

Cosmologia

V

STA - ASTRONOMIA

1

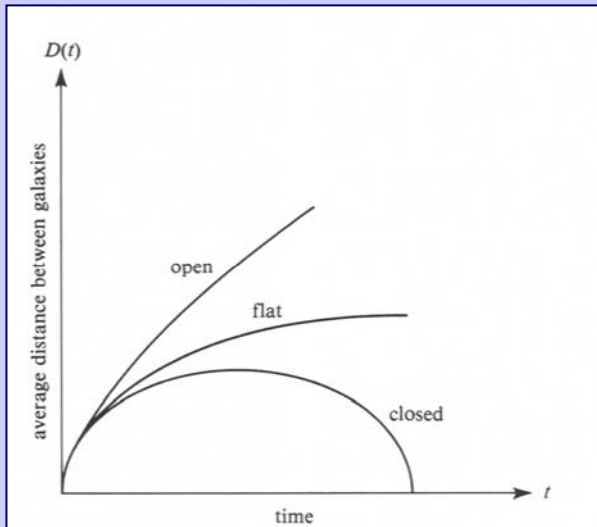
- Dalle speculazioni filosofiche alla modellizzazione scientifica: guardare lontano permette di guardare indietro nel tempo
- L'espansione dell'Universo (1930)
- Equazioni di Einstein e modelli di Friedmann (1922)
- La radiazione di fondo primordiale (1965)
- Il modello del big-bang (1942)
- La struttura a grande scala dell'Universo
- La nucleosintesi cosmologica
- L'inflazione
- L'Universo in accelerazione (1998)

V

STA - ASTRONOMIA

2

Modelli cosmologici



Omogeneità e isotropia della materia cosmica per $D > 300$ Mpc:
principio cosmologico

L'Universo si espande rallentando sotto l'effetto della autogravitazione

Inverso della costante di Hubble = Età dell'Universo = 13.7 ± 0.2 miliardi di anni

V

STA - ASTRONOMIA

3

Il modello cosmologico standard

Soluzione Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker delle equazioni di Einstein:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{Kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$R_{curv} \propto R$, $K = -1, 0, +1$ spazio iperbolico, piatto, sferico

Λ = costante cosmologica

$$d(\rho_i R^3) = -p_i dR^3 \text{ espansione adiabatica}$$

materia non relativistica $\rho_i \gg p_i \Rightarrow \rho_i \propto R^{-3}$

materia relativistica $\Rightarrow \rho_i \propto R^{-4}$

temperatura del corpo nero $\Rightarrow T_{rad} \propto R^{-1}$

densità critica $\Rightarrow \rho_{crit} \equiv 3H_0^2 / 8\pi G = 1.88 \times 10^{-29} h^2 \text{ g/cm}^3$

parametro di densità $\Omega_0 \Rightarrow \Omega_0 = \sum \Omega_i$, $\Omega_i = \rho_i / \rho_{crit}$

parametro di decelerazione $\Rightarrow q_0 \equiv -\left(\frac{\ddot{R}}{R}\right)_0 H_0^{-2} = (\Omega_0 / 2)(1 + 3p_0 / \rho_0)$

raggio di curvatura $\Rightarrow R_{curv} = cH_0^{-1}(\Omega_0 - 1)^{-1/2}$

V

STA - ASTRONOMIA

4

- Il parametro di densità

$$\Omega_0 = \frac{8\pi G \rho_0}{3H_0^2} = \frac{\rho_0}{\rho_{crit}}$$

- Universi aperti per $\Omega < 1$
- Universi chiusi per $\Omega > 1$
- Universi piatti per $\Omega = 1$
- Qual è il nostro Universo ?

- Misure del parametro di densità
- Dalla luminosità di stelle e galassie

$$\Omega_{lum} = (0.044 \pm 0.004)$$

- Dalla dinamica delle galassie e degli ammassi e dalle lenti gravitazionali

$$\Omega_M = 0.27 \pm 0.04$$

- Materia oscura
 - stelle oscure, pianeti, buchi neri
 - materia oscura non barionica, attiva solo gravitazionalmente
 - calda (neutrini) HDM
 - fredda (assioni e neutralini) CDM
- Universo aperto ?



CMB

Radiazione di fondo cosmica a microonde



Penzias & Wilson 1965:
un corpo nero
perfetto nel cielo

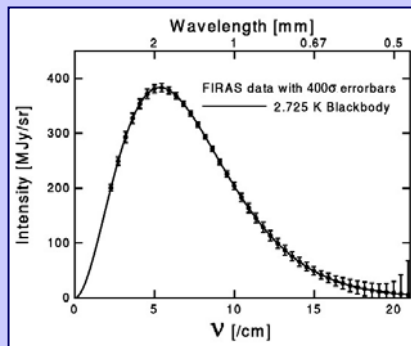


COBE 1980

V

STA - ASTRONOMIA

7



- Spettro di corpo nero con temperatura

$$T_0 = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

- L'Universo proviene da una fase densa e calda di equilibrio termodinamico
- Già proposta da Bethe & Gamow fin dagli anni 1940

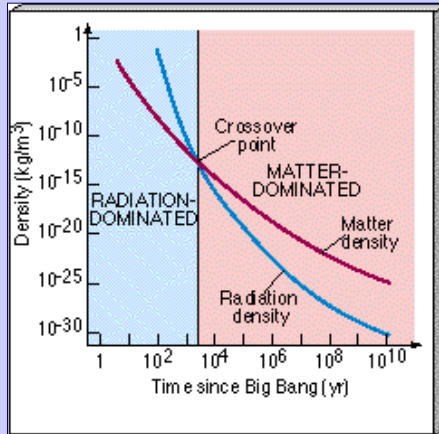
V

STA - ASTRONOMIA

8

Le fasi di espansione dell'Universo

- Fase decelerata dalla radiazione
 - 0.00001 secondi < t < 10mila anni
 - quarks, barioni, modello standard delle particelle elementari
 - nucleosintesi
- Fase decelerata dalla materia (disaccoppiata dalla radiazione)
 - fino ad oggi circa
- Fase dominata dalla curvatura o dalla costante cosmologica
 - da oggi in poi, forse ...



V

STA - ASTRONOMIA

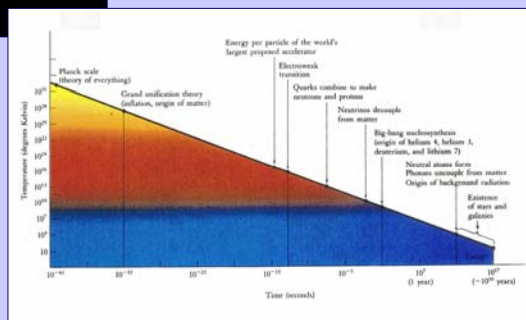
9

Big-Bang

Il modello del Big-Bang

Andamento della temperatura con l'età dell'Universo

Fasi iniziali di equilibrio tra materia e radiazione
 Disaccoppiamento
 Formazione delle strutture



V

STA - ASTRONOMIA

10

Il modello cosmologico inflazionario

- Il problema dell'omogeneità
 - superficie di ultimo scattering \gg orizzonte cosmologico
- Problema della piattezza
 - Ω_0 molto vicino a 1
- L'energia del vuoto (pressione negativa tipo Λ), campo scalare, instabilità del vuoto
- Rapida espansione in tempi $\sim 10^{-38}$ sec di una piccola regione omogenea dello spazio-tempo verso dimensioni maggiori dell'orizzonte dell'Universo

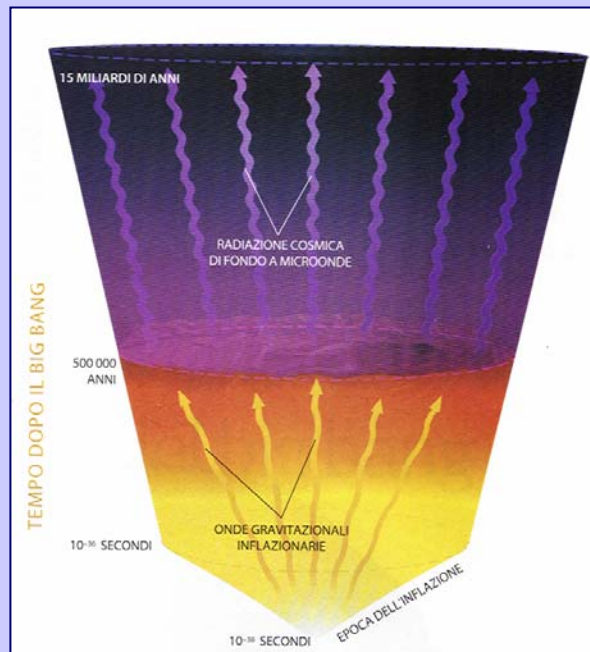
$$R_{curv} \approx cH_0^{-1}(\Omega_0 - 1)^{-1/2} \Rightarrow \Omega_0 \approx 1$$

- *L'Universo rimane piatto*

V

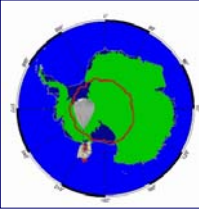
STA - ASTRONOMIA

11



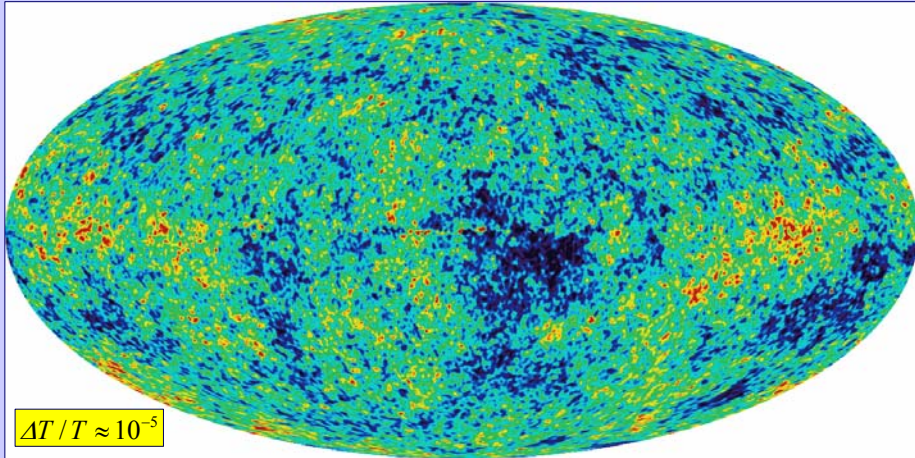
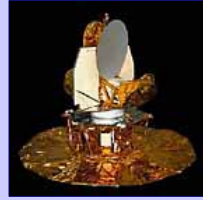
V

12



Anisotropie del CMB

Boomerang e WMAP



$\Delta T / T \approx 10^{-5}$

- Le anisotropie spaziali sono un'istantanea dell'Universo al disaccoppiamento di materia e radiazione
- Rappresentano fluttuazioni del campo di radiazione e materia: nella materia sono onde acustiche (la musica delle sfere ???)

$$T \cong 3000 \text{ K} \quad \text{a } t \cong 370.000 \text{ anni}$$

$$\frac{\Delta T}{T} \cong 10^{-5} \quad \text{su scale di } 0.6^\circ$$

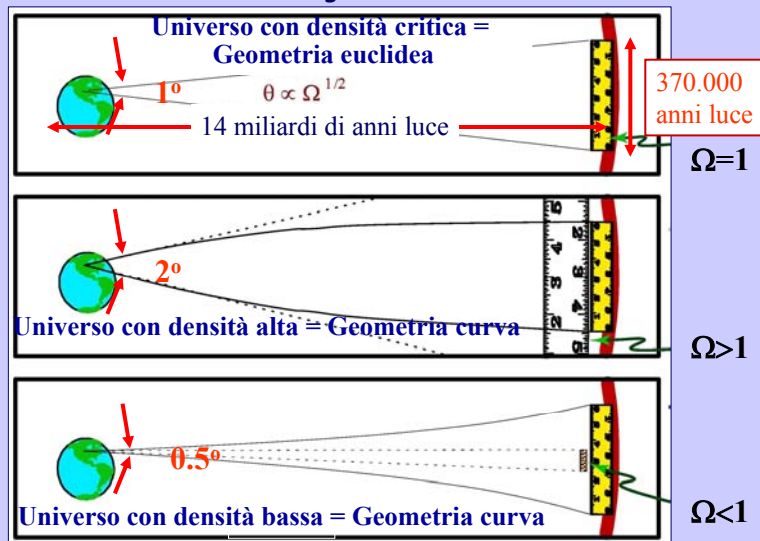
- Le dimensioni massime delle fluttuazioni sono quelle dell'Universo al momento del disaccoppiamento: 370.000 anni luce
- Dipendono solo dalla geometria dell'Universo: dall'osservazione delle dimensioni angolari delle fluttuazioni possiamo comprendere la geometria dell'Universo
- L'età dell'Universo (13.7 ± 0.2 miliardi di anni) dipende dalla ripartizione del parametro di densità tra materia barionica, materia oscura e "altro"

V

STA - ASTRONOMIA

15

Possiamo comprendere la geometria dell'Universo misurando l'angolo sotteso da un "righello cosmico"

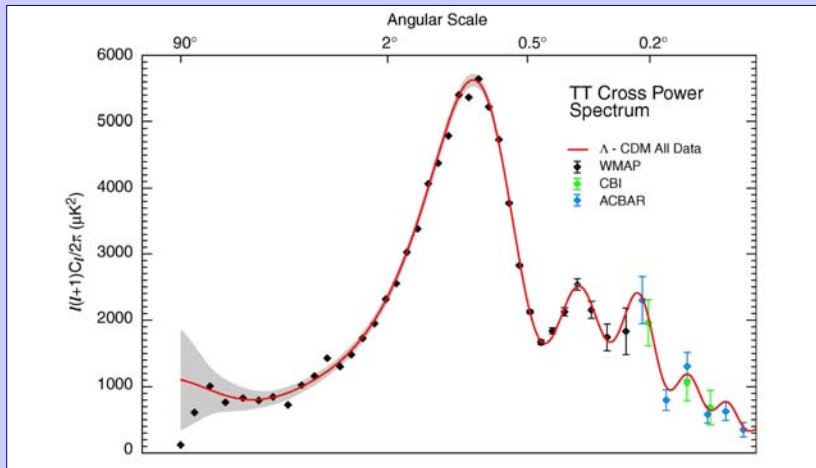


... e quindi ottenere la sua densità di massa ed energia

V

STA - ASTRONOMIA

16



- Misure dello spettro delle disomogeneità angolari (COBE, BOOMERANG, MAXIMA, WMAP e in futuro PLANCK)
- Spettro delle dimensioni delle variazioni di temperatura tra punti separati da un angolo θ

V

STA - ASTRONOMIA

17

Modelli cosmologici autoconsistenti basati sui dati di Boomerang e WMAP favoriscono

$$\Omega_0 = 1$$

Modello inflazionario !

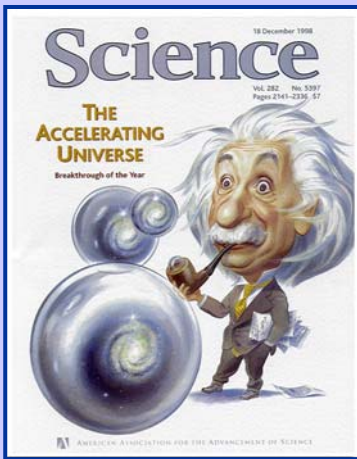
Le scale successive della distribuzione spettrale delle anisotropie dipendono dalla ripartizione di Ω_0 nelle forme di materia e "altro"

Manca il 73% del parametro di densità

V

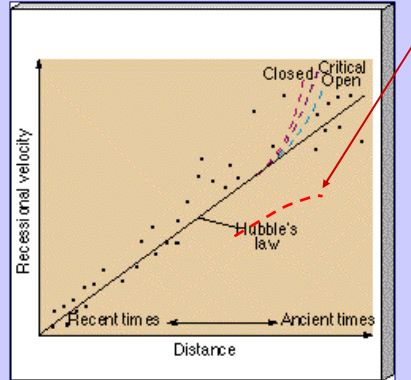
STA - ASTRONOMIA

18



Il "colpo di scena" del 1998

Il parametro di decelerazione è negativo, l'Universo accelera



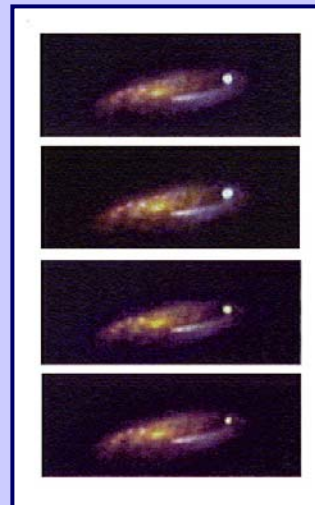
V

STA - ASTRONOMIA

19

Misura del parametro di decelerazione

- Studio della curvatura della legge di Hubble ad alti z utilizzando supernove SNeIa come candele standard (ritorno all'astrofisica)
- Le SNeIa a grandi z hanno velocità di recessione minori di quanto atteso dalla legge di Hubble lineare $v=Hd$



V

STA - ASTRONOMIA

20

L'Universo sta accelerando !

- Il parametro di decelerazione

$$q_0 \equiv -(\ddot{R}/R)_0 H_0^{-2} = (\Omega_0/2)(1 + 3p_0/\rho_0)$$

può essere negativo se domina una componente con equazione di stato

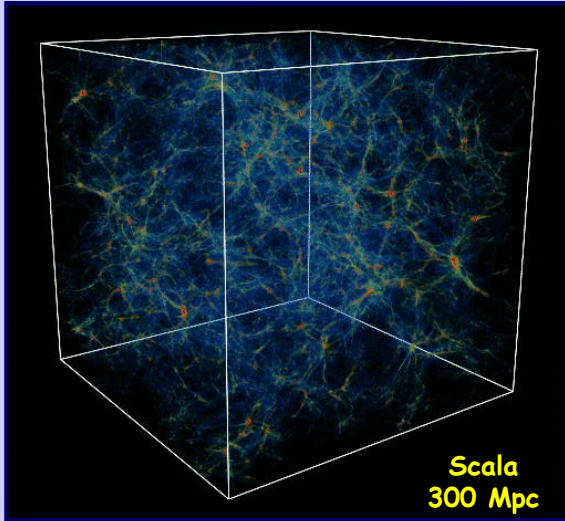
$$p_X \leq -w\rho_X/3$$

- Energia oscura, costante cosmologica, quintessenza: il 73% mancante !

Una "forza gravitazionale" repulsiva ?

Come si formano le strutture cosmiche ?

- Nascono da fluttuazioni di densità nella materia del big-bang
- Non esistono disomogeneità oltre i 300 Mpc, mentre esistono galassie e quasar: quindi le galassie sono collassate prima degli ammassi



Superammassi
(filamenti)
e vuoti:

strutture
primordiali non
collassate

V

STA - ASTRONOMIA

23

- Gli ammassi si sono aggregati da fluttuazioni su grandi scale
- I superammassi si sono formati su scale così grandi che non hanno ancora completato il loro collasso
- Le scale osservate fanno preferire il cosiddetto modello di Cold Dark Matter (materia oscura fredda)

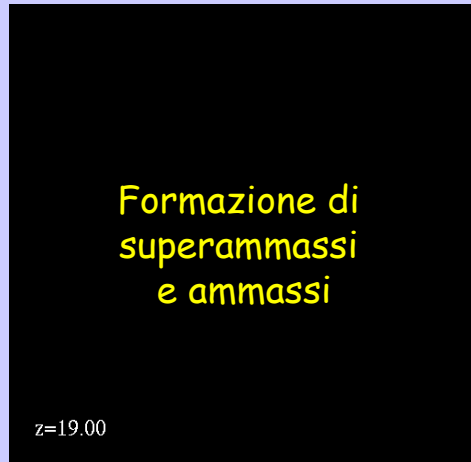
V

STA - ASTRONOMIA

24

Esperimenti numerici di formazione delle strutture

Si studia l'evoluzione dinamica di gas, materia oscura ed energia oscura



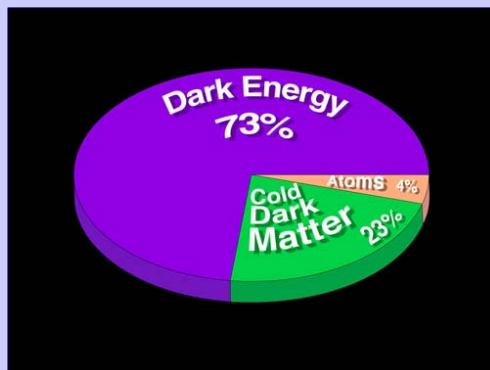
V

STA - ASTRONOMIA

25

Materia ed energia nell'Universo

- Big-bang + inflazione + Cold Dark Matter + Dark Energy \Rightarrow soluzione consistente con i dati sulla distribuzione delle galassie



V

STA - ASTRONOMIA

26

Universo luminoso e Universo oscuro

- L'Universo si trova al passaggio tra fase dominata da materia e fase dominata da curvatura o costante cosmologica
- La materia oscura è il risultato della fisica del big-bang dopo il tempo di Planck
- La fisica delle particelle elementari rivelerà le caratteristiche di questi "relicti" freddi (per non cancellare le perturbazioni del plasma primordiale che producono le strutture osservate galassie a $z = 2-4$, ammassi a $z = 0-1$) \Rightarrow CDM \Rightarrow bottom up
- L'energia oscura è richiesta dall'accelerazione dell'espansione e deve avere le caratteristiche di essere diffusa (non dà origine a perturbazioni gravitazionali) e pressione negativa in modo da rendere l'Universo elastico
- Può essere un relicto dell'improvvisa liberazione dell'energia del vuoto prima del tempo di Planck