"

1998: L'Osservazione di Supernovae di tipo Ia (+ dati su CMB e LSS) fanno risorgere la Costante Cosmologica per spiegare l'espansione accelerata dell'Universo

La Costante Cosmologica

geometria

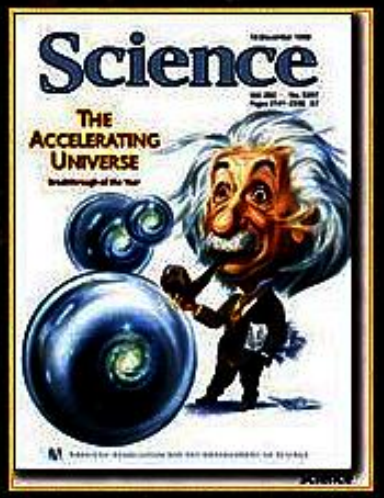
materia

$$G_{\lambda\mu} + \Lambda g_{\lambda\mu} = 8\pi G T_{\lambda\mu}$$

Quanto grande e' Λ?

$$\rho_\Lambda \equiv \frac{\Lambda c^2}{8\pi G} \approx 0.7\rho_{0c} \approx 10^{-124} m_{\text{Planck}}^4$$

$$m_{\text{Planck}} \equiv G^{-1/2} \approx 10^{19}\,\text{GeV}$$



Albert Einstein

Problemi con la Costante Cosmologica

$\Lambda \neq 0$ e in accordo coi dati osservativi ha due problemi principali:

- ✓ fine-tuning (sintonizzazione fine): perche' Λ e' cosi' piccola?
- ✓ coincidenza cosmica: perche' differenti forme di energia (DE, DM, barioni) hanno oggi abbondanza confrontabile?

Modelli per l'Energia Oscura:

- ✓ *Costante Cosmologica?*
- ✓ *"Quintessenza"?*
- ✓ *Modifiche della legge di Gravitazione?*
- ✓ *"Backreaction" delle disomogeneita' locali?*

La fisica fa passi da gigante!

Conclusioni

Abbiamo convincente evidenza da molte osservazioni indipendenti che l'energia dell'Universo attuale sia dovuta per circa un quarto a materia prevalentemente oscura e di origine particellare, e per i restanti tre quarti da una misteriosa forma di energia oscura che ne causa l'espansione accelerata.

Prospettive future:

- ✓ *Rivelare la composizione della materia oscura*
- ✓ *Studiare le proprieta' e l'evoluzione dell'energia oscura attuale*
- ✓ *Comprenderne la natura!*