

# Gli spettri dei QUASARS

- Gli assorbitori della luce dei QSO sono oggetti (galassie, nubi di gas) che si interpongono tra noi e i QSO
- Essi producono righe di assorbimento, molte righe della Lyman alfa
- Essi si trovano a redshift che possono essere molto diversi da quello del QSO
- I sistemi interposti si chiamano Damped Lyman-alpha (DLA) systems (hanno densita' di HI  $n=10^{20}\text{cm}^{-2}$ ).  
Probabilmente sono piccole galassie irregolari

# Gli spettri dei QSO

- Gli spettri dei QSO sono costituiti da un continuo radio non-termico
- Tutti i QSO mostrano sistemi di righe di assorbimento di metalli e/o della serie di Lyman (HI)
- Circa il 10% di tutti i QSO mostrano anche righe di assorbimento allargate (BAL)
- Tutti i QSO mostrano righe di emissione allargate (BEL), corrispondenti a velocità di 20.000 km/sec
- Dalle righe di emissione si deducono le abbondanze di Fe, Si, Al, Mg e C. I QSO hanno un elevato contenuto di metalli indipendentemente dal redshift e ciò implica forte formazione stellare e produzione di elementi



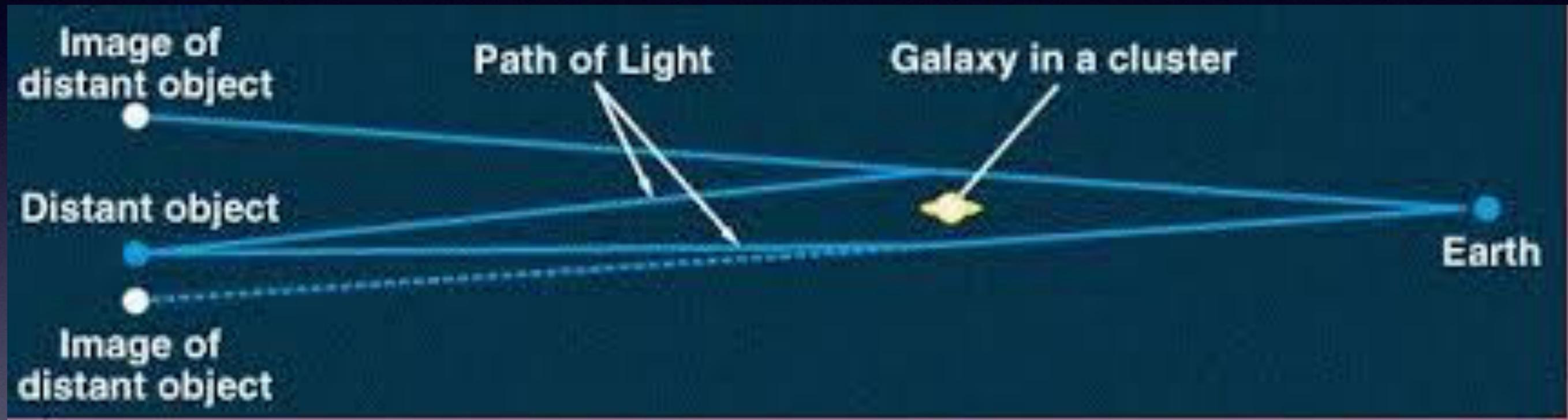
# Quasars

- Perché vediamo i QSO soprattutto ad alto redshift? Essi sono associati alle prime fasi dell'evoluzione delle galassie, anche se esistono QSO locali
- Quando si è formato il buco nero supermassiccio? Non è chiaro, ma si pensa nelle prime fasi evolutive
- Perché il contenuto metallico dei QSO è alto ed è costante in un vasto intervallo di redshift (tempo)? Perché l'evoluzione della galassia ospite è stata molto rapida, con intensa formazione stellare e produzione di metalli

# Lenti Gravitazionali

- Due QSO che appaiono vicini e con identici spettri (redshift, righe di emissione) con possibile diversa luminosità, A e B, possono essere l'immagine sdoppiata di un unico QSO prodotta da una lente gravitazionale
- La luce dell'unico QSO infatti viene deflessa dal campo gravitazionale di una galassia o di un ammasso di galassie
- Ci sono 20 casi noti di lenti gravitazionali di questo tipo
- Come vedremo le lenti gravitazionali, previste da Einstein, servono per misurare la distribuzione di materia nell'universo

# Effetto lente gravitazionale



# Ammassi di galassie

- Un ammasso di galassie deve contenere piu' di 50 membri altrimenti e' un gruppo
- Gli ammassi di galassie contengono da alcune centinaia ad alcune migliaia di galassie
- Il catalogo piu' grande e famoso di ammassi di galassie e' quello di Abell (1958)
- Abell separo' gli ammassi in regolari, intermedi e irregolari

# Ammassi di galassie

- Gli ammassi regolari contengono 35% di ellittiche (Es), 45% di S0s e 2% di spirali (Sps)
- Gli ammassi irregolari contengono 15% di Es, 35% di S0s e 50% di Sps
- L'ammasso della **Vergine** dista da noi circa **20 Mpc**, mentre l'ammasso di **Coma** dista circa **100 Mpc**

# Il redshift come tempo cosmico

- Ricordiamo che per  $v \ll c$  il redshift si scrive

$$z = \Delta\lambda/\lambda = v/c$$

- Esiste una relazione anche tra  $z$  ed il tempo cosmico  $t$ , ovvero il tempo trascorso dal Big Bang

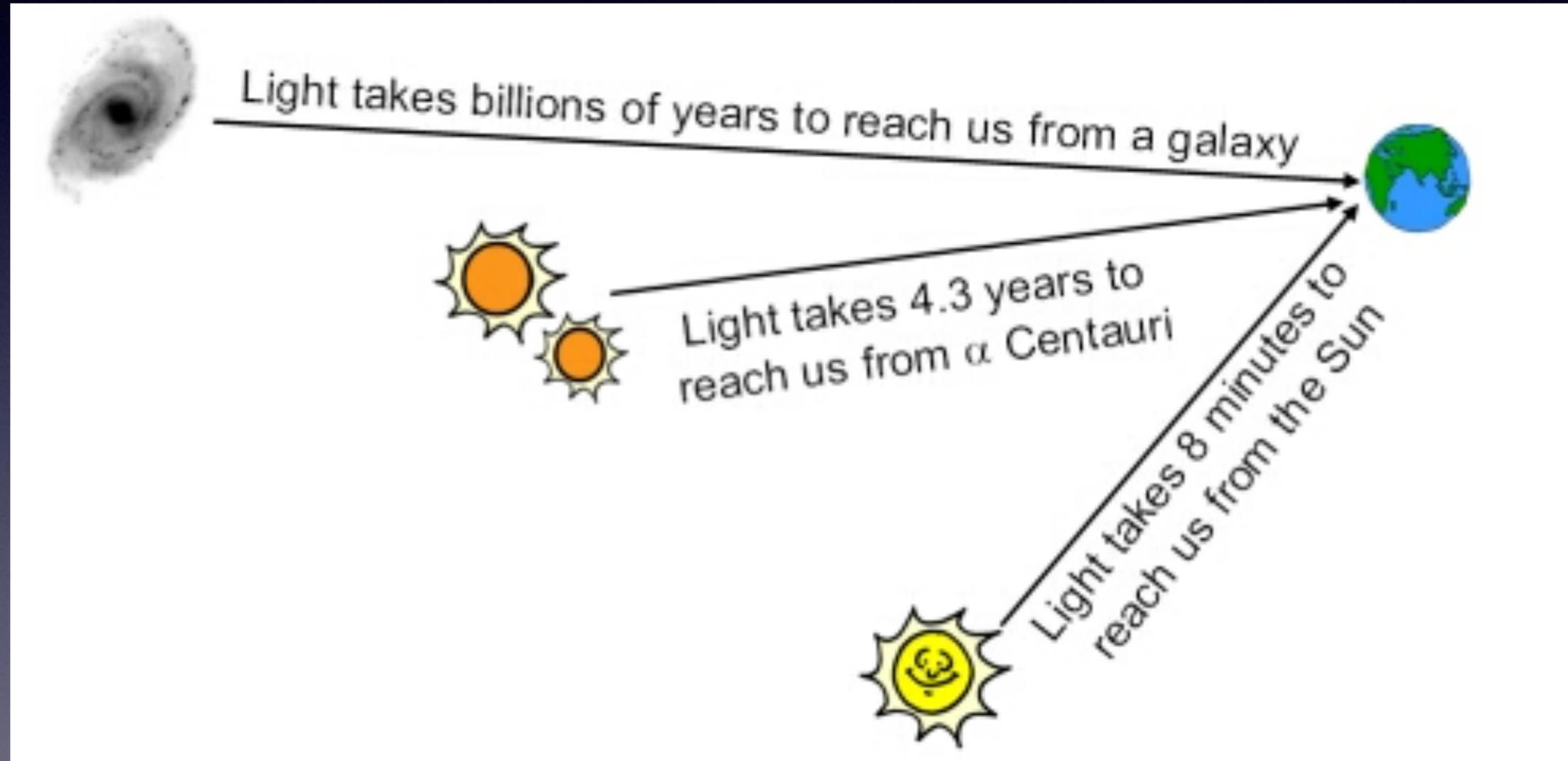
$$t = \frac{28}{1 + (1 + z)^2}$$

- Dove  $t$  e' espresso in miliardi di anni (Carmeli et al. 2005).  $z=0$  e' 14 Gyr

# Il look back time

- Poiche' l'universo si espande, quando misuriamo la distanza di un oggetto lontano dovremmo tenere conto del fatto che l'oggetto in questione si e' spostato nel lungo tempo impiegato dalla luce a raggiungerci
- Questo fatto rende difficile la misura delle distanze
- Per questo gli astronomi usano il "look back time" ovvero il tempo che la luce emessa da un oggetto ha impiegato per raggiungerci

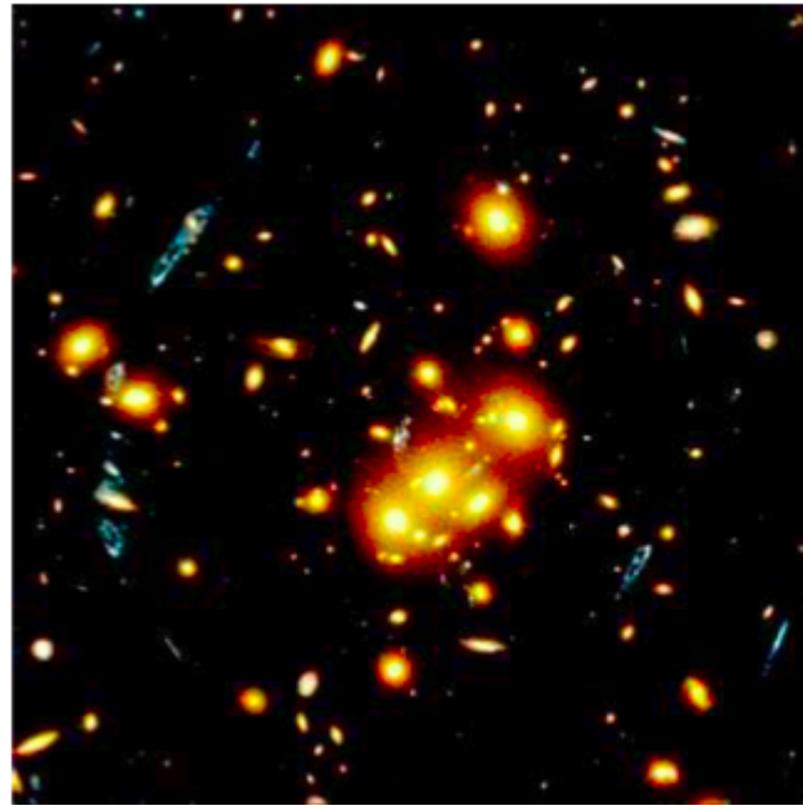
# Look back time



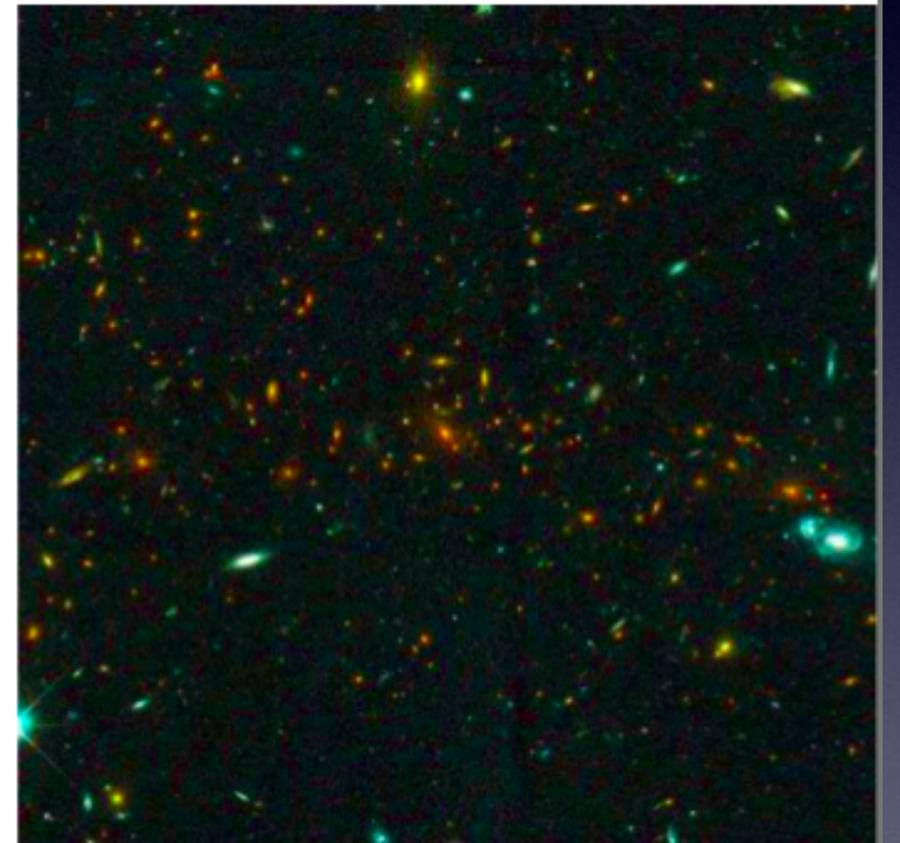
# Ammassi di galassie a diversi redshifts



**$z=0$**



**$z=0.39$**



**$z=0.83$**

# Ammassi di galassie

- Si può misurare la dispersione delle velocità delle galassie in un ammasso
- Il redshift ha due componenti: una dipende dal flusso di Hubble (espansione dell'universo), e l'altra dalla velocità peculiare della galassia nell'ammasso
- Il redshift globale di una galassia è:

$$1 + z = (1 + z_{cl}) \cdot (1 + z_{pec}) = (1 + z_{cl}) \cdot (1 + v_{pec}/c)$$

# Ammassi di galassie

- Questo implica:

$$v_{pec} = \frac{(cz - cz_{cl})}{(1 + z_{cl})}$$

- dove  $z_{cl}$  e' il redshift medio dell'ammasso. Il redshift piu' alto finora misurato e'  $z=1.6$

# Ammassi di galassie

- La dispersione di velocità delle galassie lungo la linea di vista in un ammasso è data da:

$$\langle V_{pec} \rangle^2 = \sigma_r$$

- La dispersione varia da 350 Km/sec per Fornax, a 700 Km/sec per Virgo a >1000 km/sec per Coma
- Gli ammassi di galassie sono stabili? Il tempo di crossing di una galassia in un ammasso, con R raggio dell'ammasso è:

$$t_{cr} = 2R/\sigma_r$$

# Ammassi di galassie

- Il tempo di crossing espresso in anni e':

$$t_{cr} = 6 \cdot 10^8 (R/1Mpc)(\sigma_r/1000km/sec)^{-1}$$

- Utilizzando valori tipici di un ammasso per R (1 Mpc) e la dispersione delle velocità (1000 km/sec), si ottiene un tempo di crossing dell'ordine di 1 miliardo di anni
- Pertanto una galassia può aver attraversato l'ammasso molte volte durante la vita dell'universo
- Se gli ammassi non fossero gravitazionalmente legati si disperderebbero in poche centinaia di milioni di anni

# Masse degli ammassi

- La massa Viriale di un ammasso si trova applicando il teorema del Viriale:

$$M_{cl} = \frac{3R_e\sigma_r}{G}$$

- con  $R_e$  raggio effettivo o di meta' luce dell'ammasso
- Valori tipici per la massa di un ammasso sono:  $2 \times 10^{15} M_{sun}$  per un ammasso ricco come Coma,  $10^{14} M_{sun}$  per Virgo
- Se sommiamo invece tutte le luminosita' delle galassie di Virgo troviamo  $1.3 \times 10^{12} L_{sun}$  e per Coma  $6 \times 10^{12} L_{sun}$
- Questo implica  $M/L=300 (M_{sun}/L_{sun})$  e quindi la presenza di **notevole materia oscura**

# Massa oscura nella nostra Galassia

- La curva di rotazione Galattica implica che la sua massa **entro 20 kpc sia circa  $2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$** , mentre a grandi distanze le orbite dei satelliti della Galassia e le loro velocità indicano una massa totale di circa  **$10^{12} M_{\text{sun}}$  entro 100 kpc**
- Questo implica un  $M/L=50$  molto maggiore di quello corrispondente alla materia barionica (stelle vive e morte)
- La maggior parte di tale materia oscura deve essere di natura **esotica**, non barionica

# Natura della materia oscura

- E' tuttavia possibile che una frazione non trascurabile della materia oscura sia costituita da oggetti fatti di barioni invisibili (cadaveri stellari, nane brune, H molecolare) ma macroscopici Macroscopic Astrophysical Compact Halo Objects (**MACHOs**), identificabili attraverso le lenti gravitazionali
- Oppure sono particelle non ancora note, indicate col nome di Weakly Interacting Massive Particles (**WIMPs**)

# Masse degli ammassi

- Un altro metodo e' quello della lente gravitazionale. La luce proveniente da un oggetto sullo sfondo di un ammasso di galassie viene deflessa dalla gravita' dell'ammasso ed appare come se provenisse da un altro punto lontano dall'ammasso
- Ogni punto nell'immagine viene spostato radialmente in fuori e l'intera immagine apparira' come un **arco tangente** alla direzione del centro dell'ammasso (allineamento sorgente, lente e osservatore)
- La luce che passa ad una distanza  $b$  dalla massa  $M$  e' deviata di un angolo

$$\alpha = \frac{4GM}{bc^2}$$

# Lente Gravitazionale. (Abell 2218)



# Massa degli ammassi da luminosità X

- Attraverso l'emissione X dal gas intracluster si può risalire al potenziale gravitazionale necessario a tenere legato il gas all'ammasso

$$M_{cl}(r) = (2K_B/m_p G)(r^2/\rho(r))d/dr(-\rho T)$$

- dove la densità si ottiene dalla luminosità X e T dagli spettri e  $K_B$  è la costante di Boltzmann

# Ammassi negli X

- Gli ammassi di galassie contengono gas estremamente caldo con temperatura da pochi milioni a centinaia di milioni di gradi Kelvin che viene rivelato da osservazioni negli X (riga del FeXXVI in emissione)
- Anche le abbondanza di altri elementi, quali ossigeno e magnesio vengono misurate

# Ammassi negli X

- Sia Virgo che Coma contengono circa  $10^{13}$  Msun di gas, che è molto maggiore della massa in stelle nelle galassie ma molto minore della massa dinamica
- Questo implica la presenza di materia oscura e anche che la maggior parte del gas intracluster sia di origine primordiale
- Tuttavia questo gas contiene anche metalli ovviamente provenienti dalle galassie dell'ammasso, che li hanno espulsi attraverso i venti galattici, e in particolare tutti gli ammassi regolari presentano un'abbondanza di circa  $0.3 Z_{\text{sun}}$
- Questi metalli possono venire espulsi dalle galassie (essenzialmente Es e S0s) attraverso i venti oppure per ram pressure stripping, dovuto al moto delle galassie nel mezzo intracluster

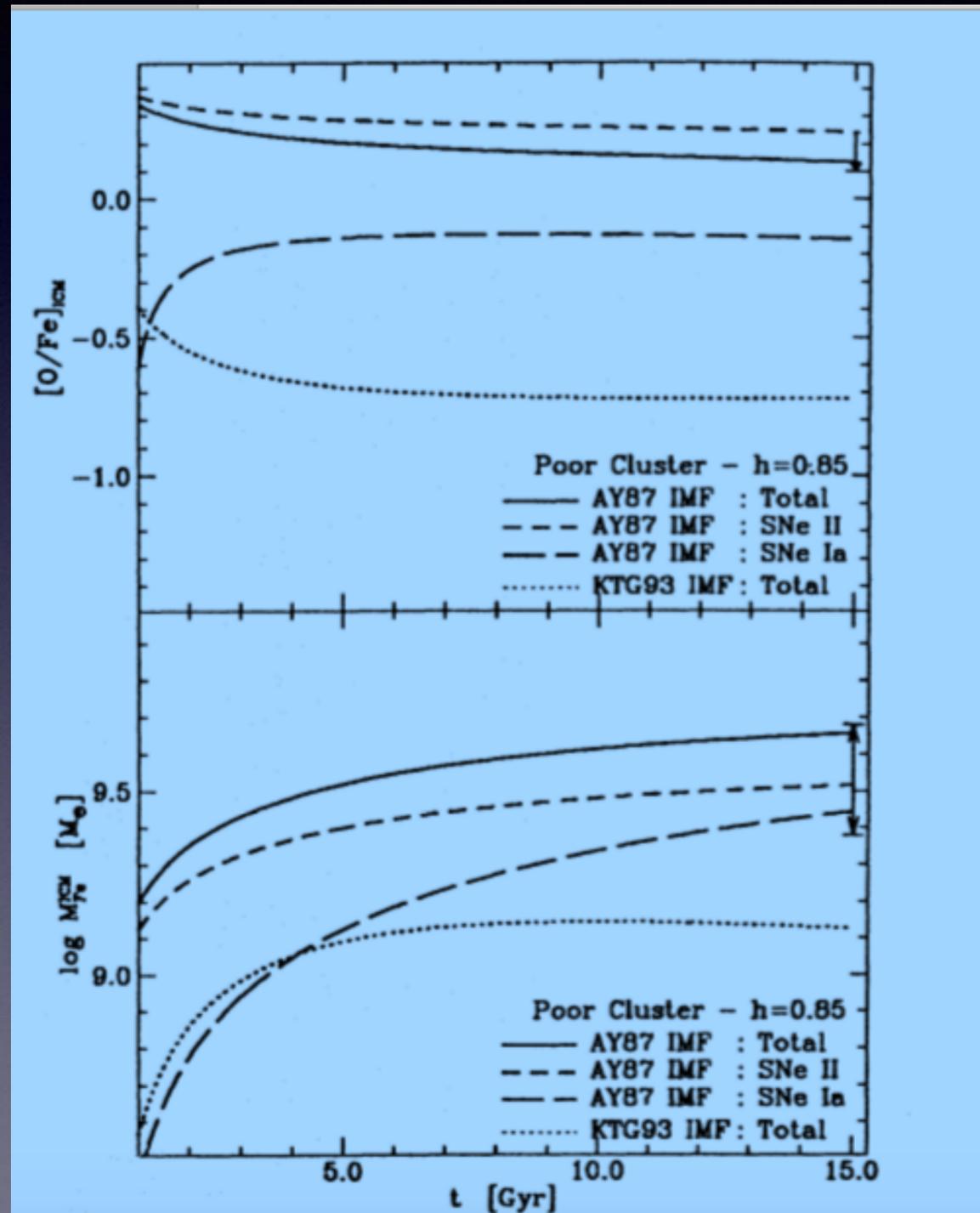
# Ram pressure stripping



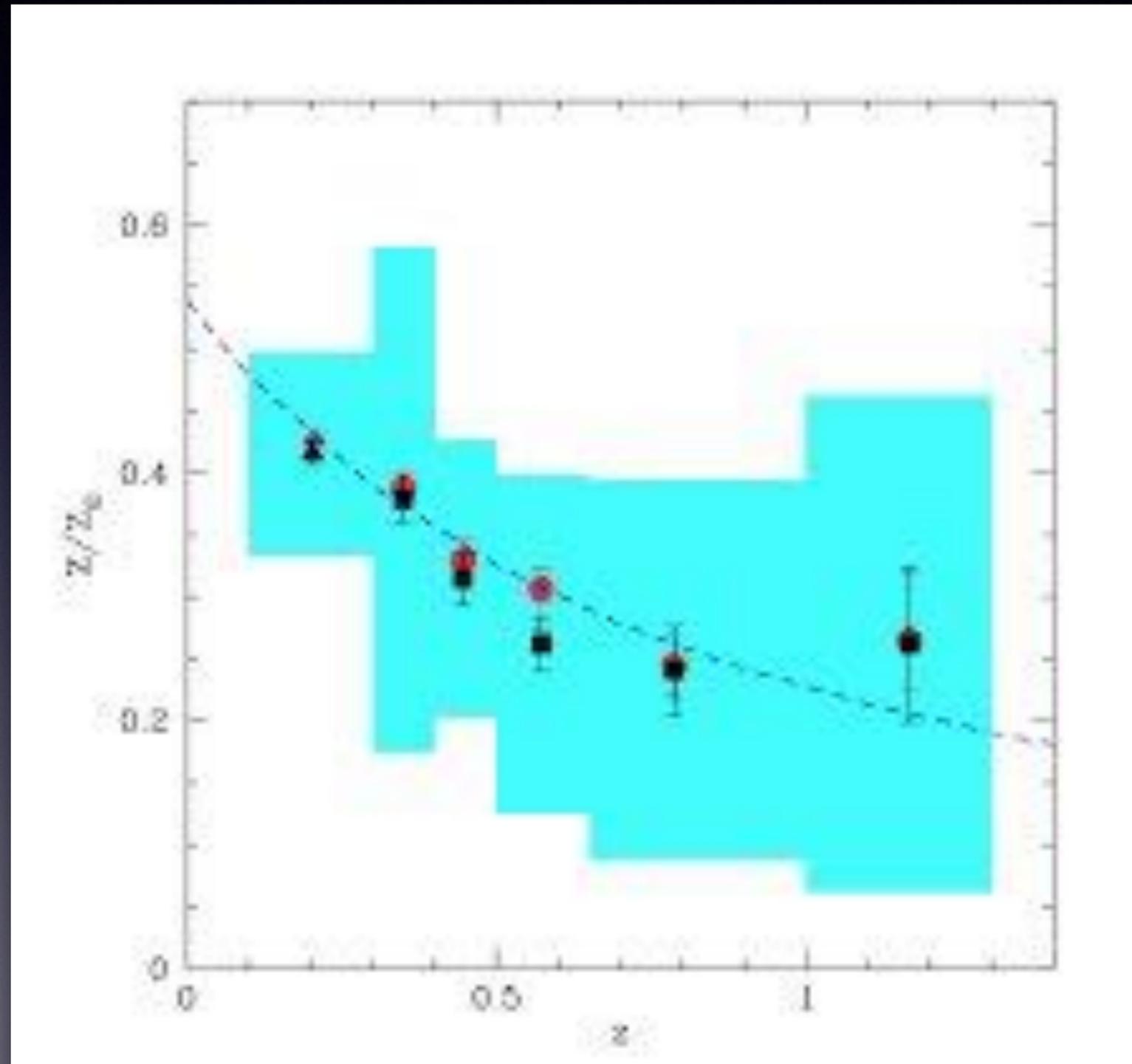
# Fe ed altri elementi nel gas intracluster

- Modelli di evoluzione chimica delle galassie ellittiche possono venire usati per predire l'abbondanza di Fe e altri elementi nel mezzo intracluster
- Si integra il contributo al Fe delle singole galassie sulla funzione di massa delle galassie nell'ammasso (ottenuta dalla funzione di luminosità')
- Si assume che le Es evolvano grazie ad un intenso burst di formazione stellare seguito da un forte vento galattico indotto dalle esplosioni di SNe ed eventualmente dall'AGN centrale

# Evoluzione chimica del mezzo intraccluster: risultati di modelli



# Evoluzione del Fe nel gas intracluster: dati osservativi

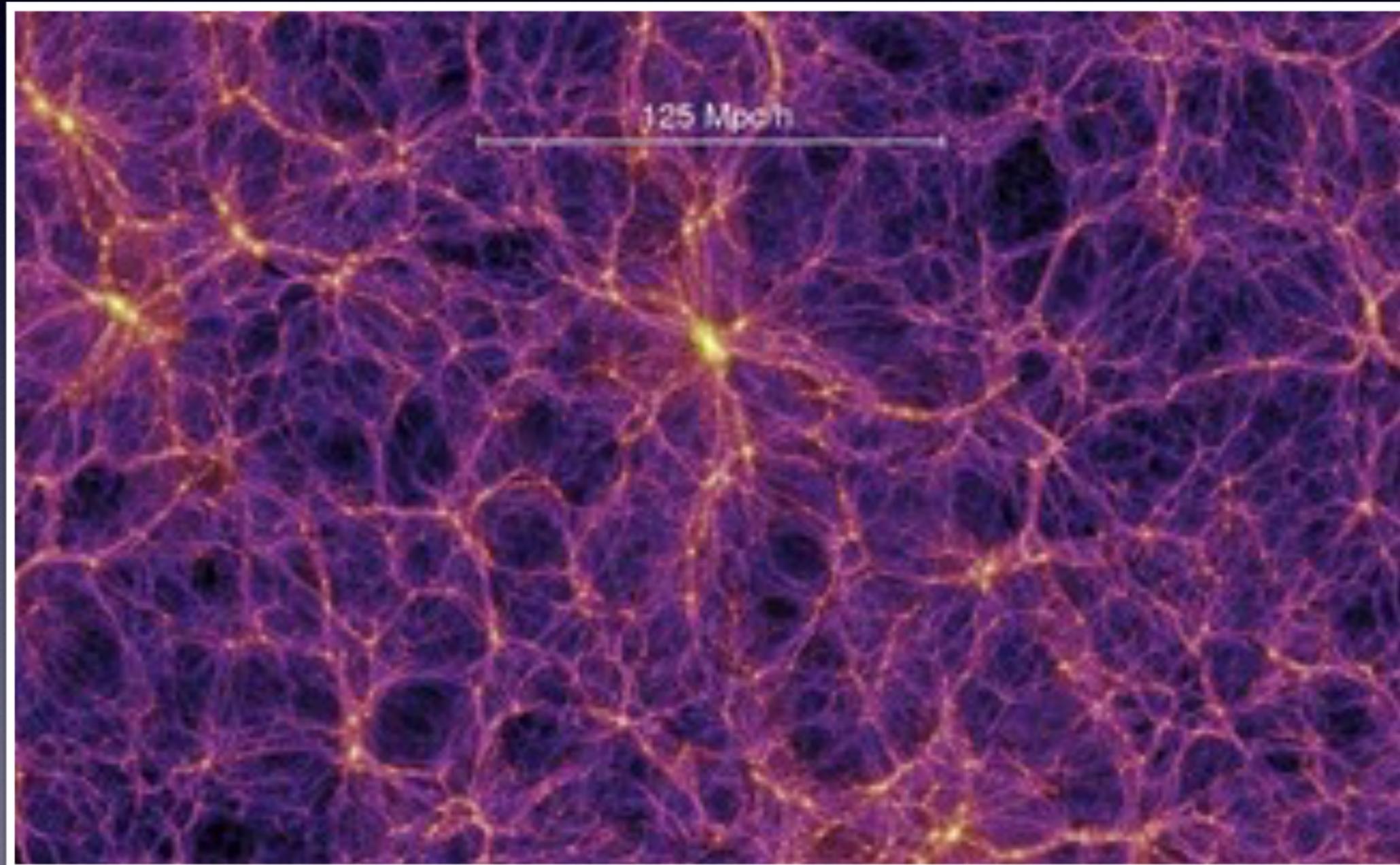




# Struttura a larga scala

- Già' nel 1930 Shapley e Hubble avevano notato l'irregolarità della distribuzione delle galassie nel cielo
- Successive survey osservative hanno confermato la distribuzione non-uniforme e suggerito una struttura filamentare
- Per capire la distribuzione delle galassie in 3D occorre conoscere le loro distanze, ovvero i redshifts. Il futuro telescopio EUCLID misurerà le distanze di 50 milioni di galassie!
- Grazie alla CfA Survey si vede che le galassie formano dei muri "great walls" separati da immensi vuoti (voids)

Simulazioni di struttura a larga scala-Distribuzione della materia oscura (viola) che traccia anche la distribuzione della materia luminosa (gas in giallo) (Springel et al. 2015)



# Il mezzo intergalattico

- La struttura del mezzo intergalattico consiste dunque di filamenti di galassie ed enormi e desolati spazi vuoti che occupano la maggior parte del volume dell'Universo
- E' composto da un gas molto caldo che emette nella banda X
- La composizione chimica del mezzo intergalattico presenta una frazione di metalli inferiore a quella misurata nel mezzo intracluster (gas dentro gli ammassi di galassie)
- Questi metalli (circa  $0.03 Z_{\text{sun}}$ ) derivano certamente dai venti delle galassie di campo

# Cosmologia

- La cosmologia e' la scienza che studia l'universo e le sue proprieta', la sua formazione e la sua evoluzione
- Nei suoi primissimi stadi evolutivi l'universo subi' una rapidissima espansione (fase inflazionistica) che creo' piccole fluttuazioni iniziali nella densita' di materia. La gravita' fece crescere queste fluttuazioni e la materia inizio' ad accumularsi, a formare stelle, galassie ed ammassi di galassie
- Questo processo creo' la struttura a larga scala dell'Universo

# Il paradosso di Olbers (1826)

- Quanto sarebbe luminoso il cielo notturno se la distribuzione delle stelle fosse infinita?

- Il Flusso da una stella e':  $f = \frac{L}{4\pi r^2}$

- L'intensità di radiazione da un anello di stelle per steradiante e':  $dJ = \frac{L}{4\pi r^2} nr^2 dr$

- Dove la densità  $n$  e' supposta costante

- Se l'universo e' infinito, ne consegue:

$$J = \int_{r=0}^{r=\infty} dJ = \frac{nL}{4\pi} \int_0^{\infty} dr = \infty$$

# Il paradosso di Olbers

- Quindi la notte dovrebbe essere illuminata a giorno mentre e' buia!!
- Possibili soluzioni a questo paradosso sono:
- L'universo non e' **infinito**
- L'universo non e' **statico**
- **La legge di Hubble-Lemaitre implica che l'universo non e' statico!**

# COSMOLOGIA

- La teoria classica del Big Bang e' basata su due fatti fondamentali:
- 1) Il moto di recessione delle galassie:  $v=H_0 r$
- 2) La radiazione (di corpo nero) di fondo dell'universo (CMB)  
 $T=2.7 K$
- La 1) e la 2) consentono l'accesso a tempi non al di sotto dell'era della ricombinazione (300.000 anni dopo il Big Bang)
- Lo studio della nucleosintesi primordiale fornisce l'unico modo di accedere ai primi istanti di vita dell'Universo

# COSMOLOGIA

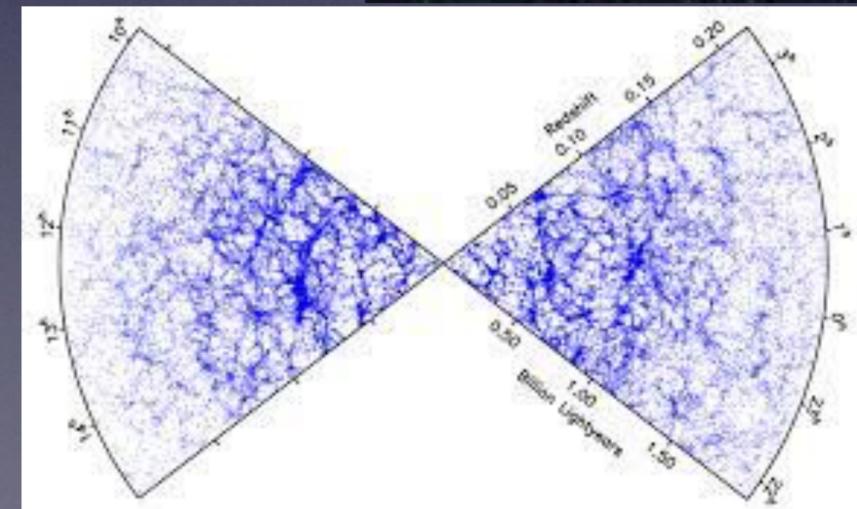
- Nei primi 100 secondi di vita dell'Universo si formarono gli elementi leggeri, H, D, He, Li
- Quindi e' solo attraverso lo studio della nucleosintesi primordiale che riusciamo a studiare i primi tre minuti dell'Universo
- In un qualsiasi modello di Big Bang caldo dobbiamo assumere che:
  - 1) L'universo dovette essere caldo abbastanza ( $T > 10^{13}$  K) da assicurare equilibrio statistico tra le diverse particelle
  - 2) Deve valere il principio di equivalenza: le leggi della Fisica che governano oggi l'evoluzione della materia devono sempre essere state tali
- Nel modello **standard del Big Bang** dobbiamo aggiungere il **Principio Cosmologico**
- **Principio Cosmologico** : l'universo e' isotropo ed omogeneo
- **Vale la metrica di Robertson-Walker**

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) [du^2 / (1 - ku^2) + u^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta \phi^2)]$$

- in coordinate sferiche comoventi

# L' Universo e' isotropo ed omogeneo

- Le prove osservative dell'isotropia dell'universo sono visibili in queste immagini di Hubble Space Telescope prese a Nord (sinistra) e a Sud (destra), dove appare lo stesso in ogni direzione
- L'universo e' anche omogeneo, ovvero e' lo stesso in ogni punto purché si guardi a grandi volumi ( $>100$  Mpc). Immagine di 2dF Galaxy Redshift Survey
- Non esiste un punto privilegiato



# COSMOLOGIA

- $R$  e' il fattore di espansione dell'universo
- $k$  e' il parametro di curvatura ( $k=1$  universo aperto,  $k=0$  universo piatto,  $k=-1$  universo chiuso)
- La costante di Hubble e':

$$H = \frac{1}{R} \frac{dR(t)}{dt}$$

# COSMOLOGIA

- Le equazioni di Einstein correlano le proprietà geometriche dello spazio-tempo con il tensore energia-momento
- In un universo isotropo ed omogeneo la soluzione delle equazioni di Einstein fornisce le equazioni di Friedmann (la distribuzione di materia su larga scala è considerata un fluido perfetto)
- È impossibile costruire un modello di universo a partire dalla legge di Gravitazione Universale di Newton

# Tensore di Einstein

Equazione del campo gravitazionale

Tensore  
di Einstein

Costante

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}$$

Tensore di Curvatura  
(di Ricci Curbastro)

Tensore Metrico

Scalare di Curvatura

Tensore  
Energia-Impulso

# La costante cosmologica

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- La costante cosmologica fu inserita da Einstein con l'intento di rendere l'universo statico. Il piu' grande errore di Einstein

# COSMOLOGIA

- La legge di gravitazione universale di Newton prevede che (equazione di Poisson):

$$\nabla^2 \Phi(r) = 4\pi G \rho(r)$$

- dove

$$\Phi(r) \propto r^2$$

- in contrasto col Principio Cosmologico

# COSMOLOGIA

- Si puo' tuttavia mostrare che le equazioni di Friedmann si possono ottenere a partire dalla dinamica newtoniana grazie al teorema di Birkhoff
  - “In condizioni di simmetria sferica (per una distribuzione di materia isotropa ed omogenea) l'evoluzione all'interno di una sfera di raggio  $r$  non e' influenzata dalla materia al di fuori di  $r$ ”

# COSMOLOGIA

- Consideriamo una galassia di massa  $m$  ad una distanza  $R$  in un universo isotropo ed omogeneo
- La sua energia è:

$$E = E_{kin} + E_{pot} = 1/2m\dot{R}^2 + GmM/R$$

- Dove  $M$  e' la massa racchiusa entro il raggio  $R$  e la legge di Hubble e' data da:

$$\dot{R} = HR$$

# COSMOLOGIA

- Essendo la massa  $M$  espressa come:

$$M(R) = 4/3\pi R^3 \rho$$

- Si ha che

$$E = 1/2m(HR)^2 - 4/3\pi Gm\rho R^2$$

- Da cui:

$$2E/mR^2 = H^2 - 8\pi G\rho/3$$

# COSMOLOGIA

- Poiche'  $m$  e' un valore arbitrario possiamo sceglierlo in modo che  $2E/mc^2 = k$  sia uguale a 1, 0, -1 e possiamo riscrivere la precedente equazione come:

$$kc^2/R^2 = H^2 - 8\pi G\rho/3$$

- che e' l'equazione di Friedmann. Essa connette l'espansione dell'universo con la sua densita' di energia
- Se  $k=0$  implica che  $\rho = \rho_{cr} = 3H^2/8\pi G$

# Valore numerico della densità critica

$$\rho_{cr} = 2.778 \cdot 10^{11} h^2 M_{\odot} Mpc^{-3}$$

- Dove  $h=H_0/100$  e tiene conto dell'incertezza sul valore della costante di Hubble
- In grammi per  $cm^3$  la densità critica e':
- $10^{-29} \text{ gr/cm}^3$  ovvero un granello di sabbia rispetto al volume della Terra
- La densita' della materia visibile che misuriamo nell'universo e' molto minore di quella critica

# COSMOLOGIA

- Definiamo  $\Omega = \rho / \rho_{cr}$

- E quindi  $\rho > \rho_{cr}$

- implica  $k=1$

$$\rho = \rho_{cr}$$

- implica  $k=0$

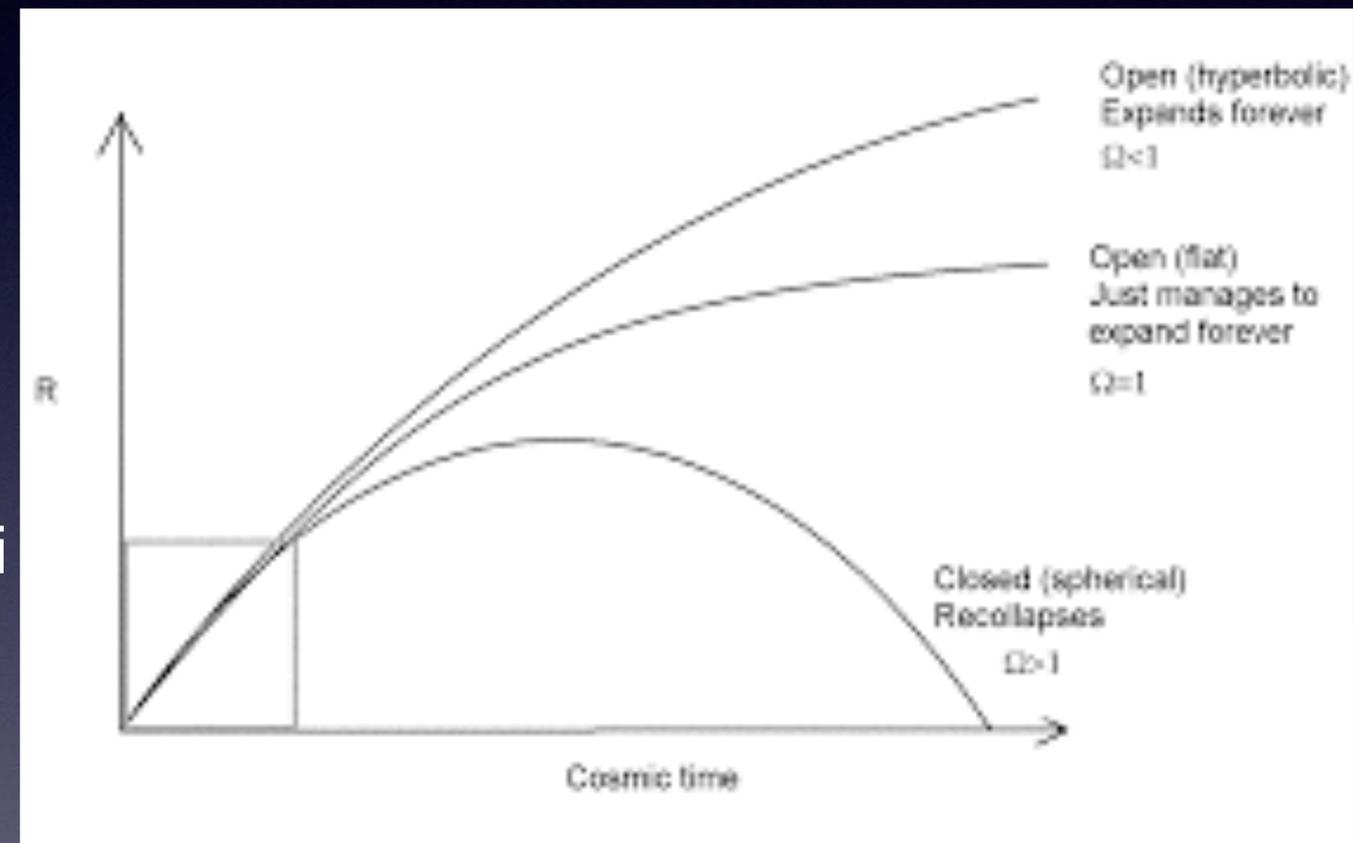
$$\rho < \rho_{cr}$$

- implica  $k=-1$

- Quindi  $\Omega > 1$  significa universo chiuso, finito,  $\Omega$  uguale o minore ad 1 universo infinito

# Evoluzione dell'universo

- Esempi di come cambiano le dimensioni dell'universo a seconda del valore del parametro di densità Omega
- Se vale 1 l'universo è piatto e si espanderà per sempre, se è  $<1$  l'universo si dice aperto e si espanderà per sempre in maniera iperbolica
- Se vale  $>1$  l'universo è chiuso e ad un certo punto ricollasserà su se stesso



# COSMOLOGIA

- La costante cosmologica fu introdotta da Einstein per rendere l'universo statico
- Cio' fu dovuto al fatto che gli astronomi dell'epoca credevano che tutte le stelle visibili intorno a noi appartenessero alla Galassia
- L'espansione dell'universo decretò la fine della costante cosmologica  $\Lambda$
- Le SNe e la CMB ne hanno decretato il ritorno!

# COSMOLOGIA

- L'equazione di Friedmann con la costante cosmologica diventa:

$$H^2 = 8\pi G\rho/3 - kc^2/R^2 + \Lambda/3$$

- Per Lambda diverso da zero la relazione densita' = densita' critica (k=0) vale ancora se il contributo di Lambda è incluso nella densita' di energia  $\rho$

$$8\pi G\rho_\Lambda/3 = \Lambda/3$$

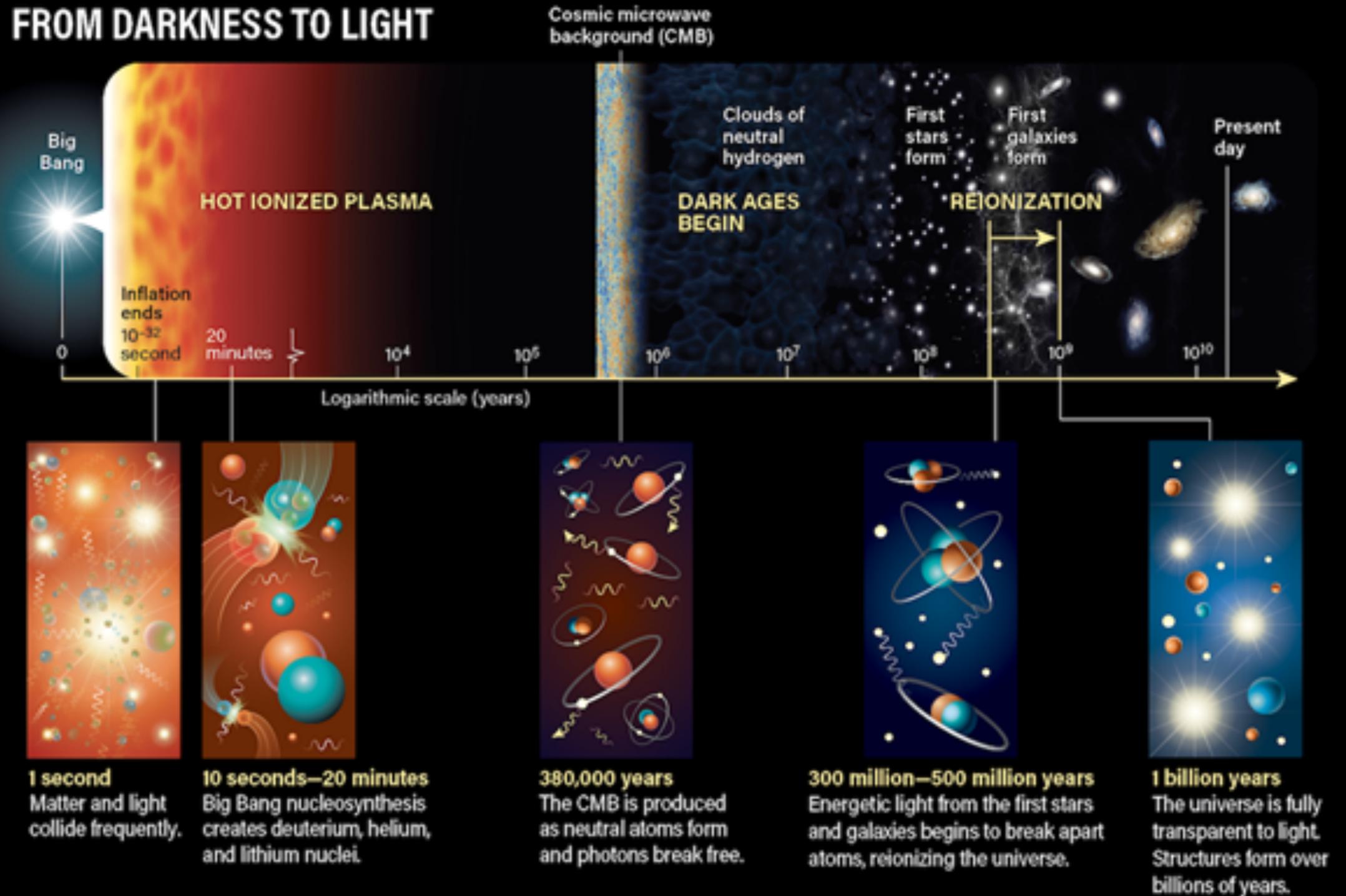
- La costante cosmologica agisce come una densita' di energia costante:  $\rho_\Lambda = \Lambda/8\pi G$
- e questo implica:  $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2$

# Dalla costante cosmologica alla energia oscura

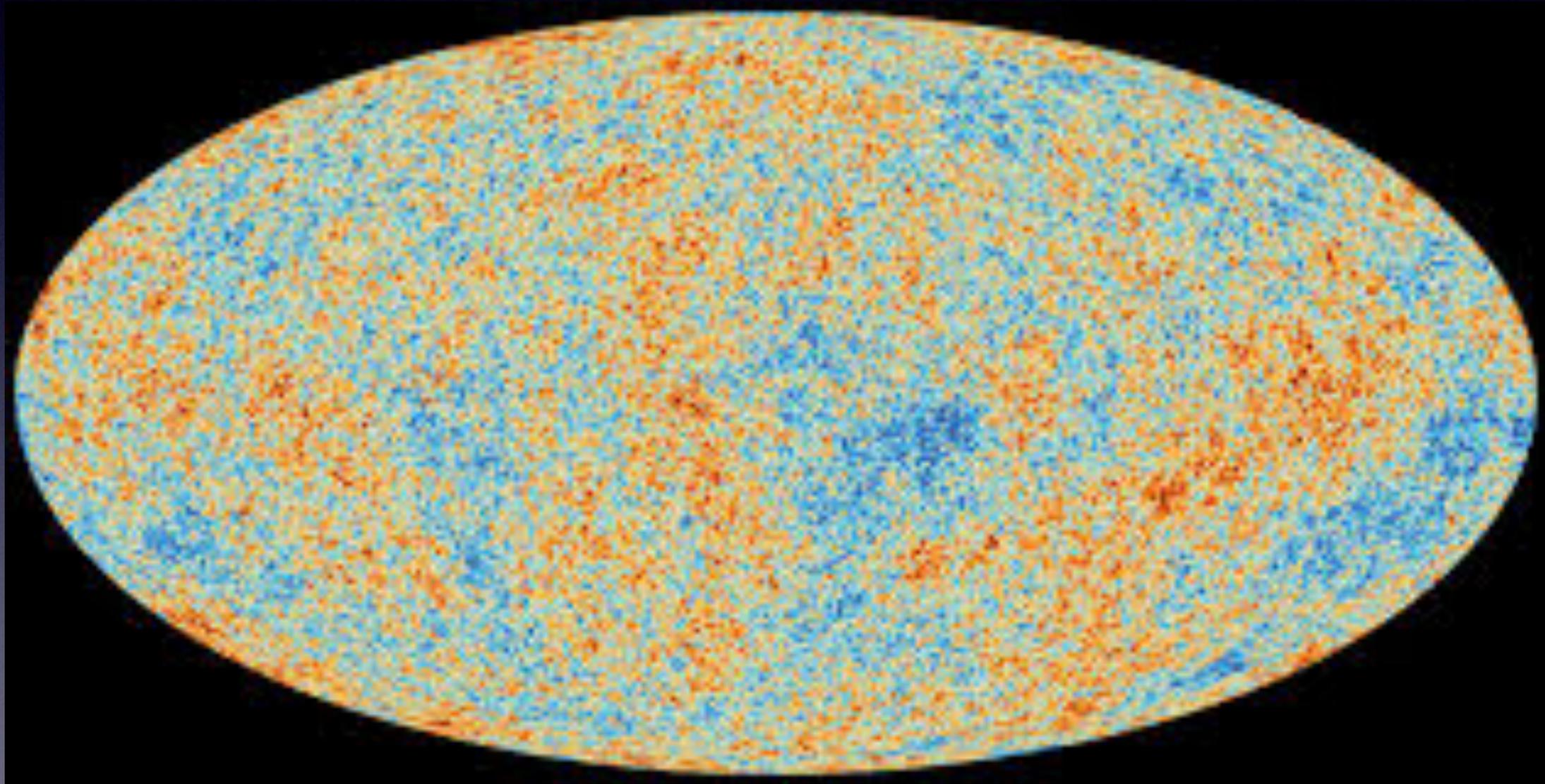
- La costante cosmologica di Einstein e' stata in qualche modo resuscitata dalla dark energy
- In realta' la costante cosmologica frenava l'espansione dell'universo mentre la dark energy lo accelera
- La similitude sta nel fatto che ambedue sono costanti nel tempo

# Dal buio alla luce

## FROM DARKNESS TO LIGHT



La radiazione cosmica di fondo (CMB)-  
una foto dell'universo a 380.000 anni dal  
Big Bang-Planck



# La radiazione cosmica di fondo

- Nel 1965 Penzias e Wilson misurarono un fondo di radiazione nelle microonde assolutamente isotropo
- Questo fondo ha lo spettro di un corpo nero corrispondente ad una temperatura di circa 2.7K
- La scoperta fu premiata col Nobel nel 1978
- La densita' di energia di fotoni evolve come  $(1+z)^4$  e poiché' la densita' di energia va come  $aT^4$  la temperatura va come

$$T_{\gamma} = T_{\gamma_0}(1 + z)$$

# La radiazione cosmica di fondo

- La densita' di materia evolve come  $(1+z)^3$ , essendo proporzionale a  $T^3$ , il che implica

$$\rho_\gamma / \rho_m \propto (1+z)$$

- Ad alto redshift l'universo era dominato dalla radiazione, ora e' dominato dalla materia
- Le fluttuazioni della temperatura della CMB sono legate al potenziale gravitazionale all'epoca della ricombinazione ( $z_{\text{rec}}=1000$ ) prima che radiazione e materia si disaccoppiassero

- Quindi 
$$\delta T / T = \frac{1}{3} \delta \phi / \phi$$

# Fluttuazioni primordiali

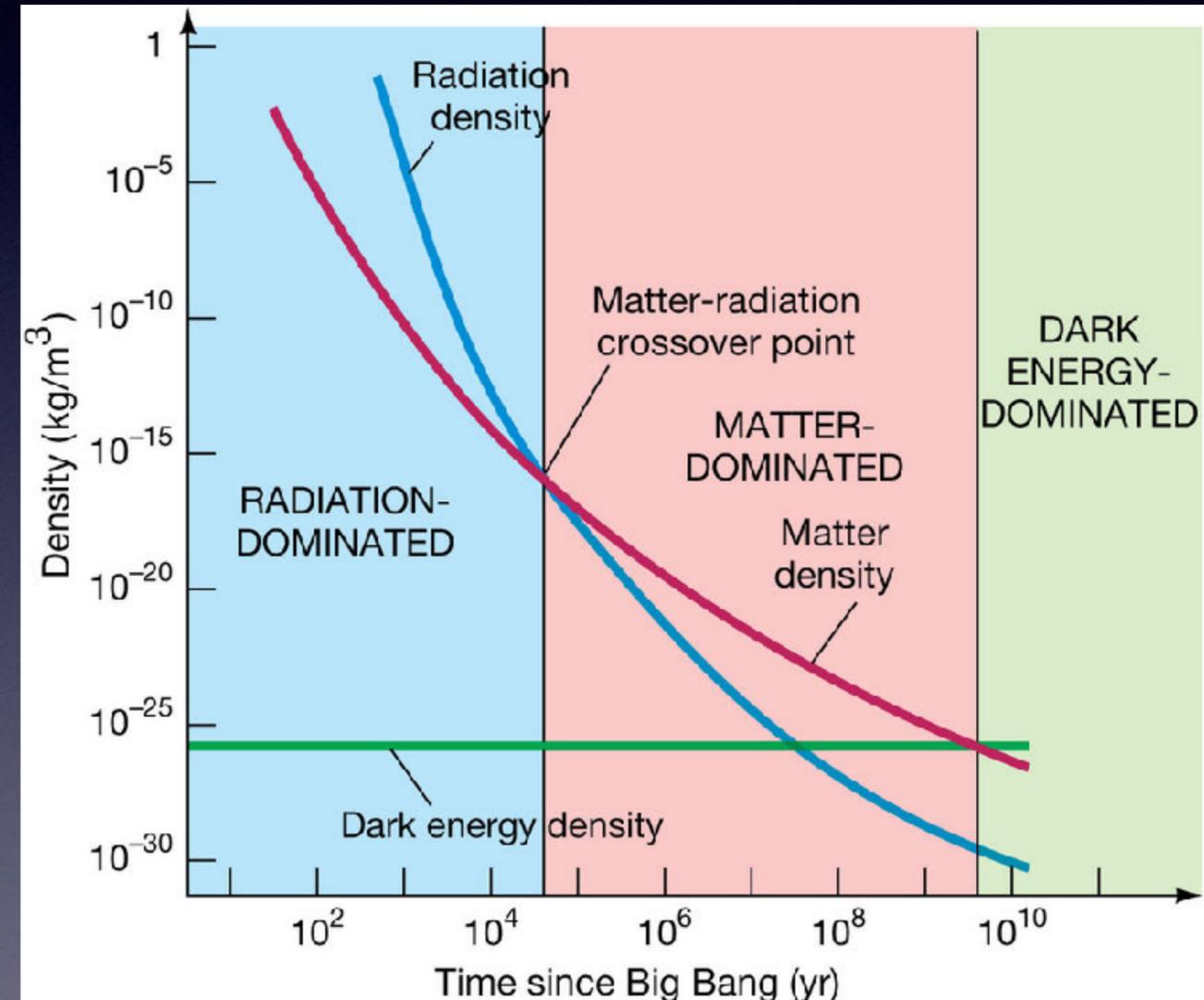
- Il satellite COBE fu il primo a misurare l'anisotropia del fondo cosmico ottenendo:

$$\delta T/T = 1.8 \cdot 10^{-5}$$

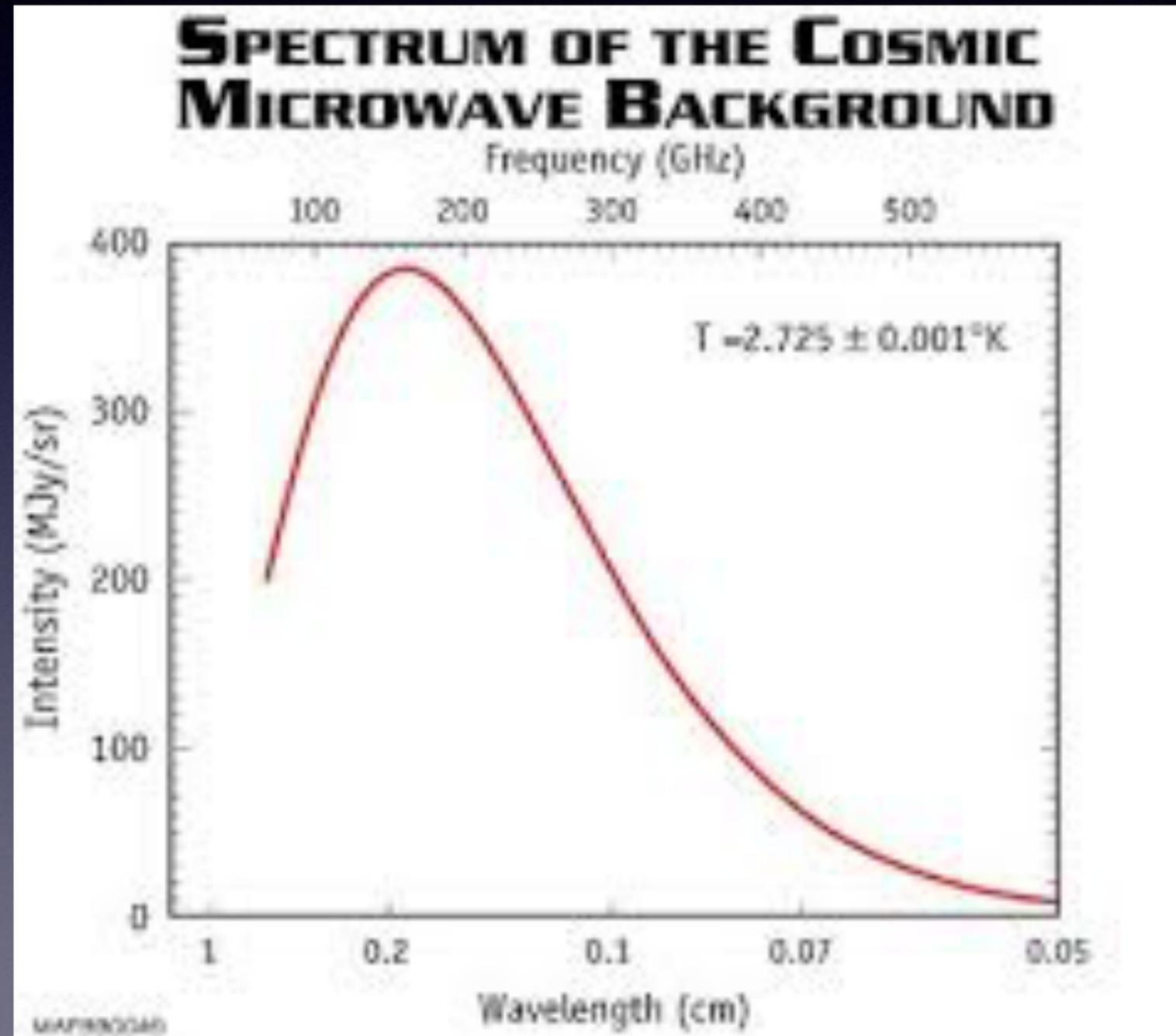
- Su scale angolari di 7 gradi

# Radiazione, materia ed energia oscura

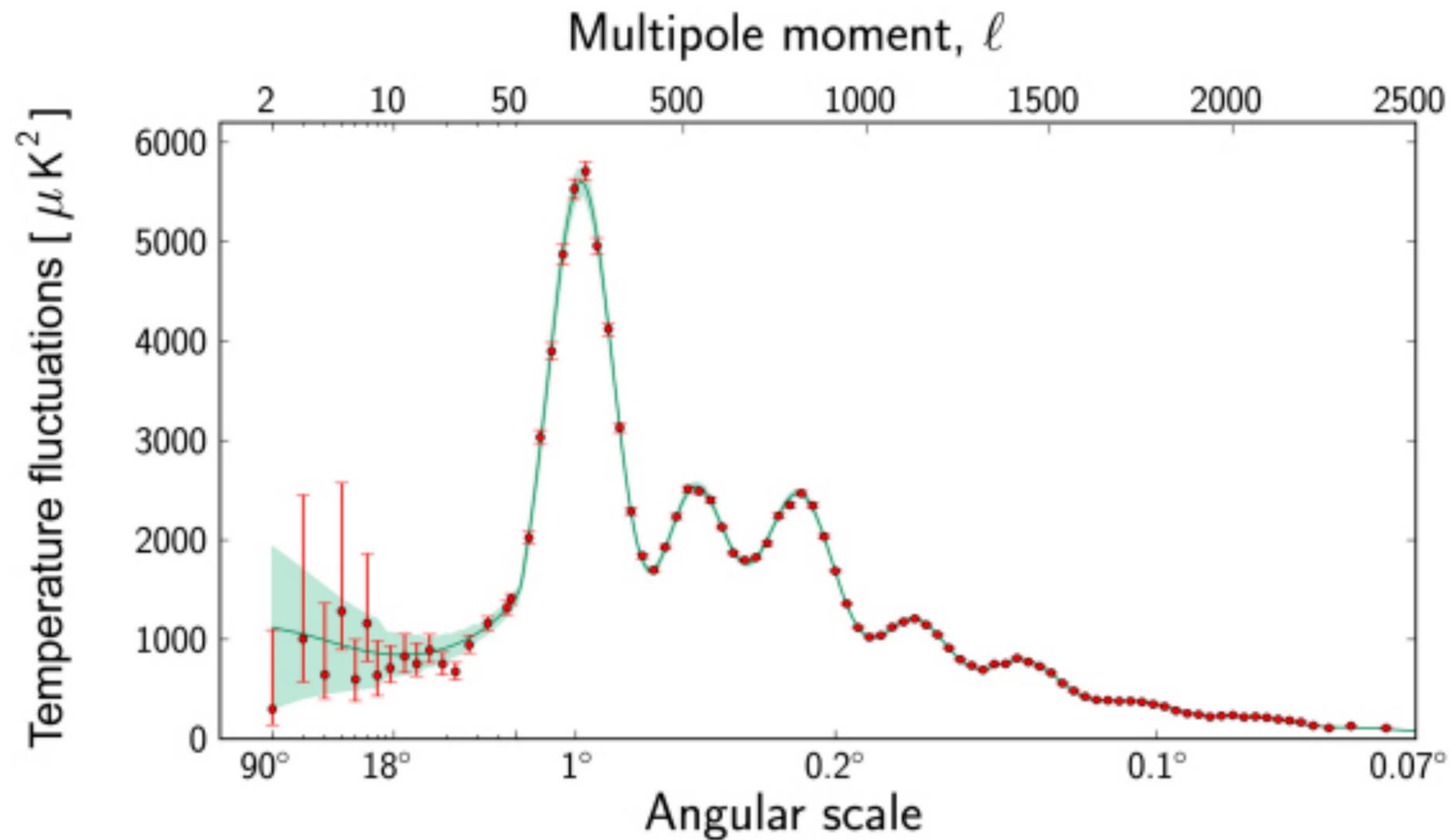
- Una breve storia dell'universo
- La radiazione domino' dal Big Bang fino a  $z=3300$
- La materia domino' nell'epoca  $3300 > z > 0.3$
- La dark energy domino' da  $z < 0.3$ , ovvero a partire da 6 miliardi di anni fa



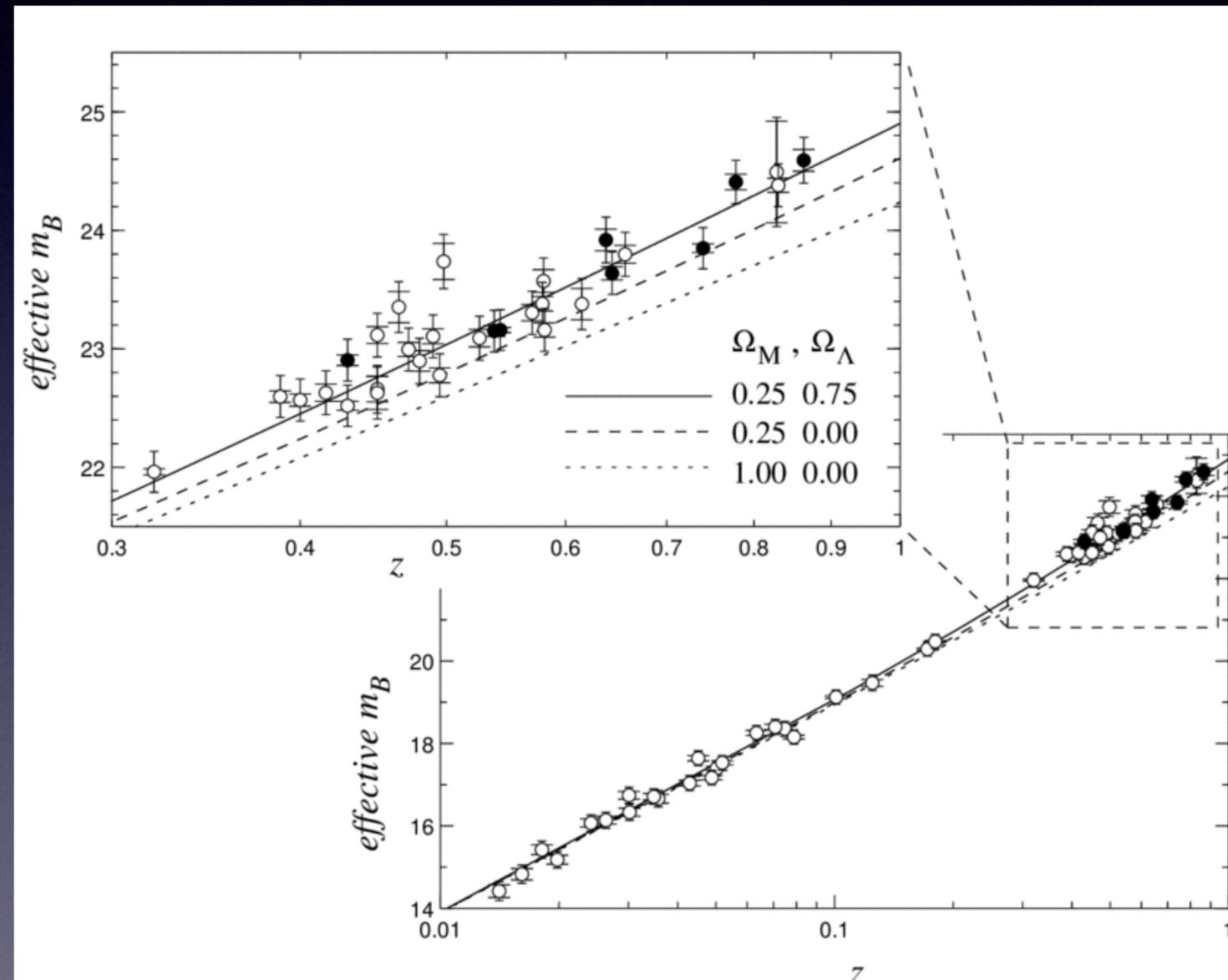
# La radiazione di fondo cosmica (CMB)- Spettro di corpo nero a $T=2.7\text{K}$



# Fluttuazioni nella CMB dal satellite Planck



# La legge di Hubble-Lemaitre costruita con le SNe Ia



# Tutte le componenti dell'Universo nel modello LambdaCDM

- Dalle fluttuazioni della CMB e dalle SNe Ia si sono derivate le componenti dell'universo:
- La materia luminosa: stelle gas
- La materia normale non visibile (barioni dark): resti stellari e stelle mancanti
- La materia oscura non-barionica
- L'energia oscura
- La radiazione

# Tutte le componenti dell'Universo

- Ogni componente ha una densità media ed un parametro di densità

$$\Omega_i = \rho_i / \rho_{crit}$$

$$\rho_{crit} = 0.921 \cdot 10^{-24} h_{70}^2 \text{gr cm}^{-3}$$

- Il parametro di densità totale è:

$$\Omega_{tot} = \sum_i \Omega_i$$

# L'Universo LambdaCDM

- Lo studio delle fluttuazioni della temperatura della CMB e il diagramma di Hubble costruito con le SNe Ia hanno portato a derivare i seguenti parametri cosmologici

$$\Omega = \Omega_\lambda + \Omega_m = 1$$

$$H_0 = 71_{-3}^{+4} \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$1/H_0 = 13.8 \text{ Gyr}$$

$$\eta = n_B/n_\gamma = 6.23 \pm 0.17 \cdot 10^{-10}$$

# Rapporto barioni/fotoni e densita' barionica dell'Universo

- Il rapporto barioni/fotoni e' direttamente collegato ad  $\Omega_B$  ovvero alla densita' barionica dell'Universo

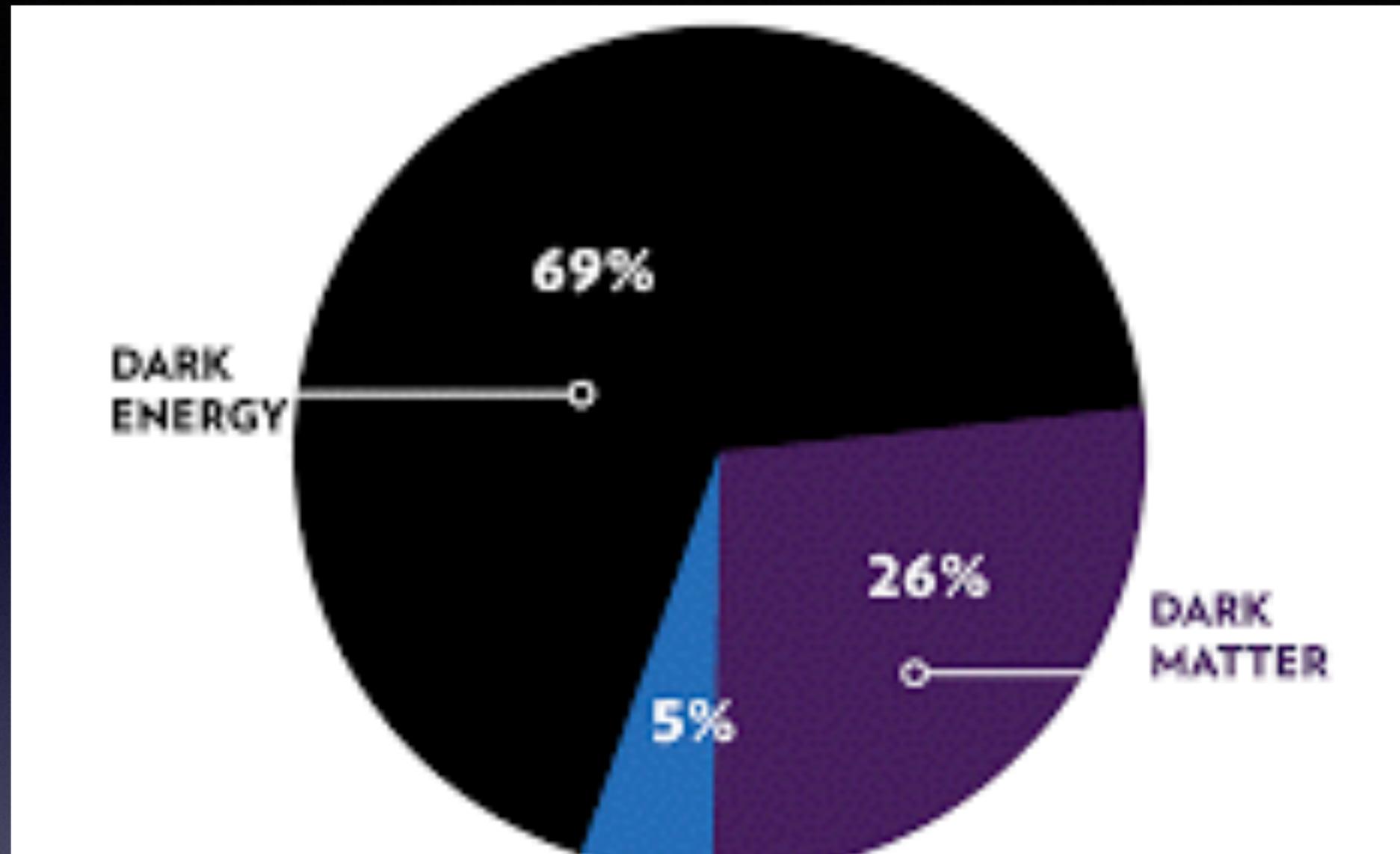
$$\Omega_B = 0.00366 h_0^{-2} \eta_{10}$$

$$\Omega_B \sim 0.049$$

$$\Omega_{vis} \sim 0.005$$

$$\Omega_m = \Omega_{DM} + \Omega_B \sim 0.317$$

$$\Omega_\Lambda \sim 0.683$$



# La torta dell'Universo

le percentuali delle varie componenti

# Cosa sono la materia e l'energia oscure?

## EUCLID: il primo telescopio spaziale ottico Europeo

Lancio previsto: 2020 - durata missione: fino al 2026

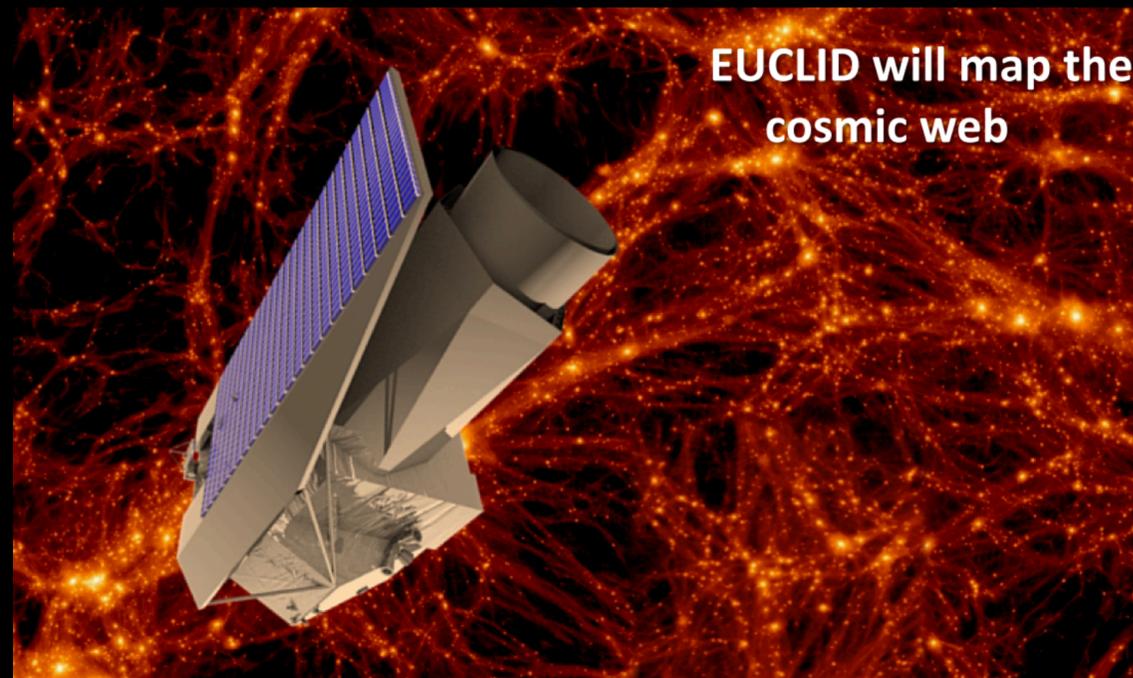
**OATs:** Ruoli di coordinamento nel Segmento Scientifico di Terra  
Ospita il Centro Elaborazione Dati italiano della missione

Osservazione di 1.5 miliardi di galassie

→ misura dell'effetto di lente gravitazionale

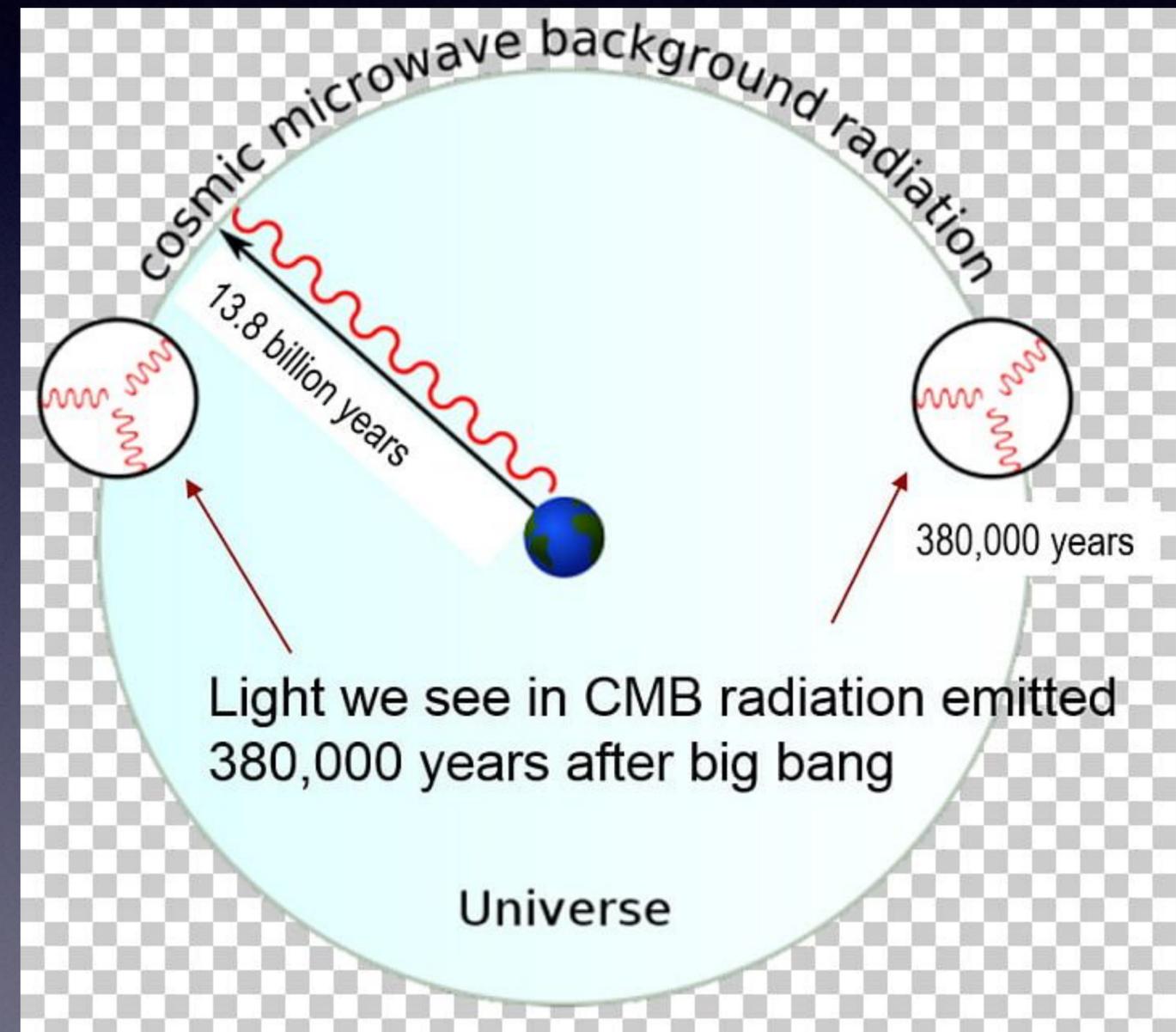
Misura della distanza di 50 milioni di galassie

→ misura della crescita delle perturbazioni cosmologiche



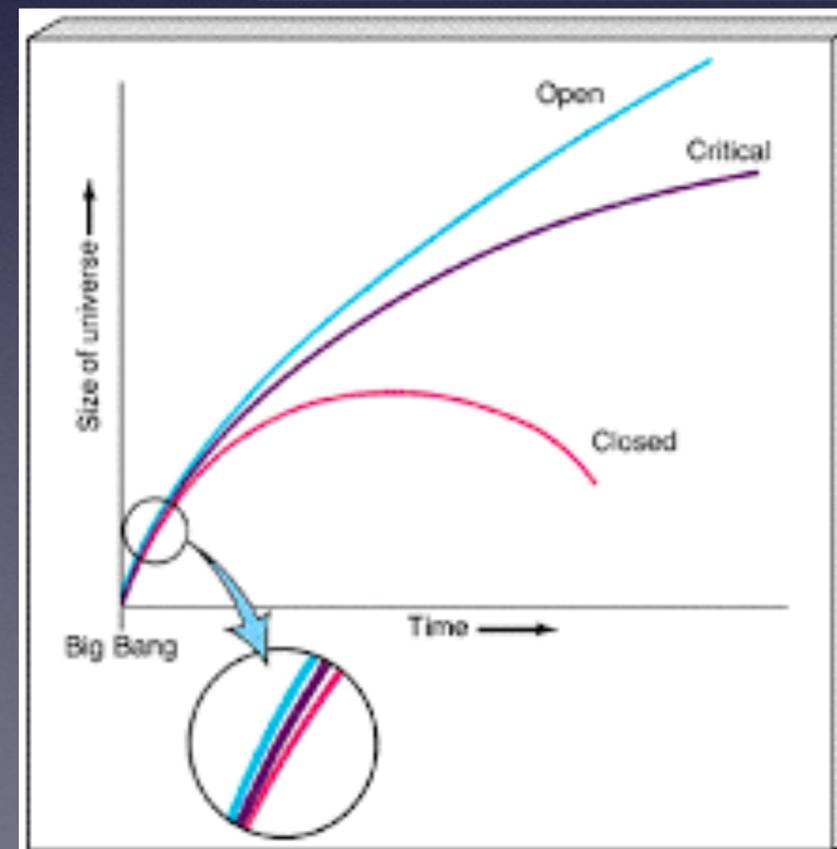
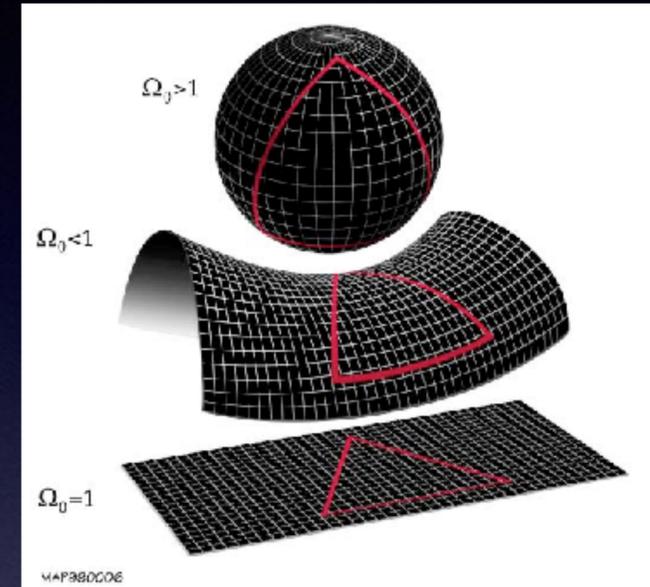
# Problemi col Big Bang: l'orizzonte

- L'isotropia della radiazione di fondo cosmica (CMB) indica che due regioni A e B nell'universo erano molto simili quando la radiazione che vediamo oggi le abbandonò
- Ma non c'è stato tempo sufficiente dal Big Bang per farle interagire
- Allora perché appaiono così simili?



# Problemi col Big Bang: la piattezza

- Qualunque sia il valore preciso di Omega e' comunque vicino ad 1, che vuol dire Universo piatto ed Euclideo che si espanderà per sempre
- Perche' l'universo e' cosi' vicino alla densita' critica?
- Le curve mostrano che anche se l'universo inizia con un valore vicino a quello critico, ben presto se ne discosta, quindi l'universo dovrebbe avere iniziato essendo estremamente vicino al valore critico



# Inflazione cosmica

- Per risolvere i problemi della piattezza e dell'orizzonte e' stata proposta la teoria dell'inflazione cosmica. Fu proposta nel 1980 da Alan Guth
- All'inizio l'universo si espanse tantissimo in un tempo cortissimo
- Le dimensioni dell'universo raddoppiarono ogni  $10^{-34}$  secondi!
- Questo periodo di espansione incontrollata e' noto come **epoca dell'inflazione**

# Che fine fara' l'universo?

- Se l'universo sta vivendo una fase di espansione accelerata e questa continuasse anche in futuro, l'universo perderebbe gradualmente la capacita' di formare nuove galassie e nuove stelle poiche' l'espansione prevarrebbe sulla gravita'. Le stelle vive morirebbero diventando materia oscura barionica. L'universo sarebbe sempre meno luminoso e piu' gelido
- Nel Big Crunch invece si prevede che ad un certo punto l'espansione si fermerebbe per poi tornare indietro. Possibilita' pero' esclusa dalle misure della densita' dell'universo
- Nel Big Rip si pensa al caso in cui l'energia oscura aumenterebbe cosi' tanto che la gravita' e l'elettromagnetismo non esisterebbero piu' e l'universo verrebbe disgregato in particelle elementari e fotoni

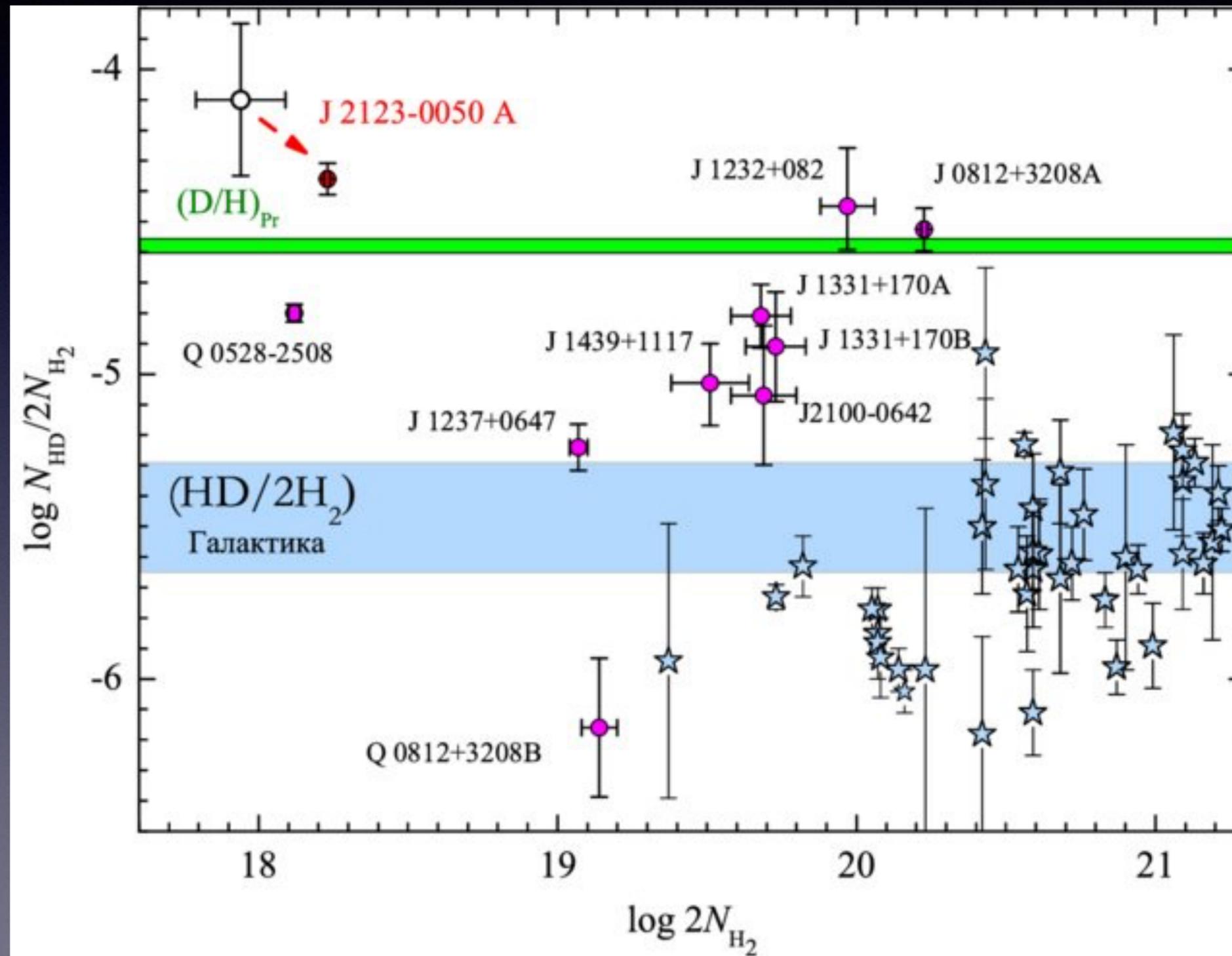
# La nucleosintesi primordiale

- Nei primi tre minuti dal Big Bang si formarono H, D,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  e  $^7\text{Li}$
- A causa della rapida espansione dell'universo la densità e la temperatura non erano sufficienti per formare elementi più pesanti del Litio
- Tutti gli elementi con  $A > 12$  sono stati formati dalle reazioni nucleari all'interno delle stelle

# Determinazione delle abbondanze primordiali degli elementi leggeri

- L'abbondanza di D primordiale si misura negli oggetti a piu' alto redshift ed il valore misurato rappresenta sempre un limite inferiore poiche' il D e' solo distrutto durante l'evoluzione galattica
- In particolare si misura negli spettri degli assorbitori dei QSO, ovvero nei sistemi Damped Lyman-alpha
- Si misura circa  $D_p = 3 \times 10^{-5}$
- Si possono anche stimare D e  $^3\text{He}$  primordiali dai modelli di evoluzione chimica

Misure del D primordiale (DLA cerchi chiusi)-  
Linea verde -D primordiale da CMB

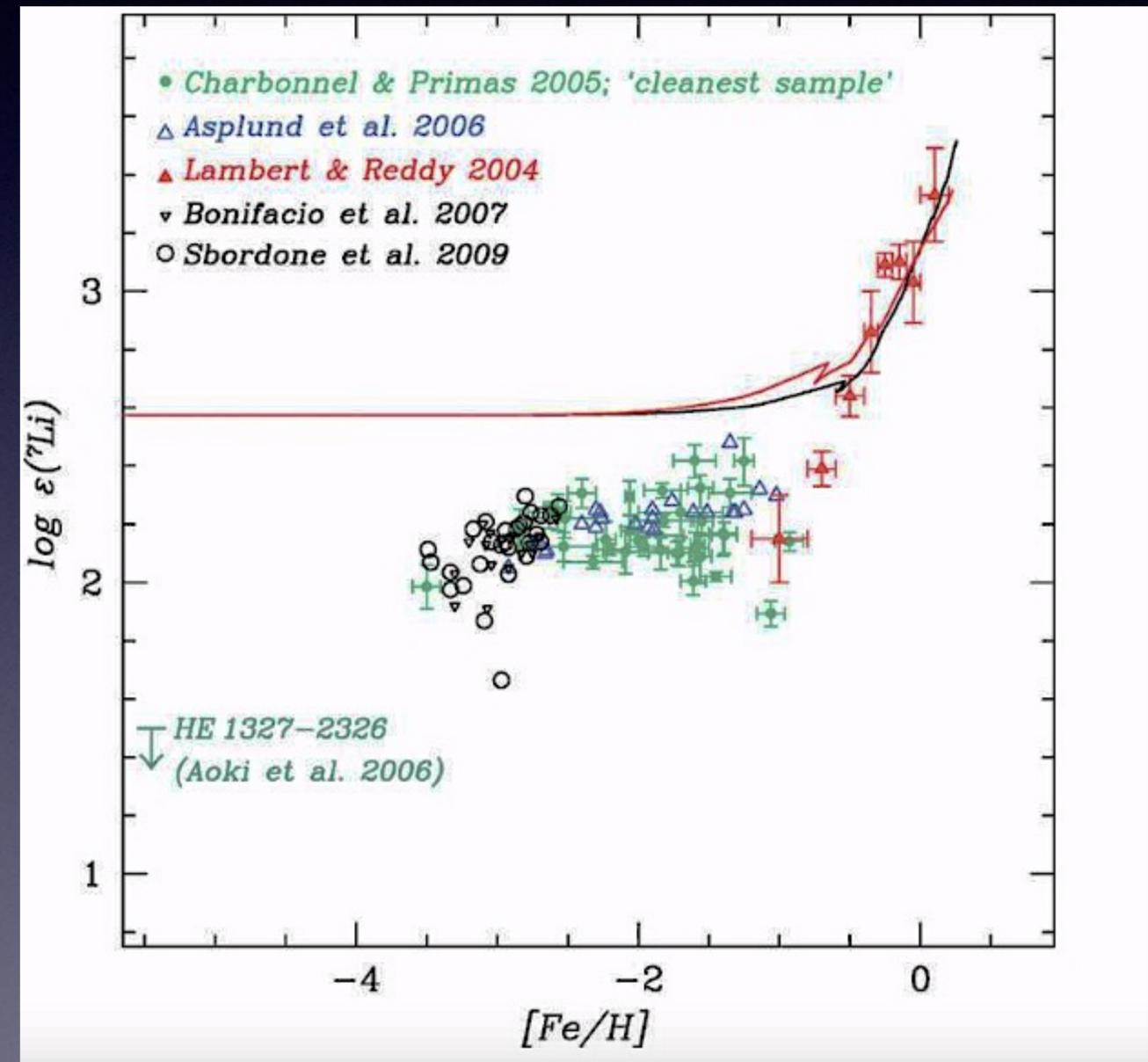


# Determinazione delle abbondanze primordiali

- L'abbondanza primordiale di  $^4\text{He}$  e' difficile da misurare
- Lo si deriva dagli ammassi globulari che sono i piu' antichi sistemi stellari o dalle galassie poco evolute (galassie nane compatte blu)
- $Y_p=0.23-0.24$  dove  $Y_p$  e' l'abbondanza in massa dell'elio
- Il  $^7\text{Li}$  lo si deduceva dall'abbondanza di quest'elemento nelle stelle dell'alone Galattico ( $\log N(\text{Li})= 12 + \log \text{Li}/\text{H}= 2.2$ ). Ora sembra che questo valore non sia il primordiale che vale almeno 2.6

# Il problema del Litio primordiale

- Il satellite WMAP e poi PLANCK (misura della CMB) hanno derivato il valore del rapporto barioni/fotoni da cui si derivano le abbondanze primordiali degli elementi leggeri
- C'e' buon accordo per D e He osservati ma per Li il primordiale suggerito e'  $\log N(\text{Li}) = 2.6$  contro il valore di 2.2 delle stelle di alone nelle quali il Li e' costante (Spite plateau)



# La nucleosintesi primordiale

- Alcuni nanosecondi dopo il Big Bang, l'Universo era riempito di gas fatto di quarks e antiquarks, leptoni e antileptoni, neutrini e antineutrini, gluoni e fotoni
- Per  $T < 10^{14} \text{K}$ , quarks, antiquarks e gluoni scomparvero annichilandosi e trasformandosi in particelle meno massive
- Alcuni quarks sopravvissero per dare origine a neutroni e protoni

# La nucleosintesi primordiale

- Nell'intervallo di tempo tra  $10^{-3}$  secondi ed 1 sec dopo il Big Bang l'Universo consisteva di gas fatto da neutroni e protoni, elettroni e positroni, neutrini e antineutrini e fotoni
- A  $T=10^{10}$ K i neutrini smisero di interagire con la materia. Essi formano ora un gas che si e' raffreddato a  $T=2$  K. Finora questo gas **non e' ancora stato rivelato**
- A seguito del disaccoppiamento dei neutrini, venne l'annichilazione  $e^+e^-$  che rimosse tutti i positroni e gran parte degli elettroni

# La nucleosintesi primordiale

- A  $T=10^{10}$  K i neutroni cominciarono a decadere in protoni ed il numero di protoni e neutroni soddisfaceva la relazione:

$$N_n/N_p = \exp[-(M_n - M_p)c^2 / KT]$$

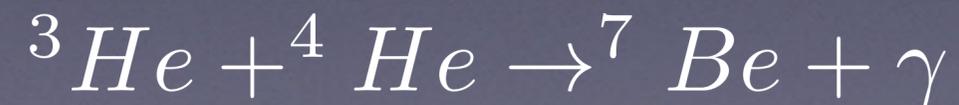
- A  $T=10^{10}$ K c'era un neutrone ogni 5 protoni ed il rapporto neutroni/protoni si congelò

# Nucleosintesi primordiale

- Quindi dopo i primi 100 secondi, i neutroni ed i protoni si combinarono per formare 75% di H e 25% di He
- Dopo  $3 \times 10^5$  anni la temperatura scese a  $T=4000$  K ed ebbe inizio l'era della ricombinazione e della formazione di nuclei stabili e atomi neutri
- L'Universo diventò trasparente alla radiazione
- Questa radiazione si è ora raffreddata fino a  $T=2.7$  K a causa dell'espansione e rappresenta la CMB

# Nucleosintesi primordiale

- Le principali reazioni nucleari nel Big Bang sono avvenute tra  $T=10^9$  K e  $10^8$ K, nei primi 3 minuti. Esse sono:



# Nucleosintesi primordiale

- La densità barionica dell'Universo regola il tasso delle reazioni nucleari e l'abbondanza primordiale di D è la più sensibile
- Alto  $D_p$  implica un basso valore della densità barionica

- 

$$\Omega_B = \rho_B / \rho_{crit}$$

- Le abbondanze primordiali dipendono dunque da il rapporto barioni/fotoni e questo ci dà la densità barionica (WMAP):

$$\Omega_B = (0.0227 \pm 0.00006)h^2$$

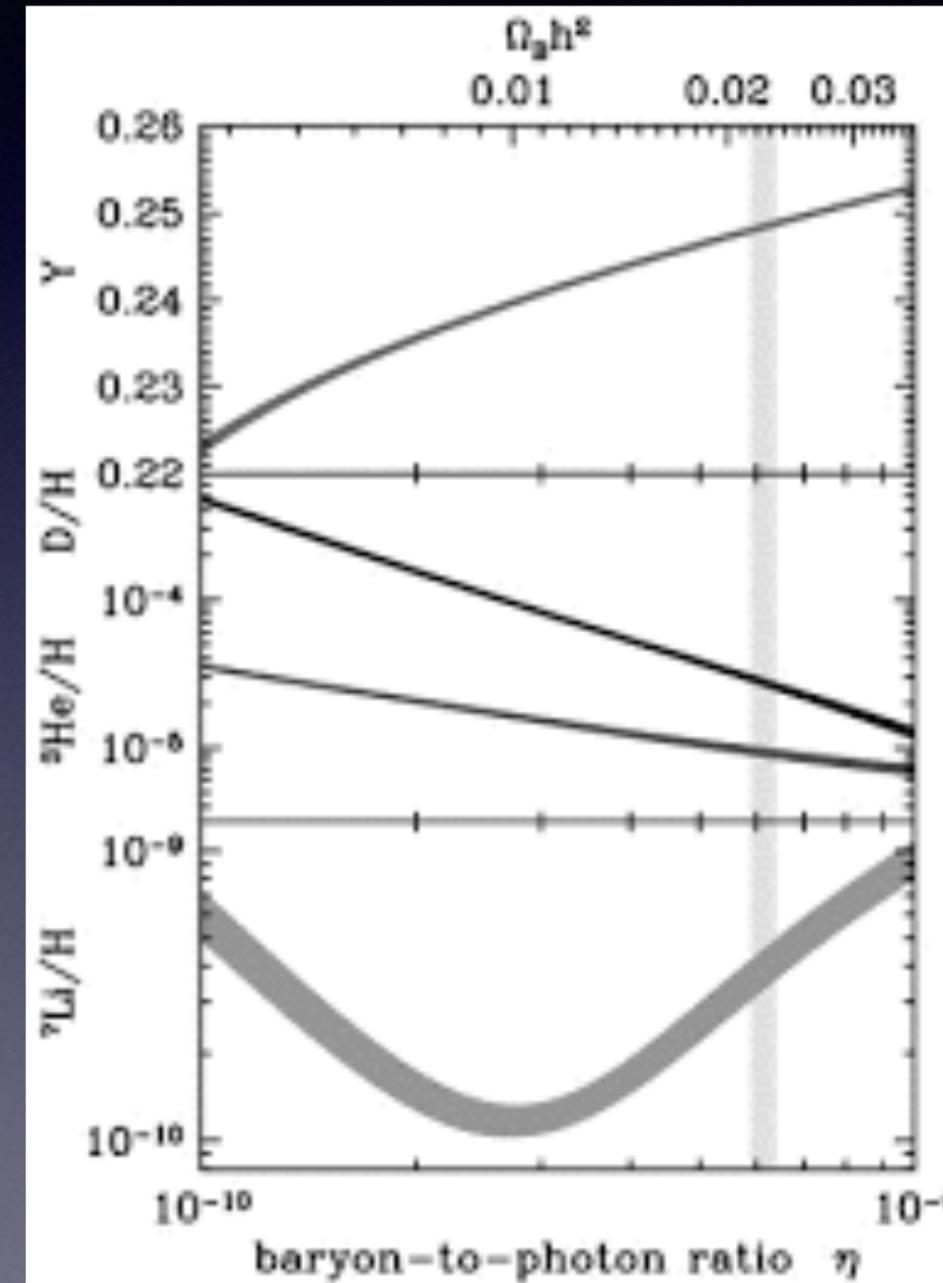
- L'abbondanza primordiale di  $^4\text{He}$  invece è sensibile al numero di famiglie di neutrini

# Nucleosintesi primordiale

- Confronto tra i risultati della nucleosintesi primordiale in funzione di  $\eta$ =barioni/fotoni e il valore di  $\eta$  di WMAP e PLANCK ( $6.23 \times 10^{-10}$ ) che fissa i valori delle abbondanze primordiali

$$\Omega_B = 0.00366 h_0^{-2} \eta_{10}$$

- C'è accordo per D ed He ma non per il Litio, come già discusso prima



# Abbondanze primordiali da WMAP e Planck

$$(D/H)_p = 2.74^{+0.26}_{-0.16} \cdot 10^{-5}$$

$$({}^3He)_p = 9.30^{+1.0}_{-0.67} \cdot 10^{-6}$$

$$(Y)_p = 0.24^{+0.0004}_{-0.0005}$$

$$({}^7Li/H)_p = 3.76^{+1.09}_{-0.38} \cdot 10^{-10}$$

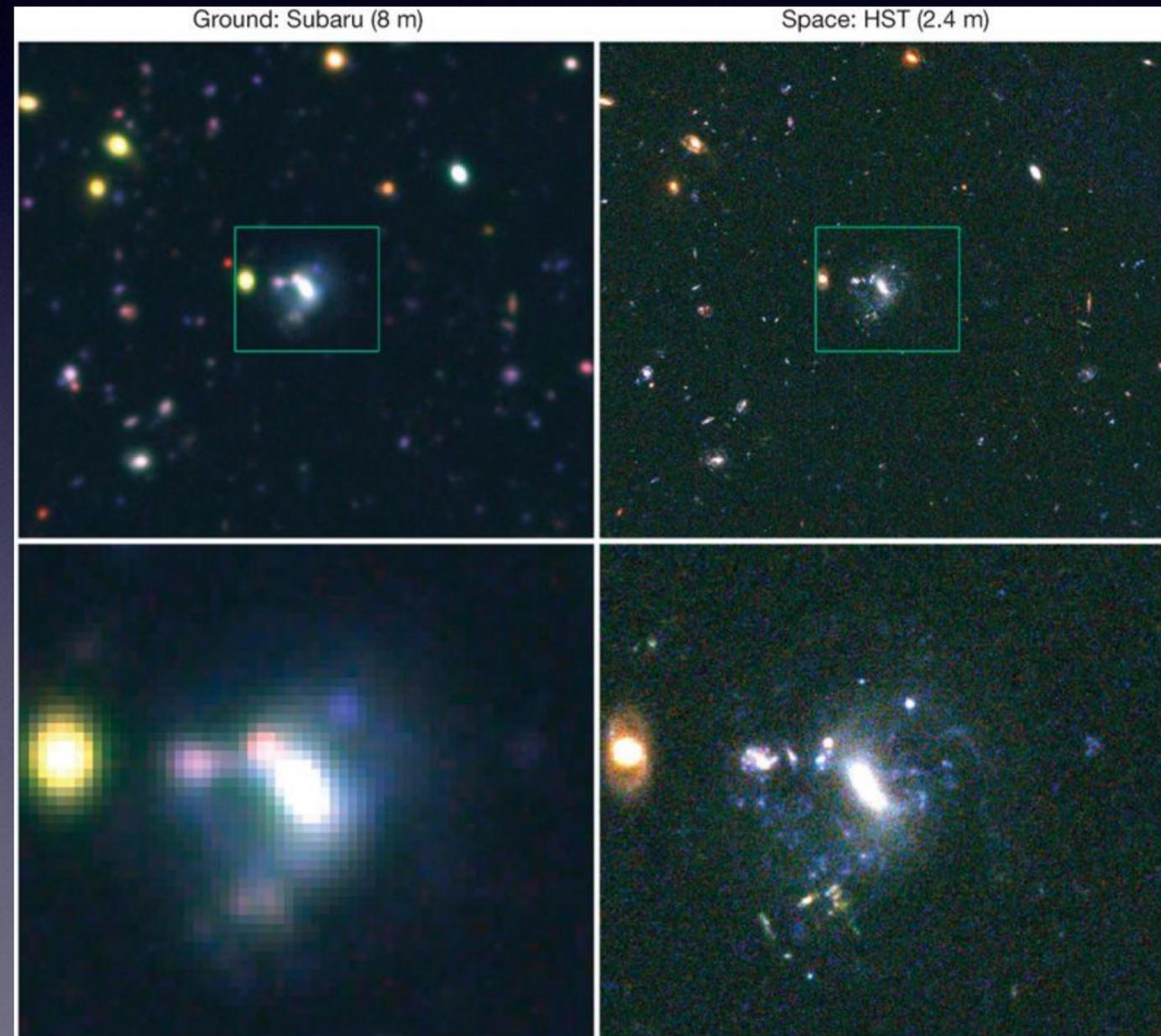
# Hubble Space Telescope e le sue scoperte

- Nel 1990 Hubble Space Telescope (HST) fu messo in orbita attorno alla Terra
- Fu la prima volta che guardavamo l'universo al di fuori dell'atmosfera terrestre
- All'inizio ci si accorse, quando HST era già in orbita di un errore di fabbricazione nel suo specchio principale (2.40 metri di diametro) che mostrava immagini sfocate
- In un secondo viaggio spaziale fu applicato ad HST uno strumento correttivo chiamato COSPAR, una specie di occhiali che hanno permesso di vedere immagini splendide

# Le performances di HST

- Le immagini prese con HST possono distinguere caratteristiche separate da meno di un secondo d'arco (confrontabile con l'angolo sotteso da mezzo millimetro visto da un chilometro di distanza)
- Immagini simili, prese da terra, sono tipicamente sfocate di un fattore 10 relativamente a quelle ottenute con HST
- Infine le immagini, prese senza il filtro dell'atmosfera, appaiono stabili e riproducibili, e poi HST opera nel vero buio!

# Galassia vista da terra (Subaru) e da HST



# Le scoperte di HST

- Le osservazioni fatte con HST hanno drammaticamente cambiato la nostra comprensione dell'universo
- La misura delle distanze cosmiche : HST eccelle nella misura delle **parallassi** a causa della sua superba risoluzione ed elaborato sensore di guida (FGS)
- HST ha consentito di misurare la luminosita' delle **Cefeidi** che grazie alla loro relazione periodo-luminosita' sono ottime Candele Standard
- HST ha osservato le Cefeidi in 36 galassie usate per calibrare la relazione L-P

# Le scoperte di HST

- HST ha studiato in dettaglio le regioni di recente formazione stellare come la nebulosa di Orione
- HST ha rivelato regioni dove stelle e giovani e massicce circondate da densi dischi di gas e polvere, questi dischi sono il resto dell'ultima fase di accrescimento che ha portato alla formazione di queste stelle
- HST ha osservato anche dischi protoplanetari che evolveranno in sistemi solari come il nostro

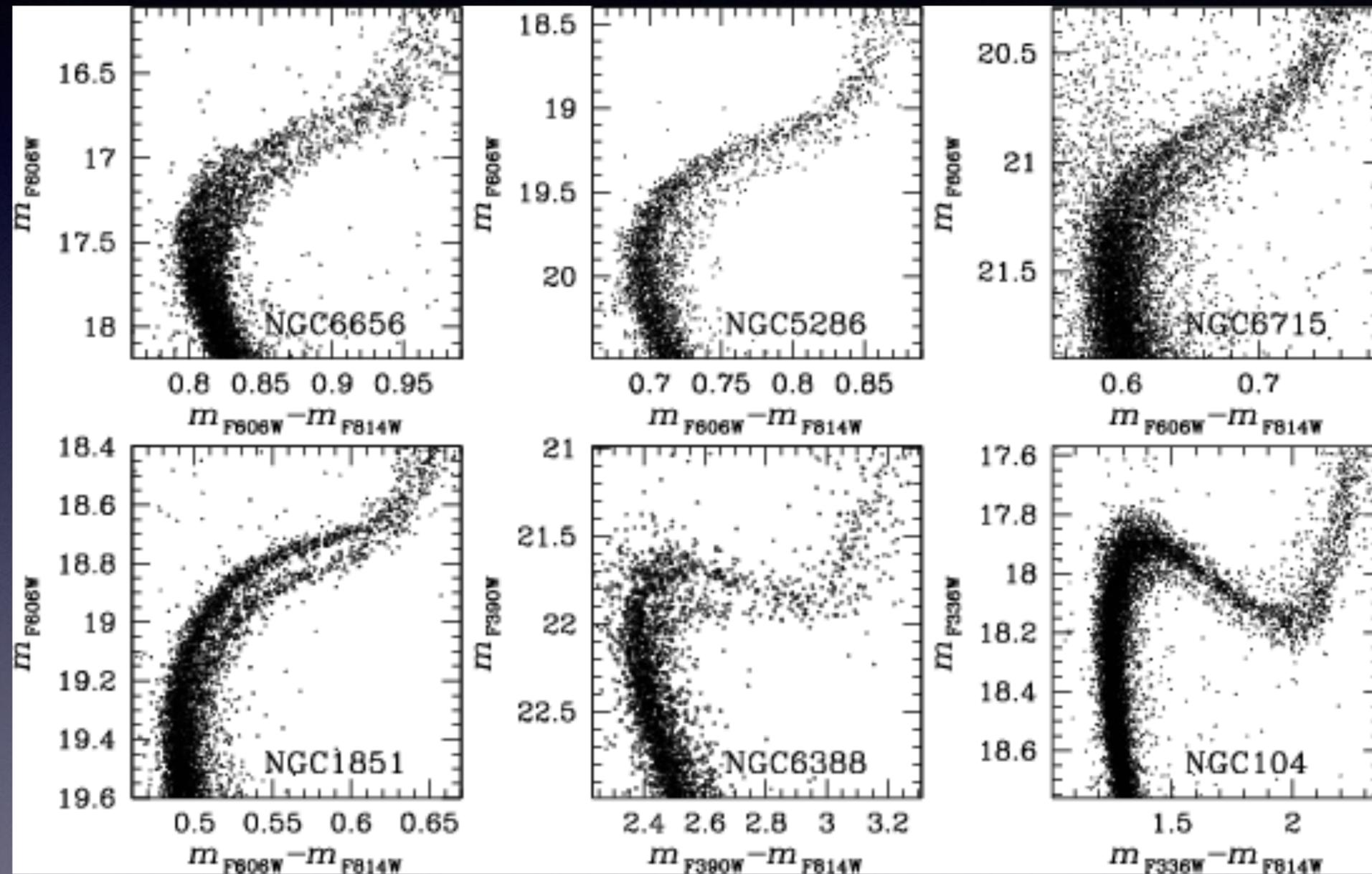
# Orione: Spitzer e HST



# Nebulose: i pilastri della creazione (HST)



# Popolazioni multiple in ammassi globulari (Diagramma H-R)



# Ammasso globulare della Galassia

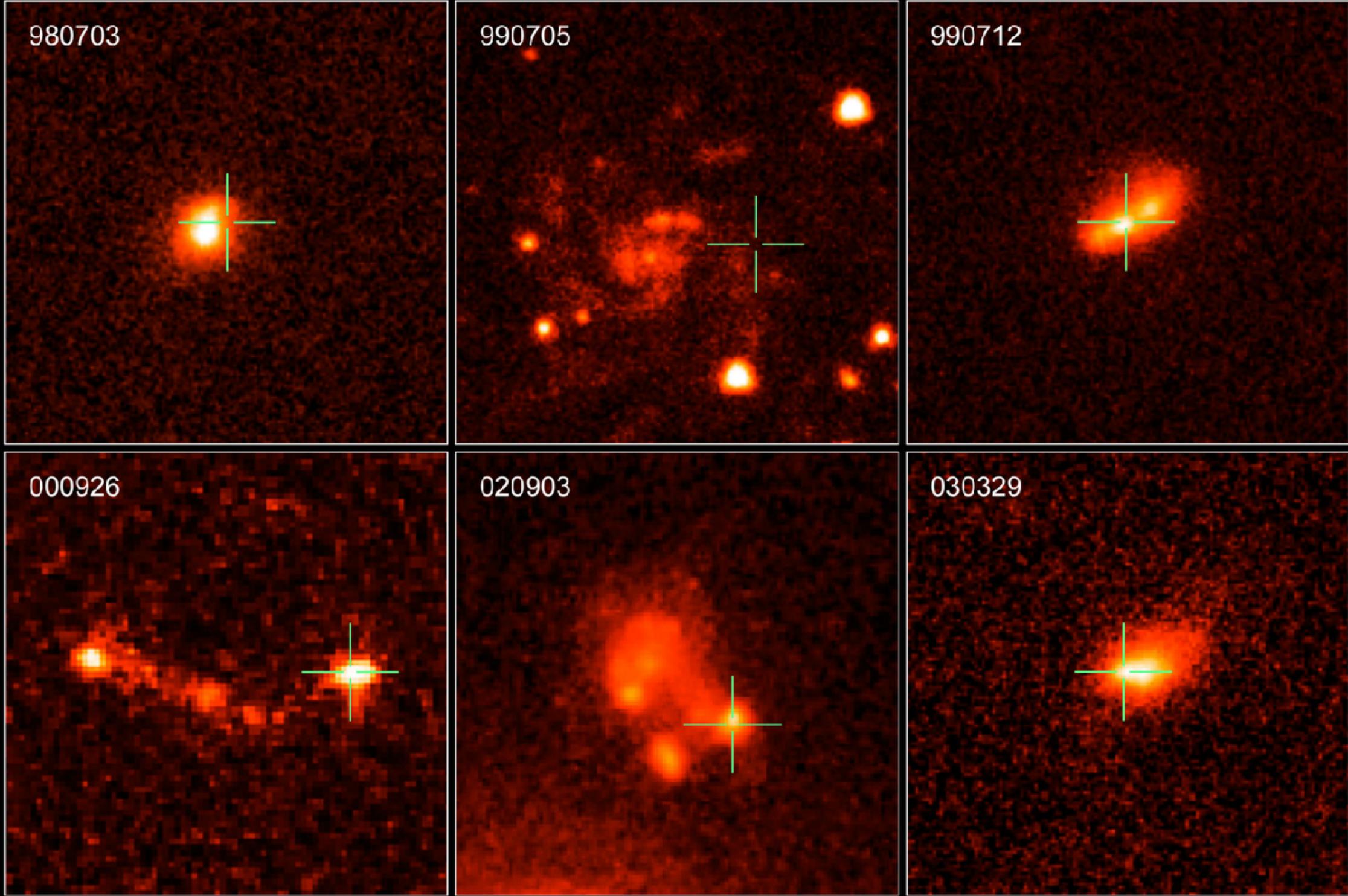


# Popolazioni multiple in ammassi globulari

- Gli ammassi globulari (circa  $10^6$  Msun) erano stati sempre considerati popolazioni stellari semplici, ovvero costituiti da una un'unica popolazione di stelle nate nello stesso momento e con la stessa composizione chimica
- HST ha consentito di misurare diagrammi H-R molto dettagliati dove si identificano due Sequenze Principali che si riferiscono a stelle di due diverse generazioni

# Scoperte di HST

- Supernovae. HST ha consentito di osservare ad alto redshift le SNe la cui scoperta ha permesso di costruire il diagramma di Hubble-Lemaître
- HST ha rivelato la massa persa prima dell'esplosione di supernova di SN1987A di tipo II
- HST ha ottenuto splendide immagini di nebulose planetarie e ha mostrato che quasi nessuna planetaria è sferica, questo ha suggerito che il processo di perdita di massa è alquanto complesso
- HST è servito a capire la connessione tra SNe e GRBs.
- HST ha identificato l'afterglow ottico e ha rivelato che i GRBs avvengono in regioni dove esplodono supernovae (Ib, Ic)



**Gamma-Ray Burst Host Galaxies**  
*Hubble Space Telescope*

# Gamma Ray Burst



# Connessione GRB-SNe

## Supernova – GRB Connection

Three GRB – SNe = all Type Ic **Hypernovae**

$E > 10^{52}$  erg ( $\sim 10 \times$  normal SN)

Large  $M_{\text{ms}} \rightarrow$  **Black Hole Forming**

SNe

**Aspherical**

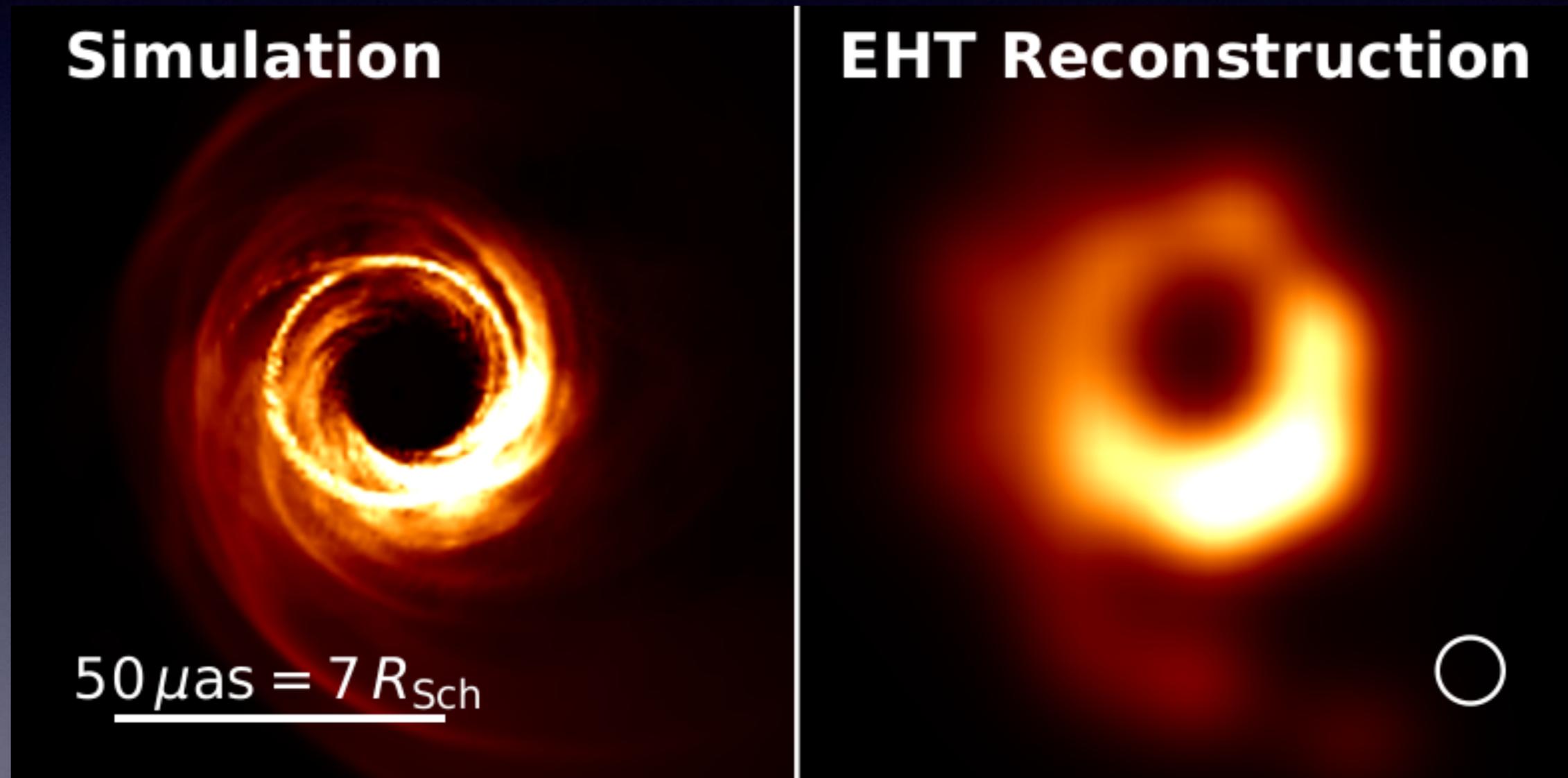


GRB	SN	$M_{\text{CO}}/M_{\odot}$	$M_{\text{ms}}/M_{\odot}$	$E/10^{51}$ erg	$M(^{56}\text{Ni})/M_{\odot}$
980425	1998bw	14	40	30	0.4
030329	2003dh	11	35	40	0.35
031203	2003lw	16	45	60	0.55

# Scoperte di HST

- Buchi neri. Negli anni passati HST ha rivoluzionato le nostre idee sui buchi neri e sul loro ruolo nella formazione delle galassie
- HST ha confermato la presenza di buchi neri centrali nelle galassie, rivelati dai moti inusuali delle stelle che li circondano. Si è anche trovato che esiste una precisa correlazione tra la massa del buco nero centrale e la massa del bulge che lo contiene
- HST ha suggerito che il buco nero centrale è una caratteristica comune alla maggior parte delle galassie indicando che la sua formazione è legata al processo di formazione galattica
- Questi buchi neri sono molto massicci da  $10^7$  a  $10^9 M_{\text{sun}}$  e non è chiaro come possano essersi formati
- Infine HST ha consentito di studiare orbite e atmosfere di **esopianeti**

# Buco nero in M87: 6 miliardi di masse solari



# Le onde gravitazionali



# Onde gravitazionali

- Il 17 agosto del 2017 sono state rivelate onde gravitazionali provenienti da una galassia locale di tipo S0 e sono state ricondotte al fenomeno della fusione di due oggetti compatti, in particolare due stelle di neutroni
- Questo evento, noto anche col nome di kilonova, ha prodotto elementi molto pesanti derivati dal processo -r, come Europio e piu' pesanti
- L'evento e' stato anche registrato dal telescopio spaziale Fermi come un gamma-ray burst di tipo corto
- Dopo esattamente un secolo, la previsione di Einstein e' stata dimostrata sperimentalmente

# Cosa ci resta ancora da scoprire?

- La natura della materia oscura e dell'energia oscura
- Le sorgenti di onde gravitazionali
- La formazione delle prime stelle e delle prime galassie
- L'evoluzione delle galassie e degli ammassi di galassie
- C'è ancora tutto un Universo da scoprire e forse non è nemmeno l'unico!