

# Introduzione alla Cosmologia

## Fisica

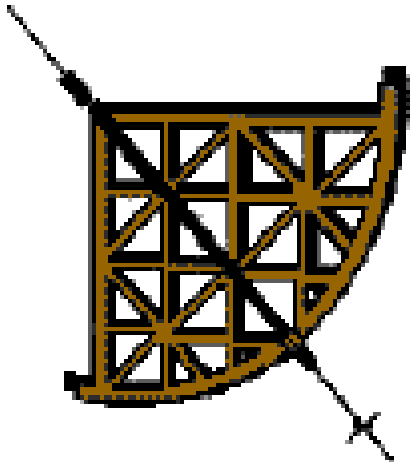
### Lezione 17

la radiazione diffusa a micro-onde, la scoperta del Big Bang, Penzias e Wilson

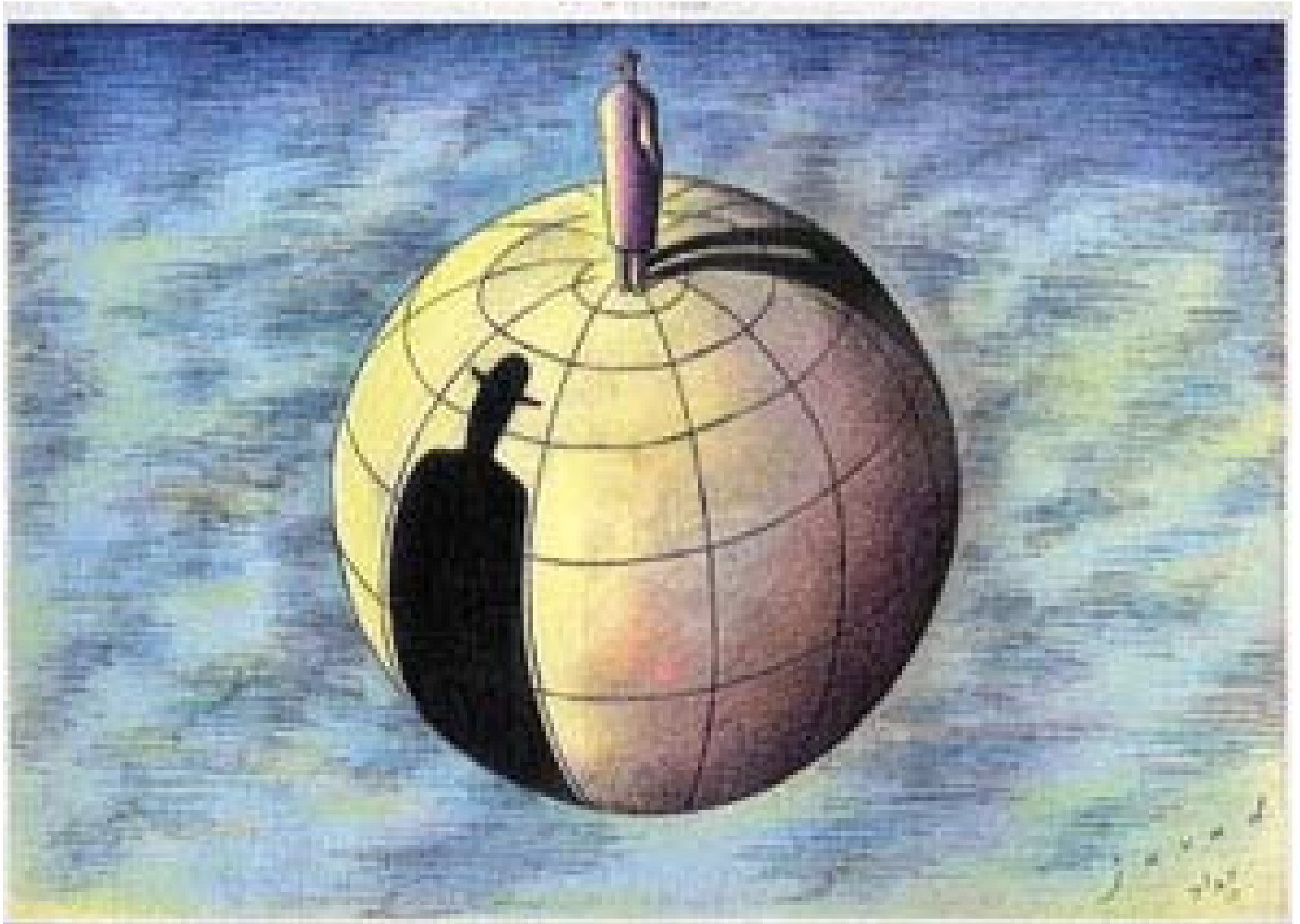
Giorgio G.C. Palumbo

Università degli Studi di Bologna

Dipartimento di Astronomia

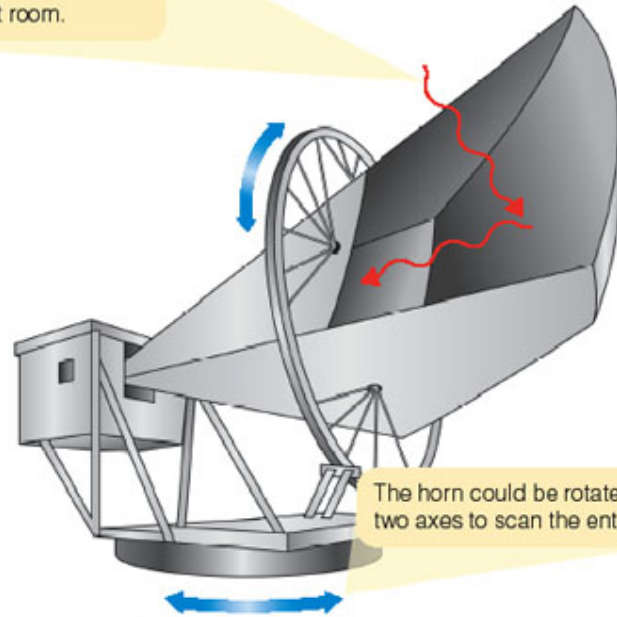
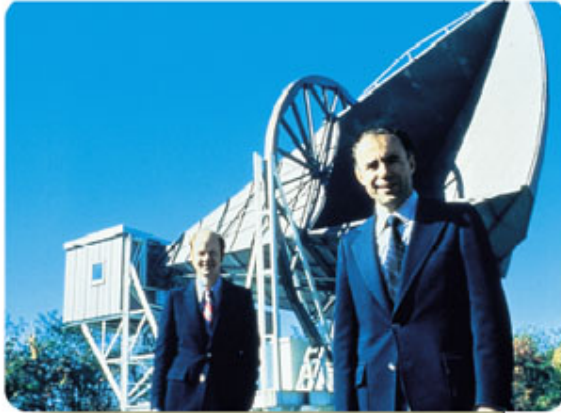


**In che UNIVERSO viviamo?**



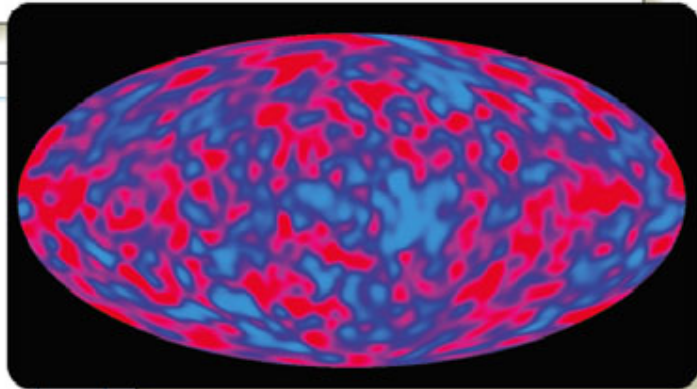
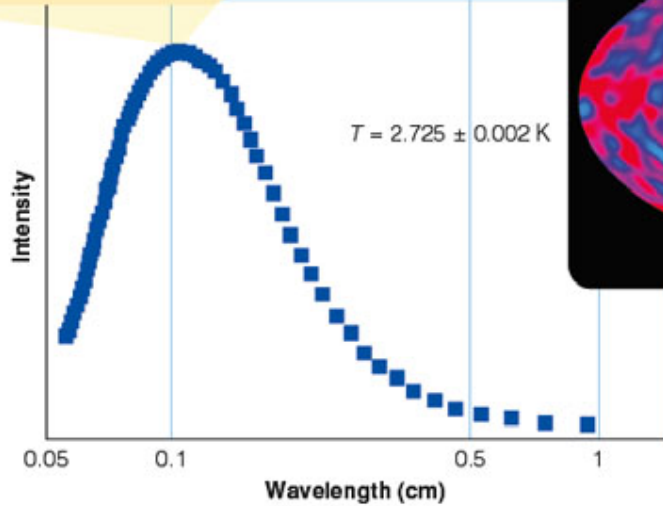
Microwave radiation from the sky enters the horn and is focused into the instrument room.

In 1965, Arno Penzias (right) and Robert Wilson first detected the background radiation with an unused horn antenna.



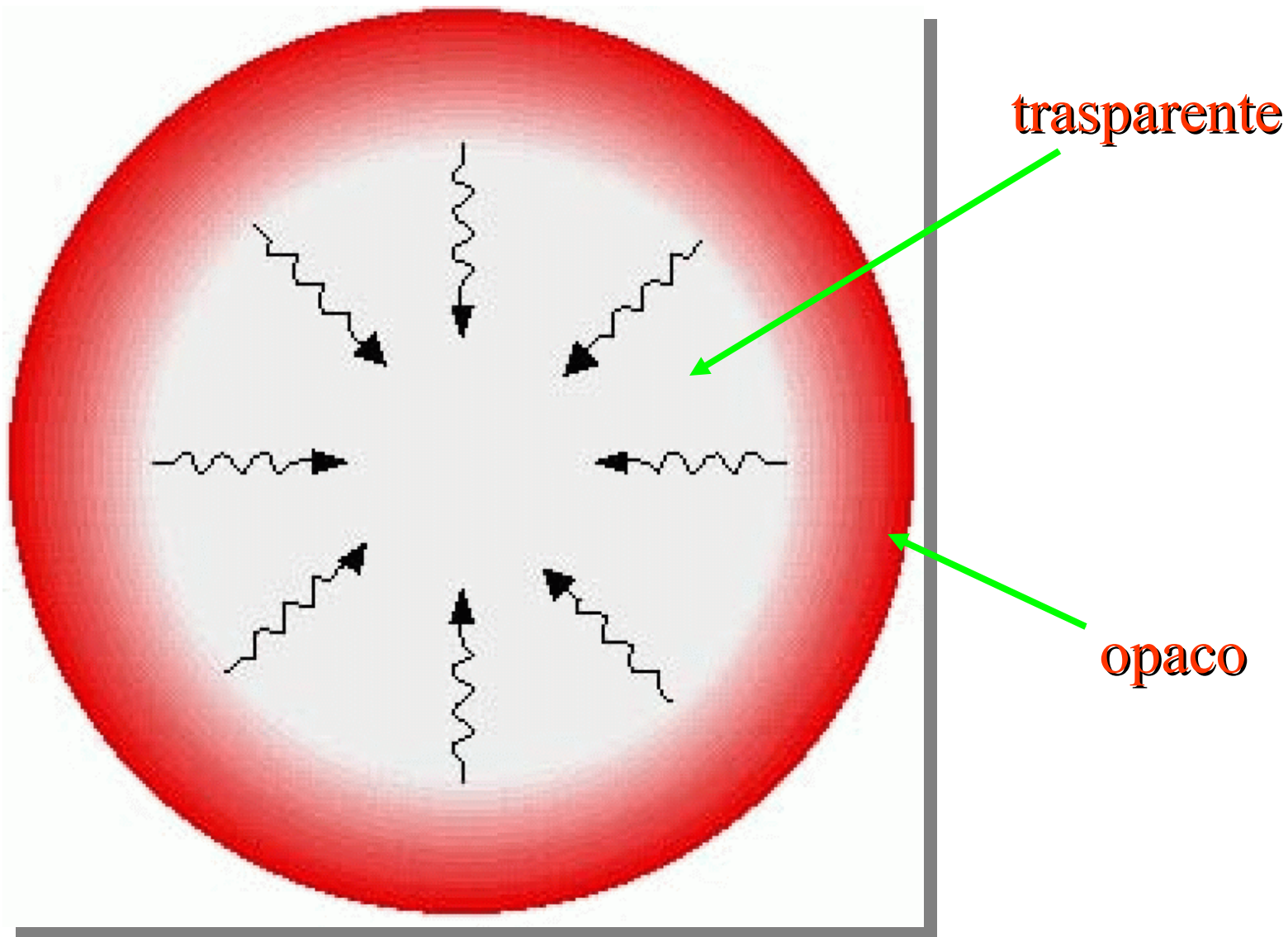
The horn could be rotated about two axes to scan the entire sky.

Launched in 1989, the COBE satellite showed the background radiation followed the black body curve.

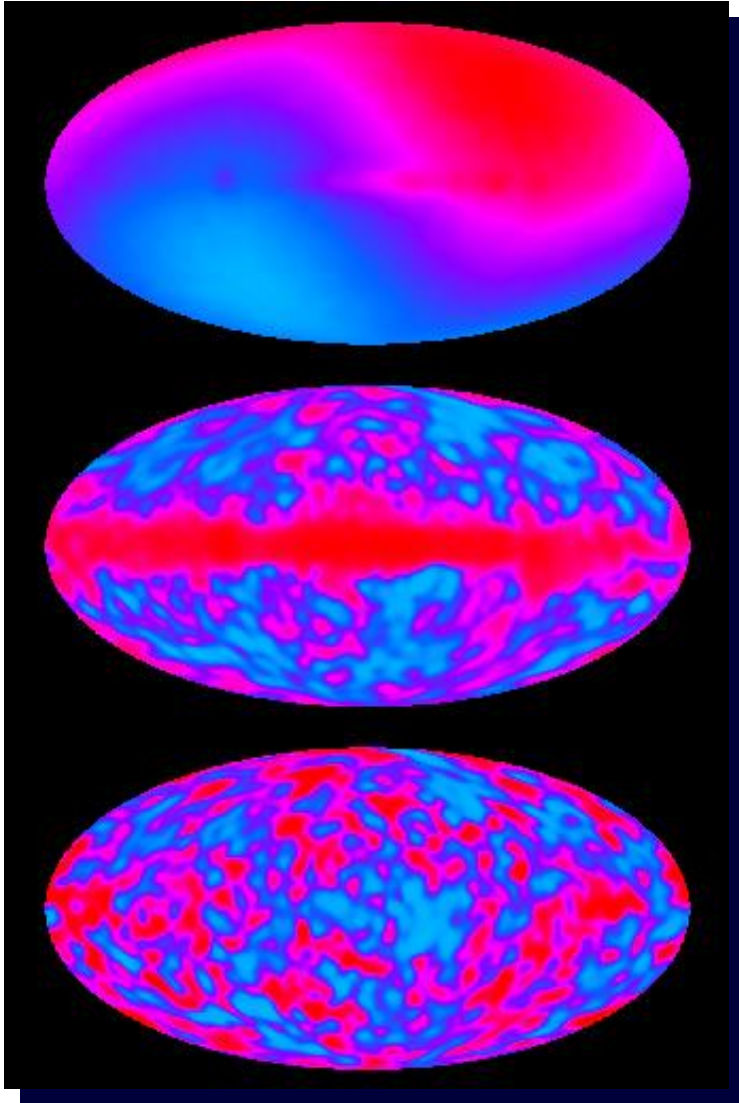


All-sky COBE map of tiny variations in the background radiation.

# Superficie di ultimo scattering



# Resultati da CMB

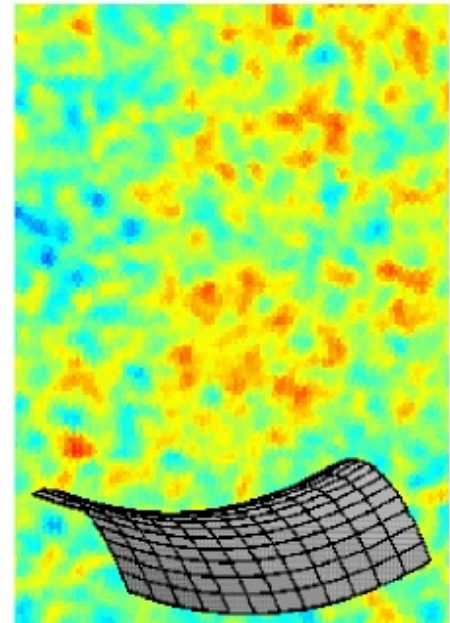
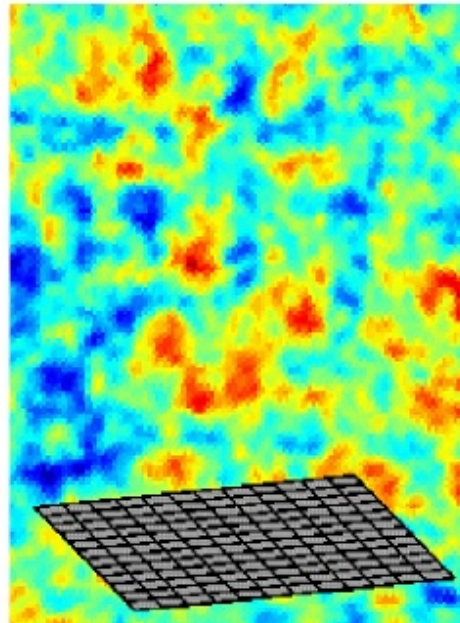
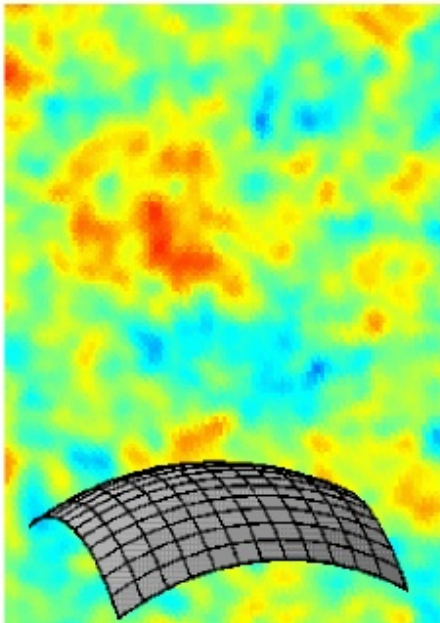
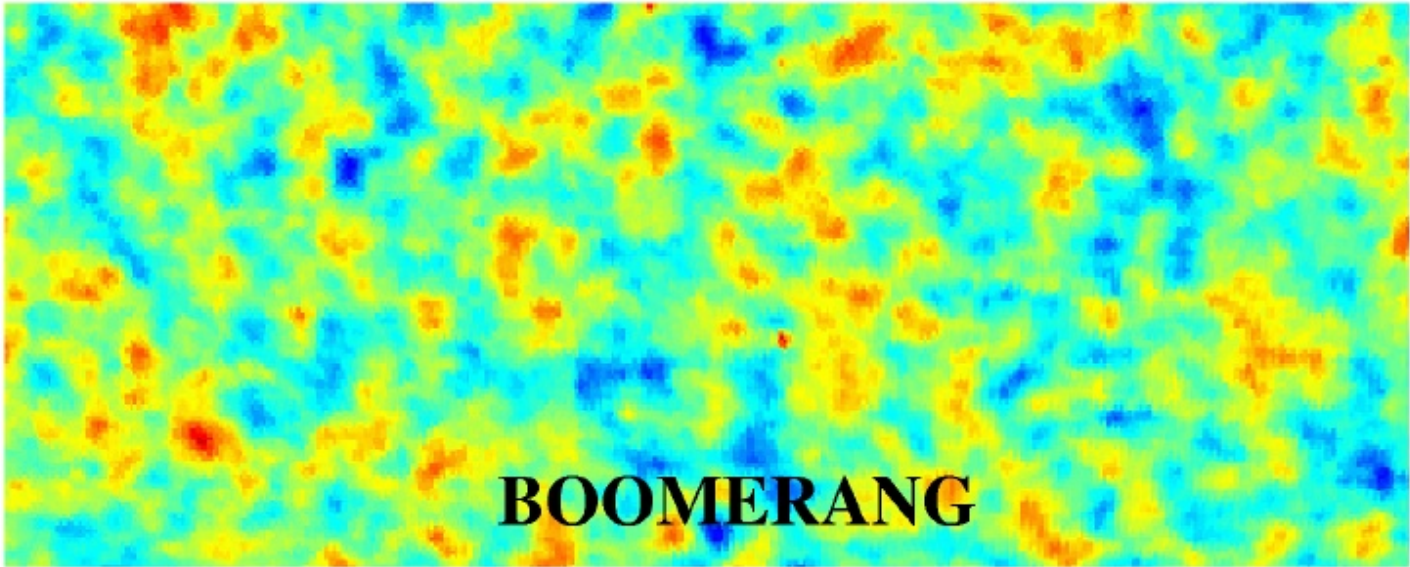


- **La Terra muove rispetto al CMB  $\Rightarrow$  Doppler shift**
- **Emissione dalla Galassia**
- **Fluttuazioni nel CMB**

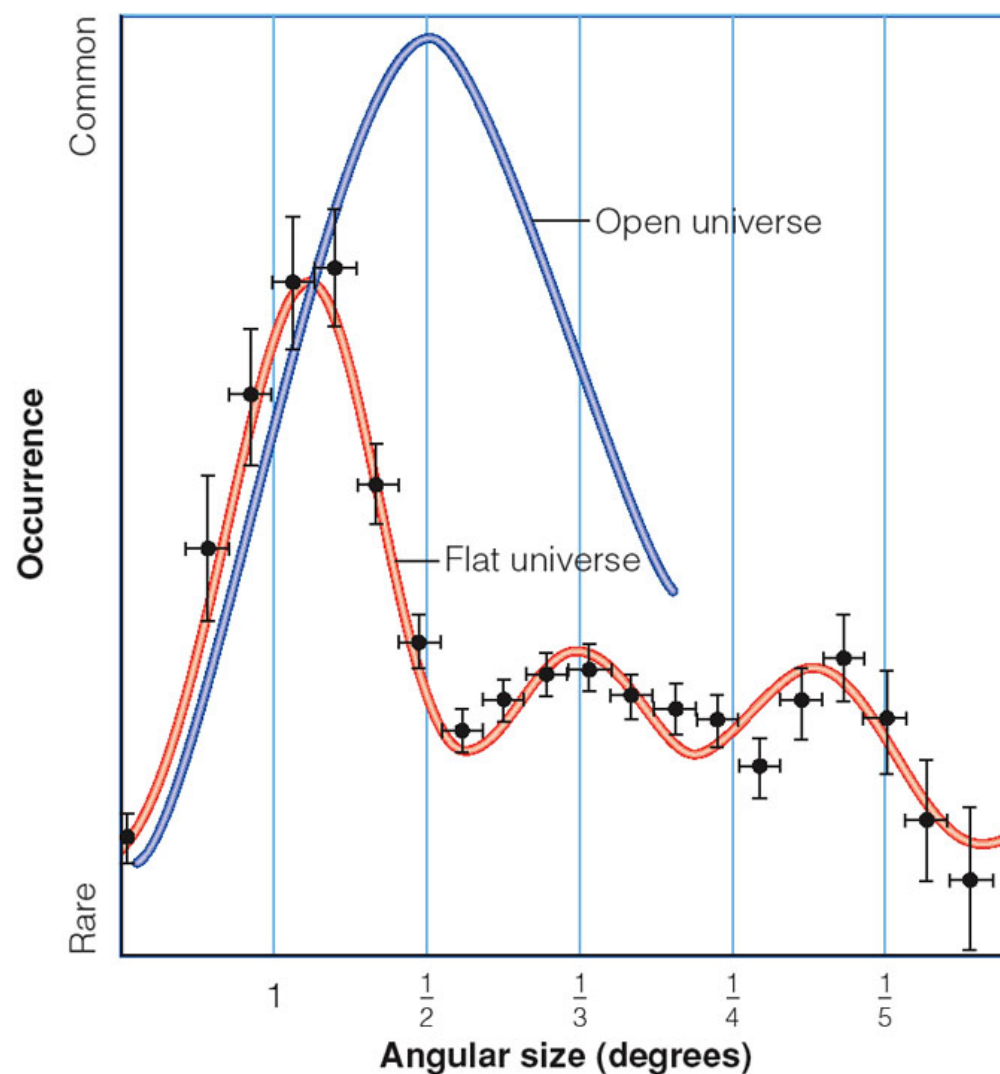
# **Il Modello del Big Bang è generalmente accettato**

- **Fino a metà degli anni '60: il modello del Big Bang è molto controverso, molti i modelli alternativi**
- **Dopo la scoperta del CMB: pochi dubbi sulla validità del modello Big Bang**
- **Le quattro colonne su cui si basa la teoria del Big Bang:**
  - **La legge di Hubble ✓**
    - **La radiazione CMB ✓**
    - **L'origine degli elementi ✓**
    - **Struttura e formazione dell'Universo ✓**

$25^\circ$



# L'Universo è piatto!



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Se è piatto ha il 100% della densità critica!  
Se è così la materia dovrebbe fornire tutta la densità

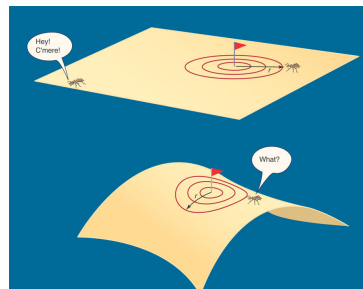
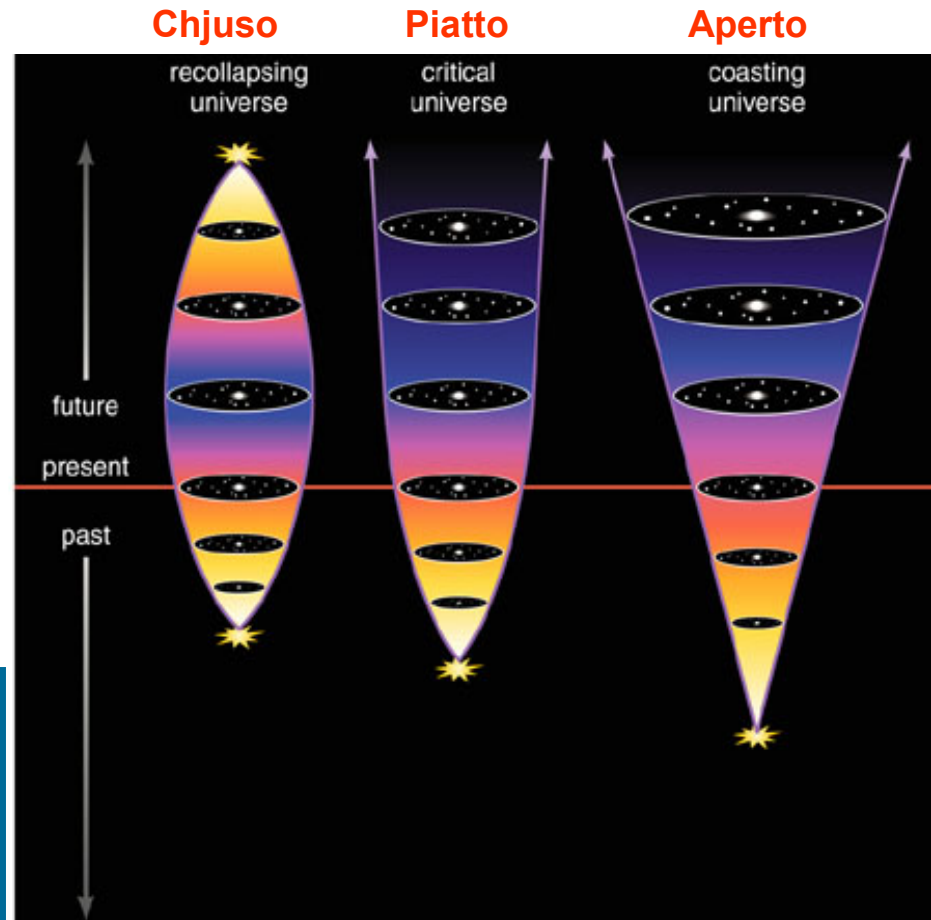
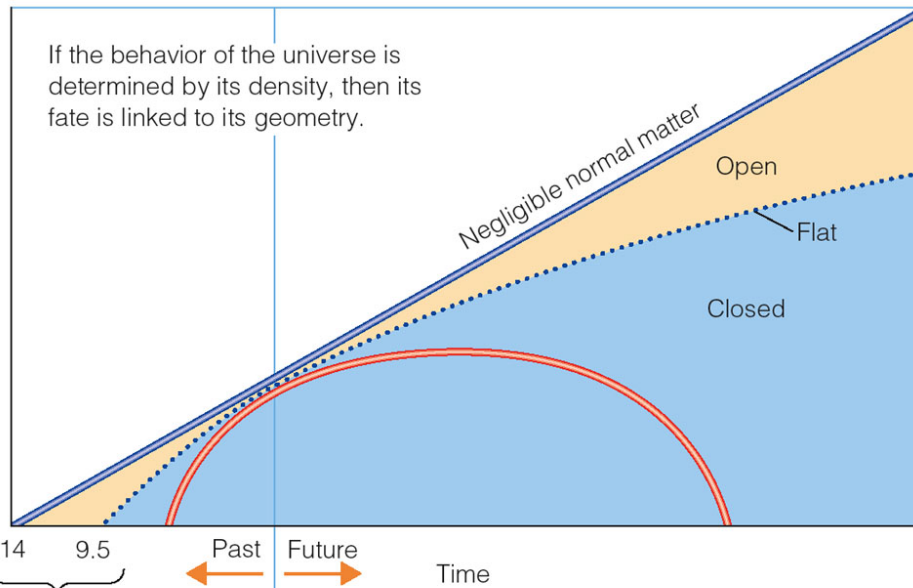
### 3 possibili futuri per l'Universo:

**Aperto**----- densità < “critica”; espande per sempre

**Piatto**----- densità = “critica”; espande, rallentando per sempre

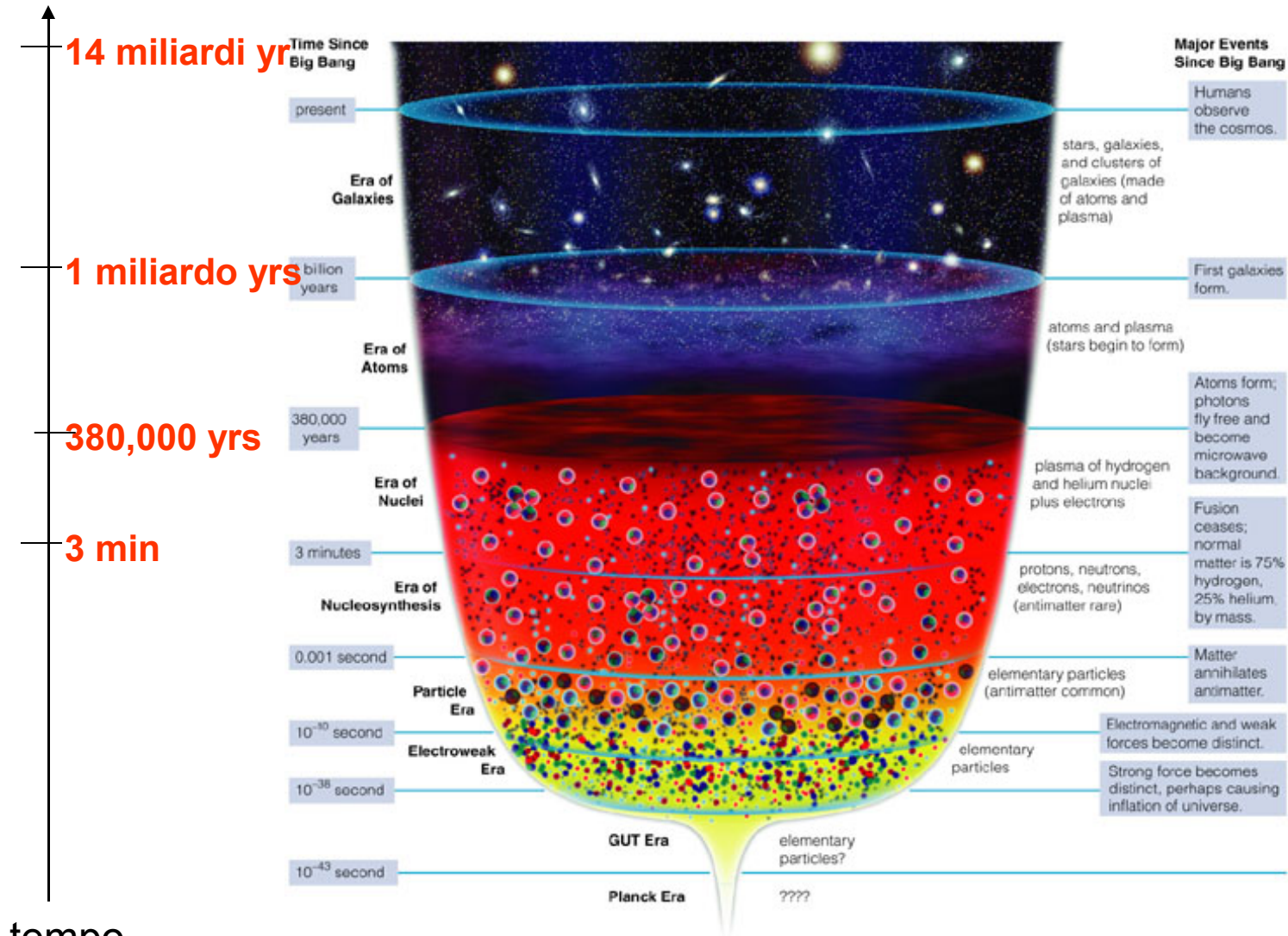
**Chiuso** ---- densità > “critica”; espande, poi si contrae e collassa

*Problema: determinare la densità dell'Universo e paragonarla a quella critica*



tempo

# Storia dell'Universo in una immagine



Si formano le galassie

Si formano gli atomi

Si formano nuclei

tempo

Key

neutron  
proton



electron  
neutrino



antiproton  
antineutrino



antielectrons

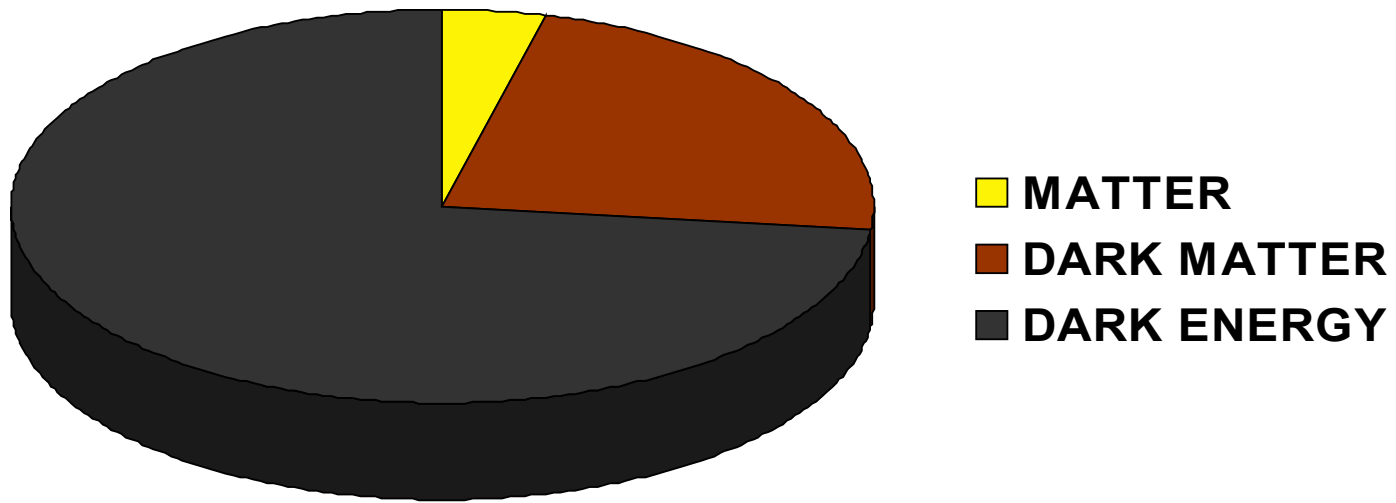


quarks



## Cosmologia di precisione?

Nelle equazioni di Einstein c'è un termine anti-gravità la **costante cosmologica**; Einstein pensava fosse un errore...oggi pensiamo sia una sconosciuta forma di densità di energia, che chiamiamo **energia scura**.



MATERIA + MATERIA SCURA + ENERGIA SCURA = TOTALE

4% + 23% + 73% = 100%

**Quindi, dopo il Big Bang, l'Universo ha decelerato espandendosi, poi circa 6 miliardi di anni fa ha iniziato ad accelerare quando l'energia scura iniziò a predominare sulla gravità**

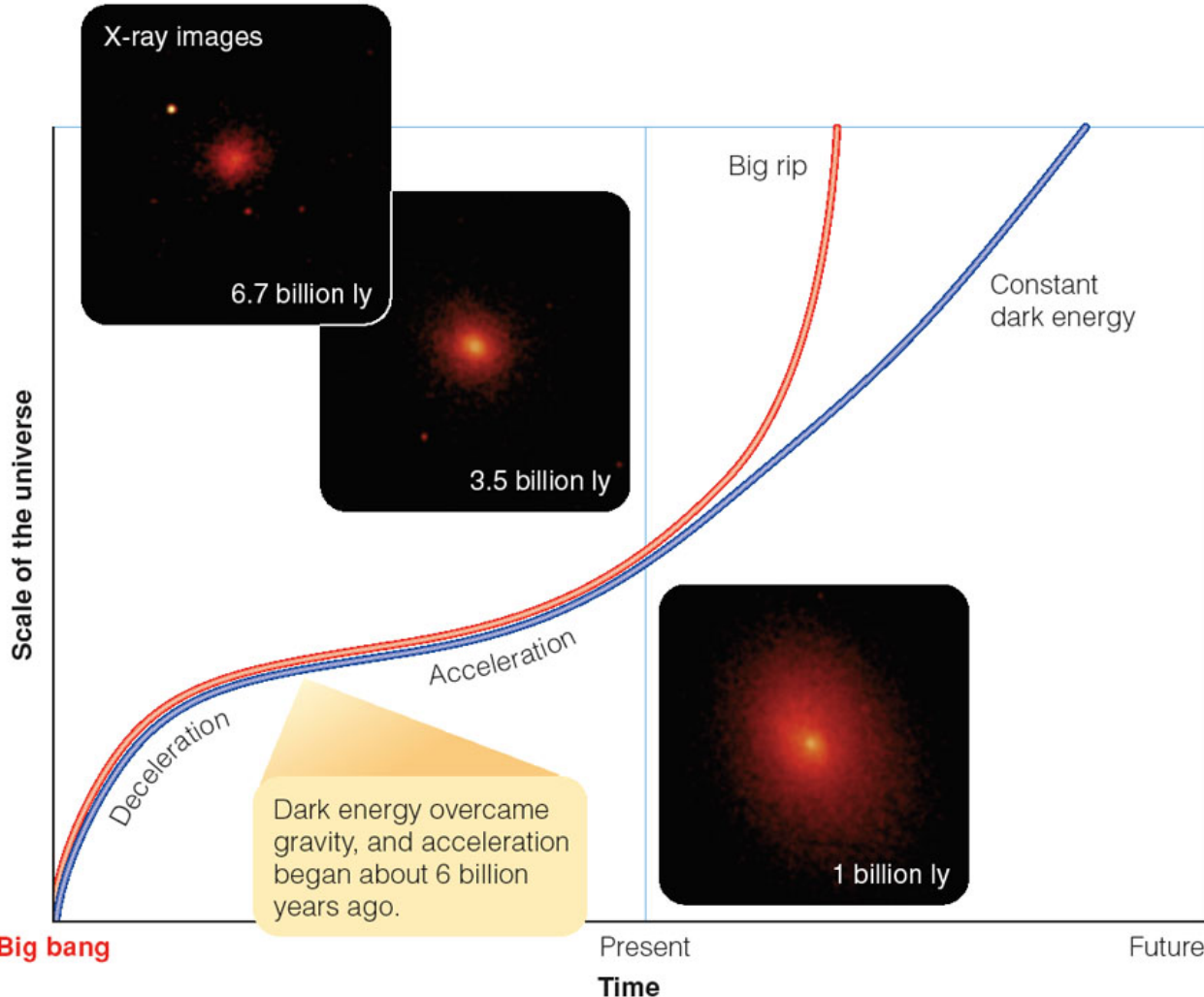
**Sembra una follia!**

**Osservazioni in raggi X di ammassi di galassie permettono di determinare la distanza dell'ammasso.**

**Il risultato indica che l'espansione universale rallentava prima di 6 miliardi di anni fa.**

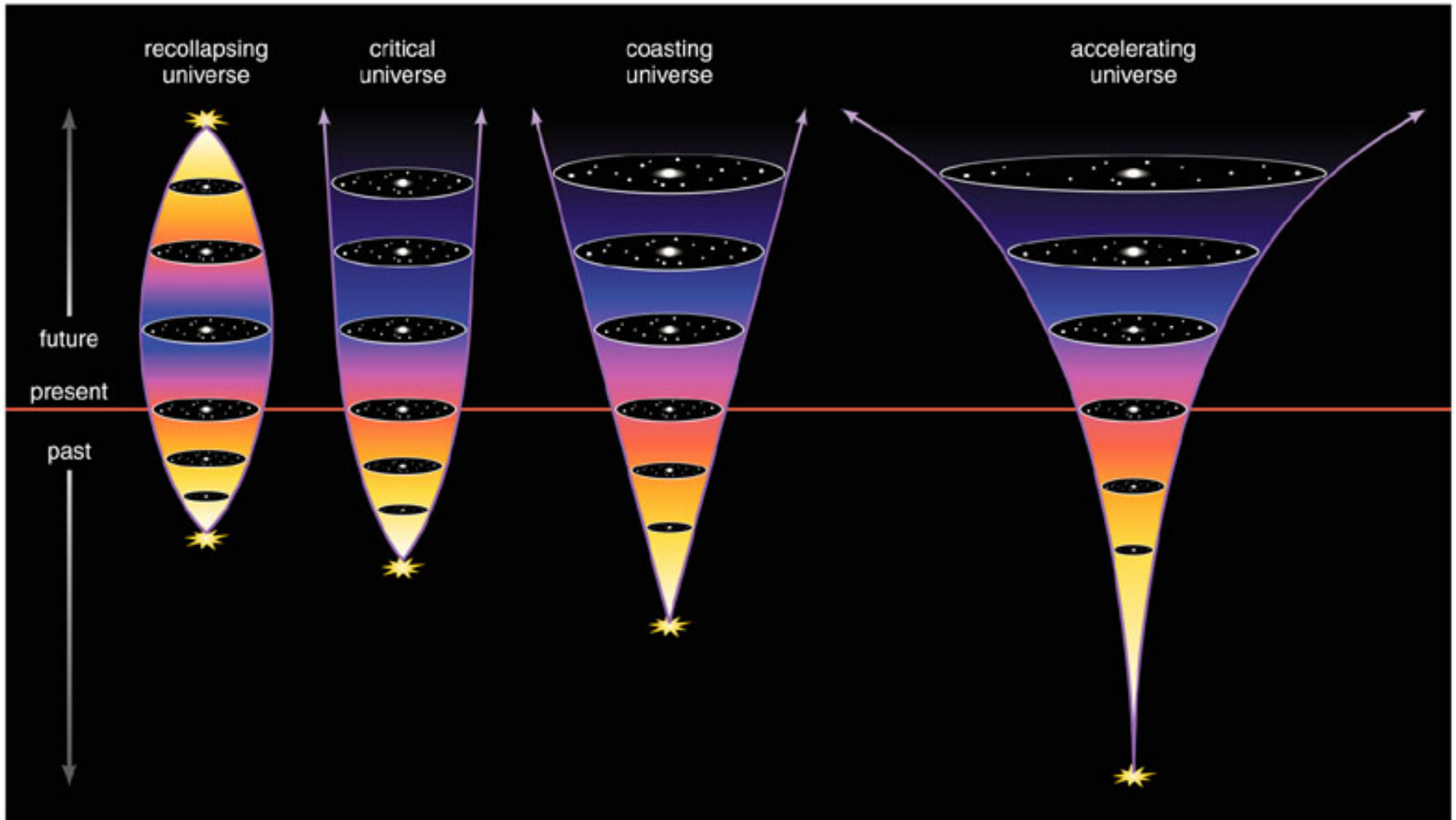
**Esatto!**

**Decelerazione...  
Poi...  
Accelerazione.**

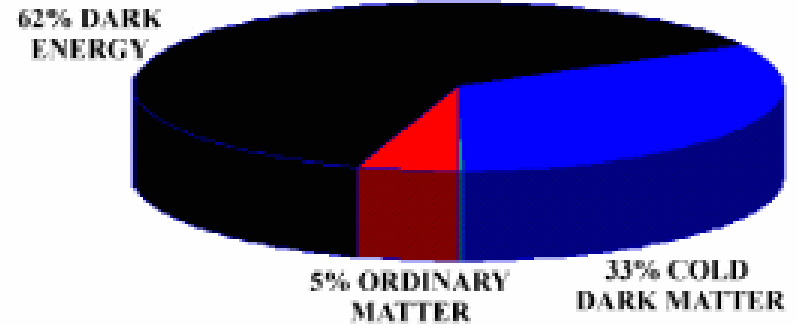


# Speculazione: se l'energia scura persiste l'Universo si sfalderà (Big Rip)

Big Rip?



# La Nuova Cosmologia



- Piatto, densità critica, Universo in accelerazione
- Nelle prime fasi rapida espansione (inflazione)
- Densità inhomogenea prodotta da fluttuazioni quantiche durante l'inflazione
- Composizione: 2/3 energia scura; 1/3 materia scura + ordinaria; 1/200 stelle
- Contenuto in materia: 26% materia scura fredda; 4% barioni; 0.3% neutrini
- Temperatura oggi:  $T=2.73$  Kelvin
- Età presente: 14 miliardi di anni (Gyr)
- Presente tasso di espansione (costante di Hubble):  $72 \text{ km/s/Mpc}$

# Espansione dell'Universo

Governata dalla presente equazione:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\text{costante} \times (\rho + 3p) + \Lambda/3$$

$\ddot{a}/\dot{a}$  = **accelerazione** dell'Universo  $\dot{a}$

( $>0$  accelera)

( $<0$  rallenta)

$\rho$  = densità di materia

(termine gravitazionale; contribuisce a  $<0$ , rallentamento dell'espansione)

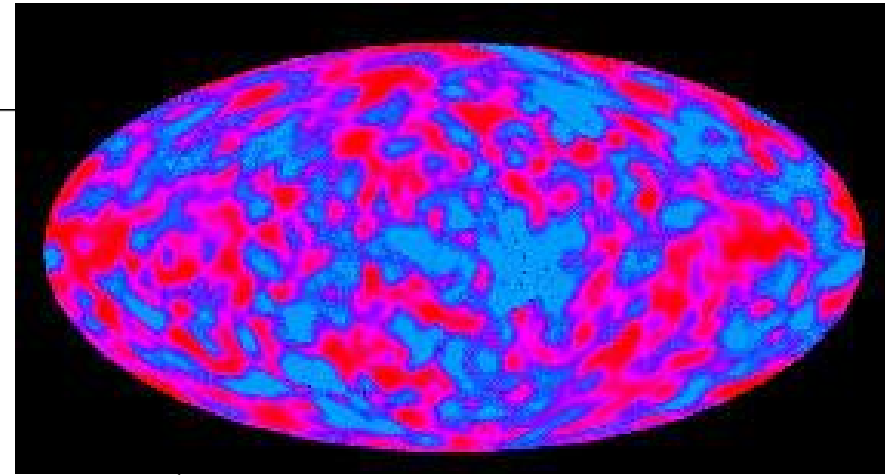
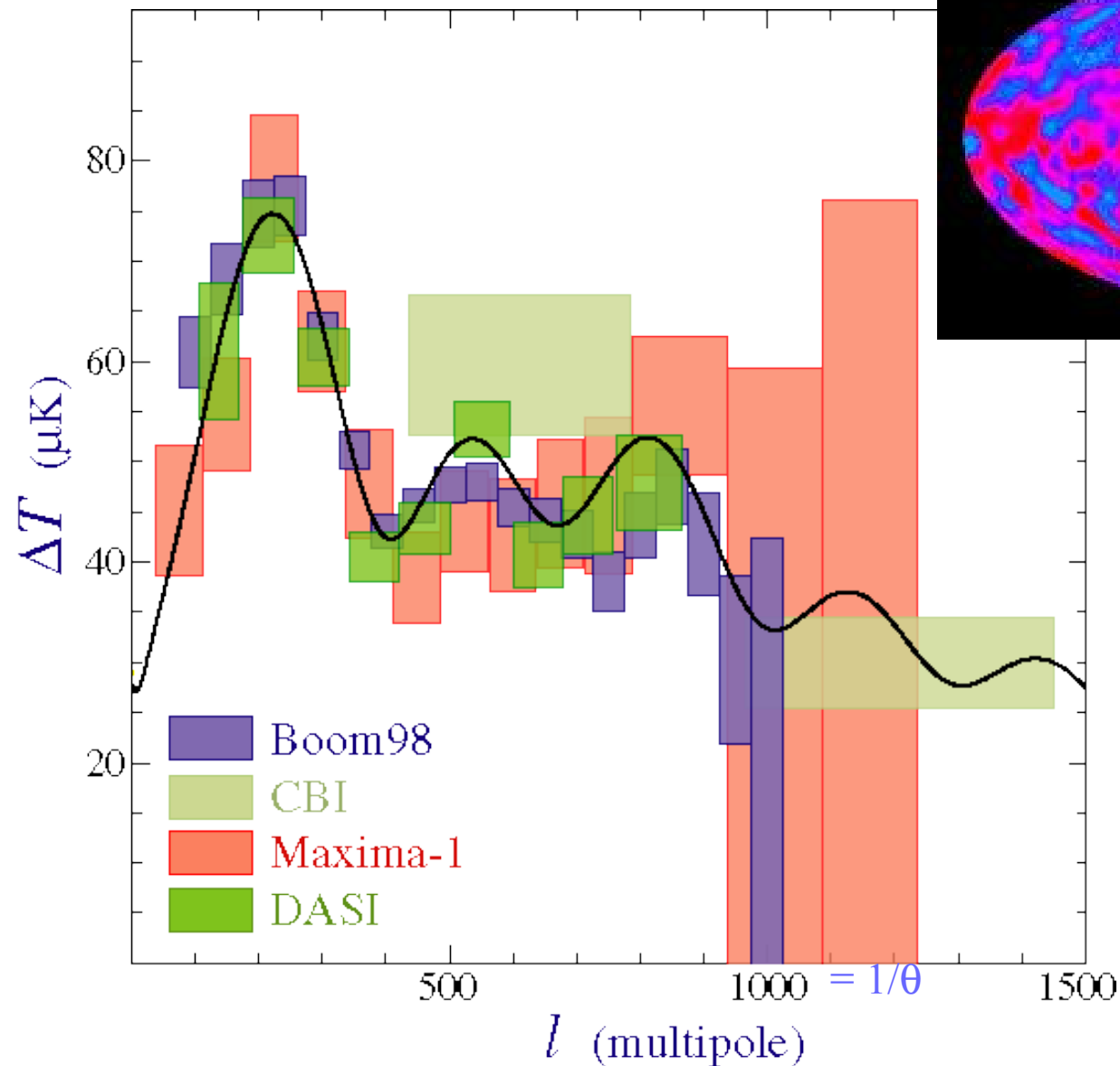
$p$  = pressione esercitata dalla materia

(contribuisce  $<0$ , rallentamento della espansione)

$\Lambda$  = **costante cosmologica**

(termine anti-gravità (?); contribuisce a  $>0$ , accelerazione dell'espansione)

# Spettro della CMB- Fluttuazioni di Temperatura vs. Separazione Angolare



**Calcolare la differenza di temperatura tra due punti sulla mappa separati da  $\theta=1/l$ . Farlo per ogni punto in cielo raggrupparli (bin) e graficare la distribuzione.**

# Teoria dell'Inflazione

La **CMB è molto uniforme**; le T di ogni punto nel cielo sono molto simili (salvo piccole variazioni).

Ne segue: **tutte le parti dell'Universo ad una certa epoca nel passato sono state causalmente connesse**. Ogni punto poteva “comunicare” con ogni altro (ricordiamo che la velocità massima è **c**).

Però usando l'equazione dell'espansione, non si raggiunge mai un epoca in cui l'Universo è causalmente connesso dopo che si è formata la materia.

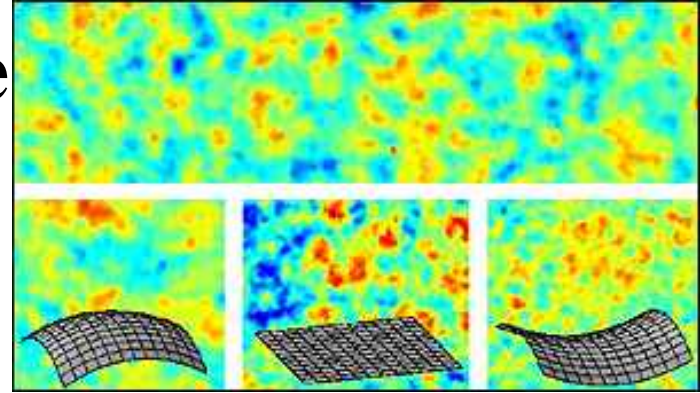
Questo è il **problema dell'orizzonte**. Si è risolto assumendo  $\Lambda$  diversa da zero nelle prime fasi. Ciò causa un periodo di rapida espansione detto **Inflazione**.

**La costante cosmologica deve essere stata dominante sulla gravità all'alba dell'Universo. In GUT, questo si spiega ricorrendo all'energia del vuoto.**

# Evidenza a favore dell'Inflazione

## L'Universo è Piatto

$$\Omega_0 = 1$$



Il primo **picco nello spettro del CMB** è una potente misura della curvatura dell'Universo. Si trova che il raggio di curvatura è 50 volte maggiore delle dimensioni dell'Universo, i.e. è praticamente piatto;  $\Omega_0 = 1$ .

Noto dagli anni '70 ma non provato. L'Inflazione predice un Universo piatto; teoricamente il problema è risolto. Lo spettro CMB sostiene la Cosmologia Inflazionaria.

Gli altri **picchi nello spettro del CMB** forniscono una misura dello spettro perturbazioni primordiali densità da cui crescono le strutture (i.e. galassie, ammassi, strutture su grande scala). Si osserva che sono invarianti in scala. Cioè non c'è forma allo spettro di over-densità; **tutte le dimensioni di over-densità sono ugualmente frequenti nell'Universo**. Anche questo predetto dalla teoria dell'Inflazione!

# L'equazione di Densità Cosmologica

- $\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c$ , dove  $\rho_c$  è la densità critica
- La densità critica fa sì che l'Universo sia piatto.

Quindi se  $\Omega_0 = 1$ , l'Universo è piatto.

**Densità Totale = Densità di Materia + Densità di Energia**

$$\Omega_0 = \Omega_M + \Omega_E$$

# Contenuto di Materia

Se la densità totale di materia,  $\Omega_M$ , è la somma della materia barionica (stelle e gas) e della materia scura (rivelata solo attraverso effetti gravitazionali)

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{DM}$$

**Si riesce a misurare  $\Omega_B$  da due eventi cosmici molto diversi:**

- **Nucleosintesi del Big Bang**

L'abbondanza degli elementi cosmici (deuterio, elio, idrogeno)  
redshift = 1 miliardo! (età = pochi minuti)  
Fisica nucleare (forze nucleari forti e deboli)

- **Ricombinazione**

Forma dello spettro di CMB (dimensioni e forme dei picchi)  
redshift = 1000 (età = 1 milione di anni)  
Fisica atomica (forza elettromagnetica)

**Entrambe le misure danno  $\Omega_B = 0.02$  (materia ordinaria)**

**Il rapporto tra tutta la materia (tutto ciò che si raggruppa- barioni, neutrini, materia scura) e la materia ordinaria (**barioni**) può essere misurato sia con lo **spettro del CMB** che tramite il **clustering delle galassie**.**

**CMB dà  $\Omega_M/\Omega_B = 7$**

**Clusters danno  $\Omega_M/\Omega_B = 9$**

**Due punti:**

- 8. Questi numeri sono consistenti tra loro, usando due fisiche diverse (CMB-ricombinazione e clustering-gravitazione).**
- 10. Il risultato implica che la materia scura è più abbondante della materia ordinaria di un fattore 7-9 (trascurando i neutrini)**

**Da ciò si ricava:  $\Omega_M = 0.33$**

# E i neutrini?

Poichè  $\Omega_M/\Omega_B$  è così grande, e la sua misura implica clustering, deduciamo che la **materia scura è “fredda”** (si muove piano).

I neutrini sono prodotti dalle reazioni nucleari in ogni stella (100 miliardi di stelle e ognuna produce  $10^{38}$  neutrini al secondo!!!) e in ogni esplosione di supernova.

Gli esperimenti confermano che i **neutrini hanno massa molto piccola** (1 deci milionesimo della massa di un elettrone). Le misure sono quelle delle oscillazioni del neutrino, il risultato che ha risolto il problema dei neutrini solari.

Però...

I neutrini sono “caldi”, si muovono velocemente, sono materia che non si ammassa facilmente. Dati sul clustering e bilancio sulla massa totale dei neutrini riduce il contributo neutrino a solo lo 0.3% della densità di materia nell’Universo.

**Dunque I neutrini non portano un importante contributo a  $\Omega_M$ , nè a  $\Omega_0$ .**

# Sommario del Contenuto di Materia dell'Universo.

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{DM}$$

$$\Omega_B = 0.02$$

**Materia ordinaria (Stelle & Gas)  
dalla nucleosintesi del Big Bang e CMB**

$$\Omega_M / \Omega_B = 7-9$$

**Rapporo tra tutta la materia che  
clustera e tutta la materia nei  
Cluster e CMB**

$$\Omega_M = 0.33$$

**Tutta la materia, inclusa la materia scura**

# Qual'è il valore di $\Omega_E$ ?

$$\Omega_0 = \Omega_M + \Omega_E$$

In cui

$\Omega_0 = 1$       **Dallo spettro CMB (Universo piatto)**

$\Omega_M = 0.33$       **Dallo spettro CMB e misure su cluster, inclusa materia di stelle + gas (barionica) e materia scura (natura ignota)**

**Indirettamente si ricava la densità di energia**

$$\Omega_E = \Omega_0 - \Omega_M = 0.67$$

*Che però non dice nulla sulla natura di questa energia!*

# Reppresentazione grafica

$$\Omega_E = \Omega_0 - \Omega_M = 0.67$$

Si pensava che l'Universe fosse circa PIATTO con  $\Lambda=0$  (cerchietto verde).

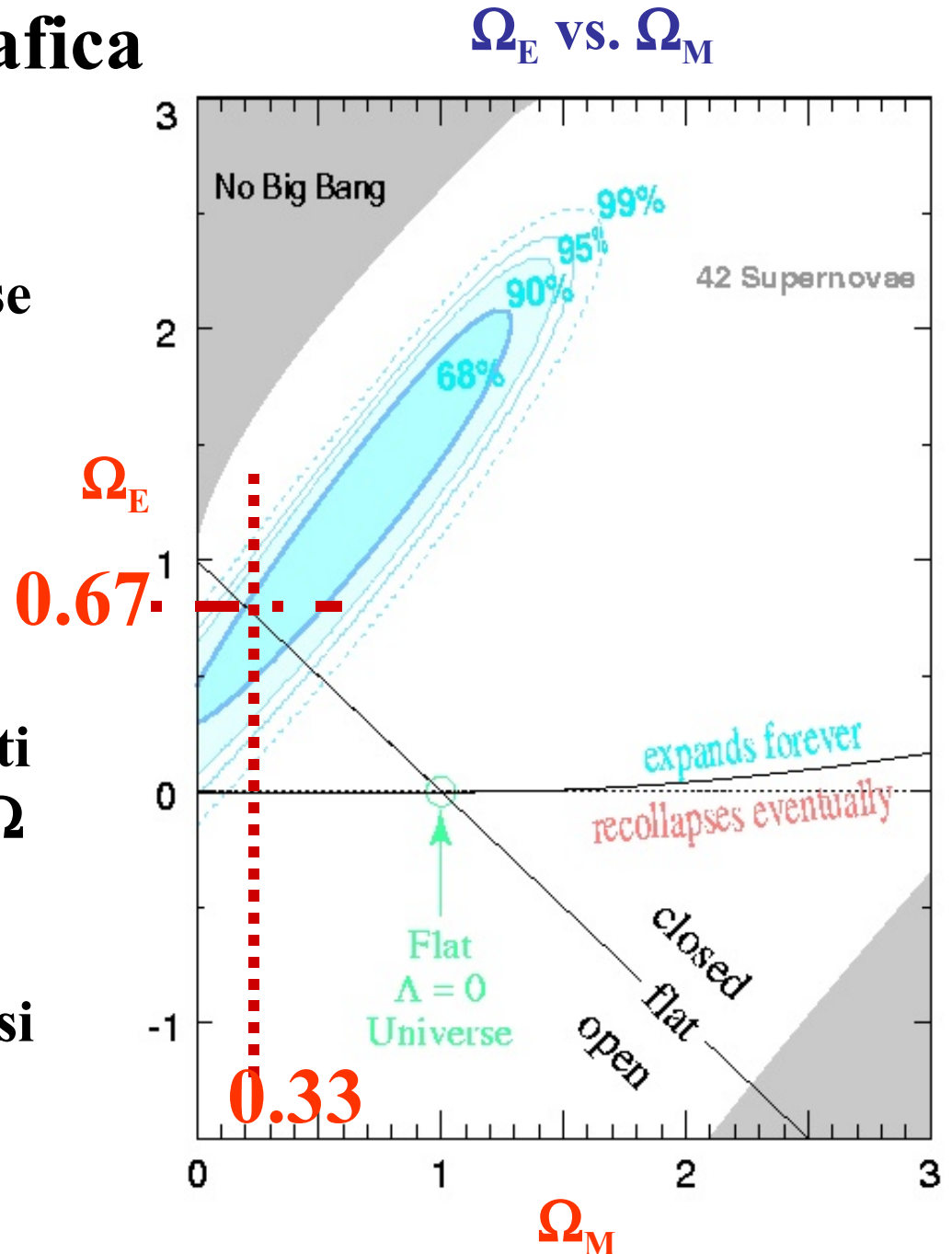
Pensavamo  $\Omega_M = 1$ .

Oggi pensiamo  $\Omega_0 = 1$

quindi  $\Omega_M = 0.33$

Nel diagramma siamo costretti ad un Universo piatto se  $\Omega_0 = 1$ .

Dove si incrocia con  $\Omega_M=0.33$  si ricava il valore di  $\Omega_E$ .



# Sulla Natura della Densità di Energia: Evidenza 1

---

**L'Energia scura** si comporta come una **pressione negativa**.

---

Ragionamento indiretto:

L'Energia deve essere **distribuita uniformemente nello spazio (non si rivela)**. Se è uniformemente distribuita, e se  $\Omega_E$  è stato dominante nel passato avrebbe dovuto impedire la crescita delle strutture nell'Universo che, oggi avrebbe un aspetto diverso da quello che vediamo.

Quindi,  $\Omega_E$  in passato deve essere stata più piccola di  $\Omega_M$ . Questo è possibile solo se il rapporto fra pressione e densità,  $\omega = p/\rho$ , era minore di zero (cioè **negativo**). Il parametro  $\omega$  si chiama **equazione di stato**. I dato CMB confinano il suo valore a

$$\omega < -0.5$$

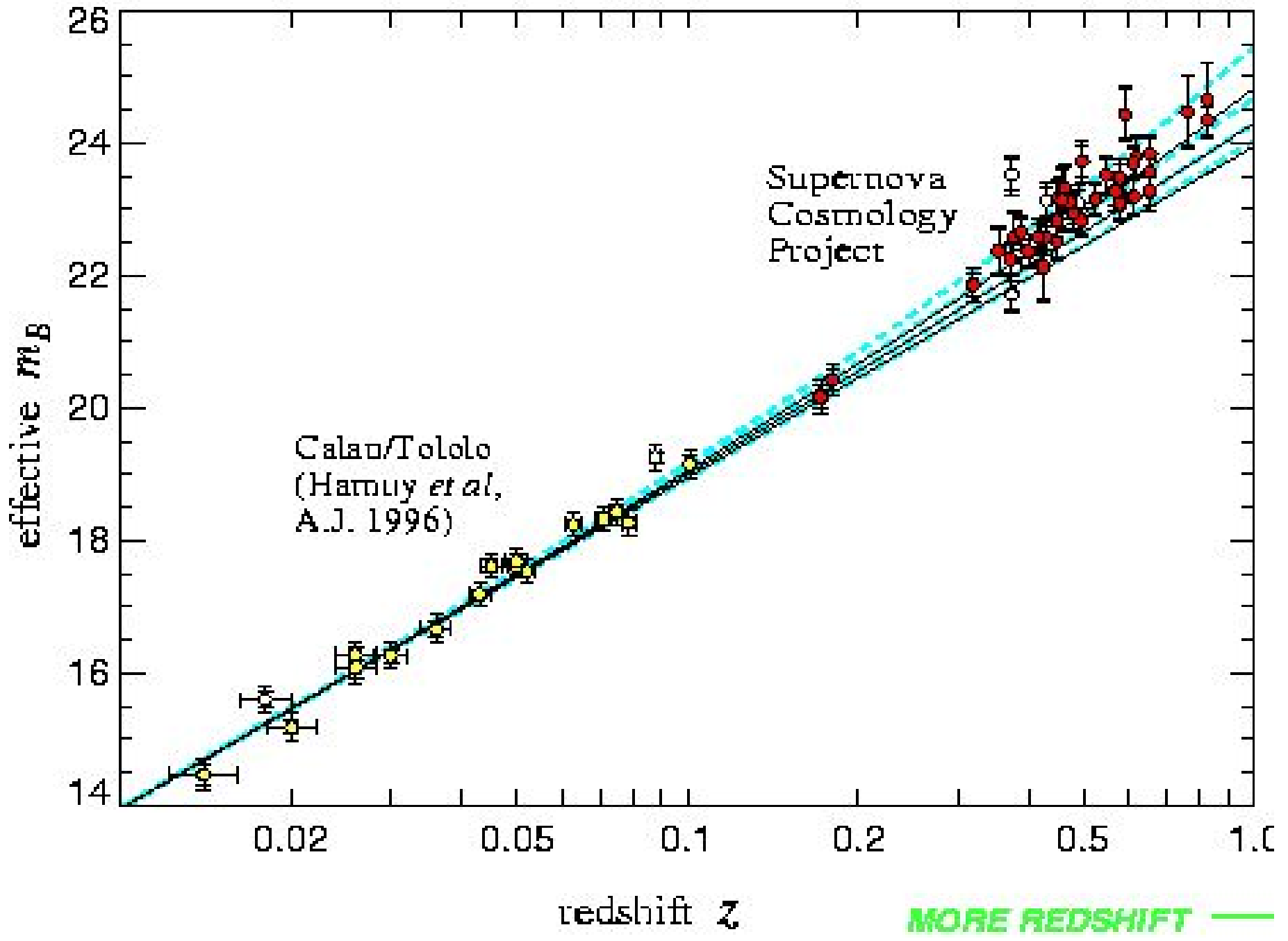
**La teoria dell'inflazione predice (impone) che  $\omega = -1$ .**

# Evidenza 2

**Diretta e recente usando le supernovae (candele standard) e il diagramma di Hubble!**

**Da sempre si era assunto che l'espansione dell'Universo rallentasse al trascorrere del tempo cosmico (decelerazione). I dati sulle **supernovae mostrano che l'espansione dell'Universo oggi aumenta, accelera con il tempo.****

Questo significa che tale Energia si comporta come anti-gravità cioè una **pressione negativa!**  
Al momento **NON SAPPIAMO COSA SIA,**  
Perciò la chiamiamo Energia scura!



# Proprietà della Energia scura

- **Non emette luce**
- **Esercita pressione negativa,  $p \sim -\rho$**
- **Ha una distribuzione omogenea e onnipresente (non clustera)**
- **C'è più energia nell'Universo che materia**

**L'Energia scura non sostituisce la Materia scura (che clustera).**

**Qualitativamente l'Energia scura è molto diversa dalla Materia scura**

# Sulla Costante Cosmologica

L'Energia scura è connessa alla costante cosmologica,  $\Lambda$ ?

$$\frac{a}{\dot{a}} = -\text{costante} \times (\rho + 3p) + \Lambda/3$$

accelerazione  
dell'espansione

decelerazione

accelerazione

Esatta formulazione matematica per  $\Lambda$  viene dalla teoria quantistica dei campi. L'energia del vuoto **quantico** fornisce una spiegazione naturale per  $\Lambda$ .

L'energia del vuoto quantico è “energia della tensione” fra la materia che risulta nella virtuale oscillazione tra materia e anti-materia coppia di particelle emerse dal “nulla” che si annichilano in “nulla” (dalla  $E=mc^2$ )

Il PROBLEMA è che la densità di energia del vuoto quantico è 150 potenze di 10 troppo grande!

*Nessuna teoria oggi può spiegare la densità di energia dell'energia scura.*

**Se l'energia scura è la stessa che ha innescato l'inflazione, allora era dominante all'inizio dell'Universo e sta ritornando a dominare adesso.**

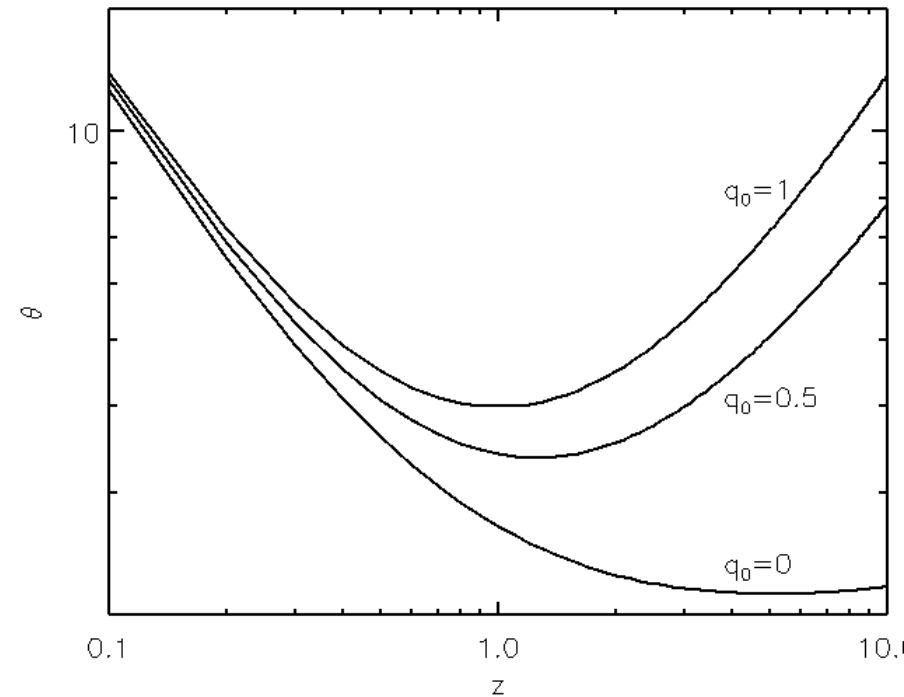
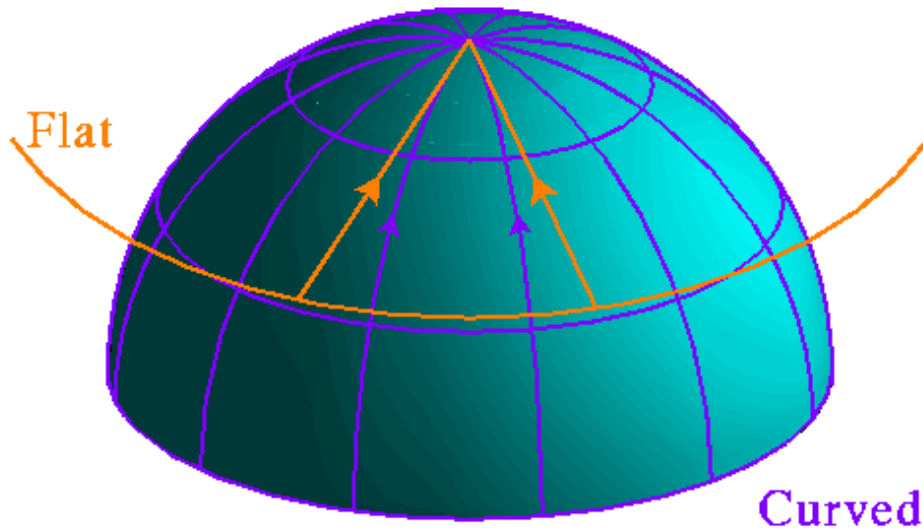
**Perchè questo cambiamento nel tempo?**

**Perchè adesso?**

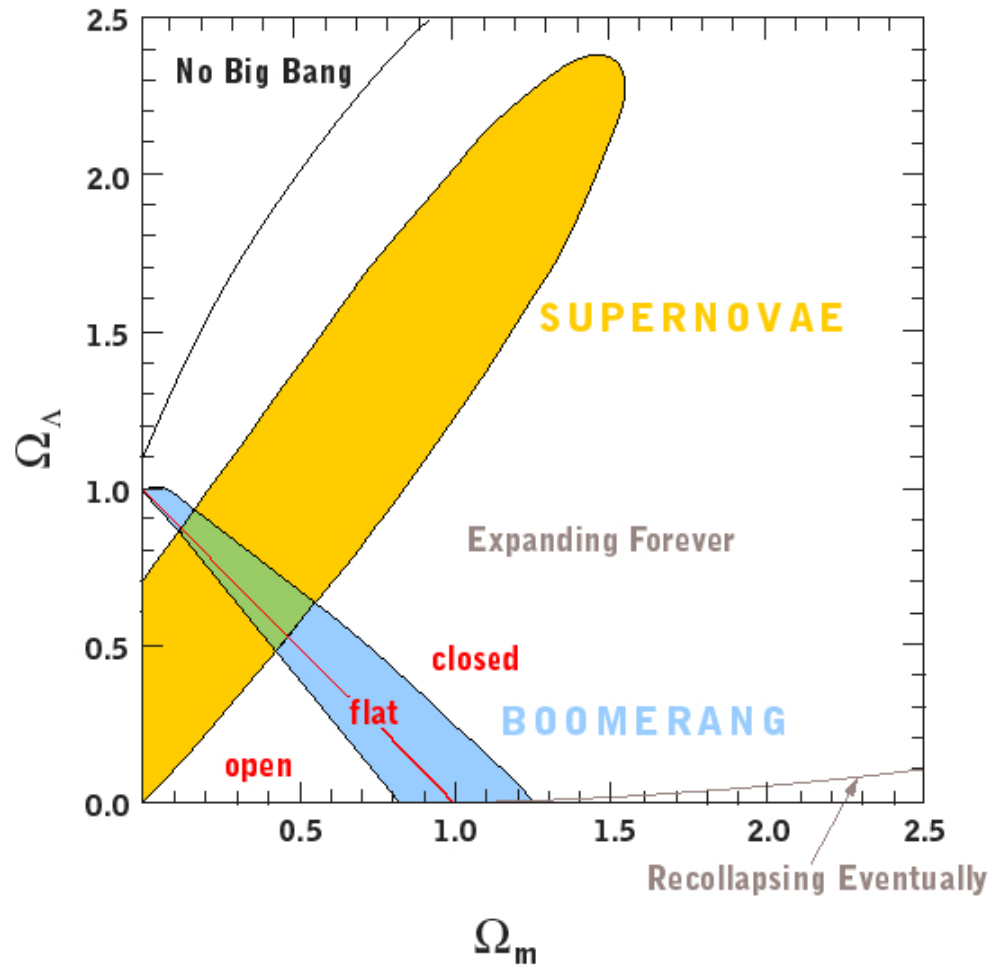
# Come misurare la geometria dell'Universo

- Serve un metro sulla CMB
- Per diverse curvature, un metro di lunghezza data appare di lunghezze diverse visto da angoli diversi

Measuring the Curvature of the Universe

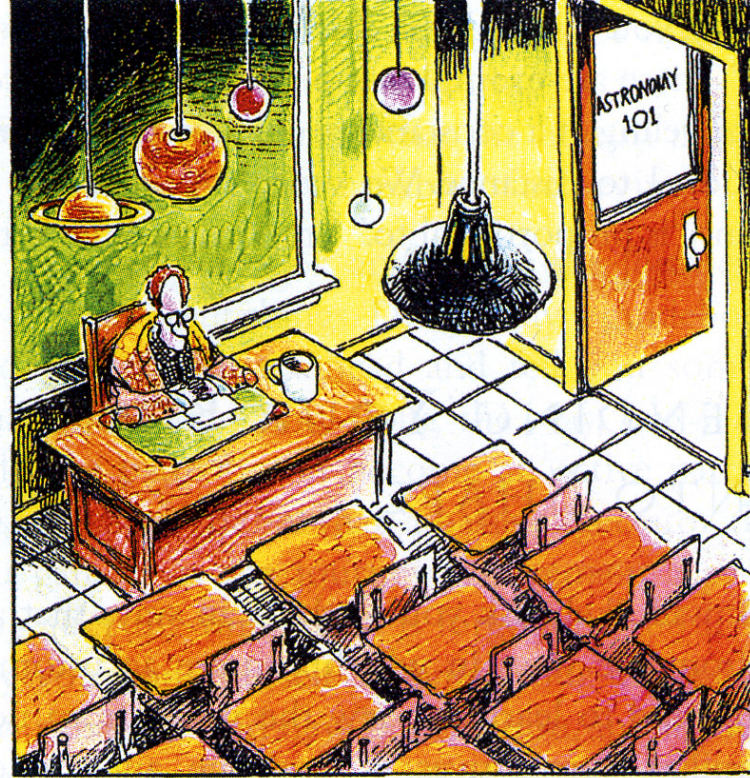
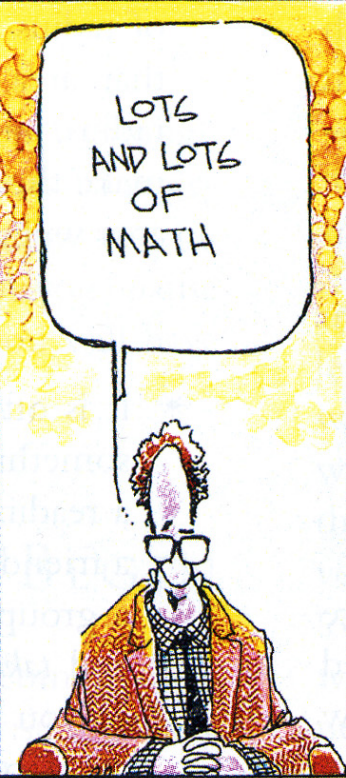


- Con le supernovae si misura  
 $q_0 = \frac{1}{2}\Omega_0 - \Omega_\Lambda$
- Le fluttuazioni della CMB misurano la curvatura  
 $\Rightarrow \Omega_0 + \Omega_\Lambda$
- Due equazioni per due variabili  
 $\Rightarrow$  problema risolto



# NON SEQUITUR

by WILEY



DIST. BY UNIVERSAL PRESS SYNDICATE