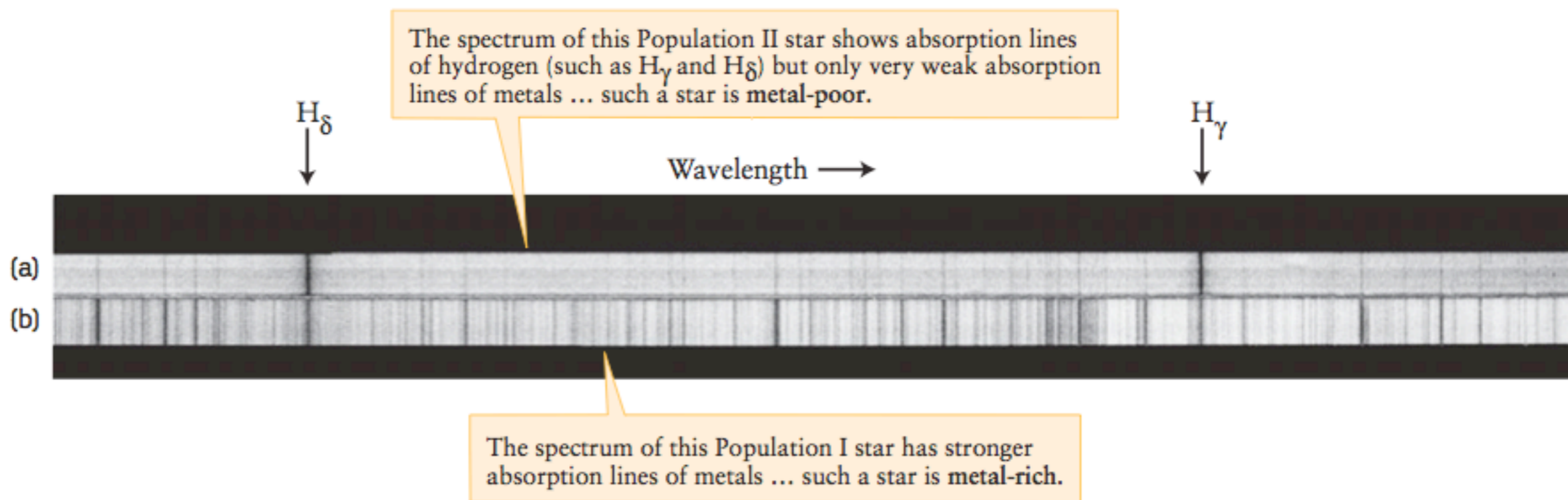


Lezione Fermi 15  
*Luciano Maiani, AA 14-15*  
Le Prime Stelle

## Sommario

1. Stelle di Popolazione III ?
2. Un'epoca buia, poi di nuovo la luce
3. La massa di Jeans
4. La taglia delle prime stelle

# 1. Stelle di Popolazione III?



**Figure 19-15** R I **V** U X G

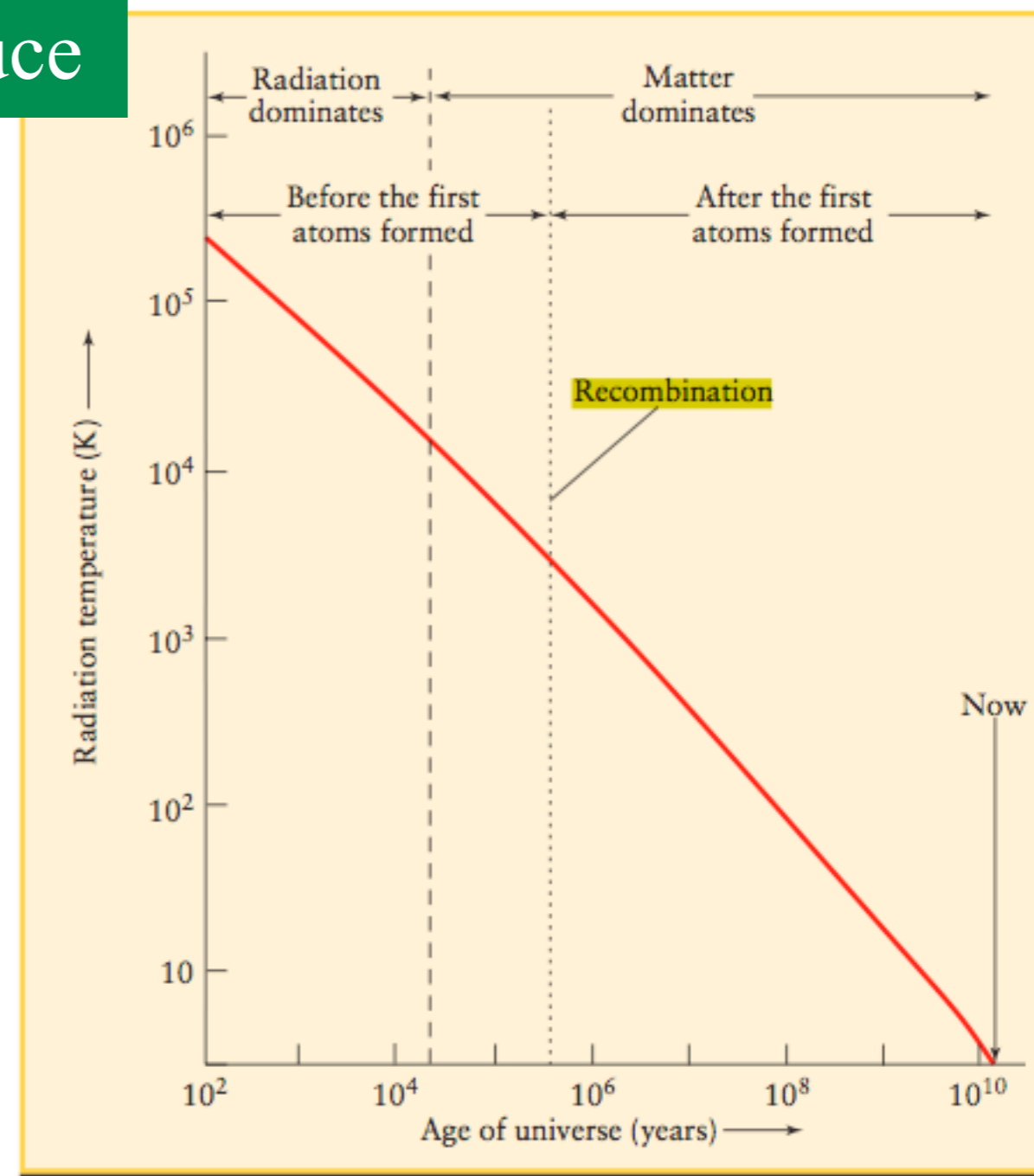
**Spectra of a Metal-Poor Star and a Metal-Rich Star** The abundance of metals (elements heavier than hydrogen and helium) in a star can be inferred from its spectrum. These spectra compare (a) a metal-poor, Population II star and (b) a metal-rich, Population I star (the Sun) of the

same surface temperature. We described the hydrogen absorption lines  $H_\gamma$  (wavelength 434 nm) and  $H_\delta$  (wavelength 410 nm) in Section 5-8. (Lick Observatory)

- la differenza e' interpretata in termini di due popolazioni di stelle:
- Pop. I: le piu' recenti, come il Sole
- Pop.II: la generazione precedente, dalle cui ceneri sono nate le stelle di Pop. I: il Sole, il sistema solare...noi
- ma anche la Pop II e' fatta di stelle che riciclano material creato da una precedente generazione: le prime stelle dopo il Big Bang, ipotizzate ma non (ancora?) osservate: Pop. III

## 2. Un' Epoca Buia, poi di nuovo la luce

- 400.000 anni dopo il Big Bang, la temperatura è scesa sotto 3000 K (1eV ~ 10.000 K)
- tanto da permettere la ricombinazione dell'idrogeno
- l'Universo è adesso trasparente alla luce, che è un bagliore diffuso dovuto alla radiazione termica di corpo nero
- 100 Milioni di anni dopo il BB, la temperatura è scesa sotto 100 K, l'Universo è oscuro, siamo nella Dark Age, l' Epoca Buia
- la materia (idrogeno con un 25% di He + materia oscura) presenta fluttuazioni di densità su scale diverse
- alcune di queste hanno una gravità sufficiente per "cadere" dentro se stesse e formare delle "protogalassie" e, all'interno di queste, delle "protostelle"
- 150-200 Milioni di anni dal BB: "potrebbero" essersi formate le prime stelle
- Le nostre osservazioni (Hubble Telescope, Spitzer Telescope) arrivano a circa 1 Miliardo di anni dopo il BB e mostrano già galassie formate di stelle
- che forse abbiamo intravisto come un fondo infrarosso diffuso

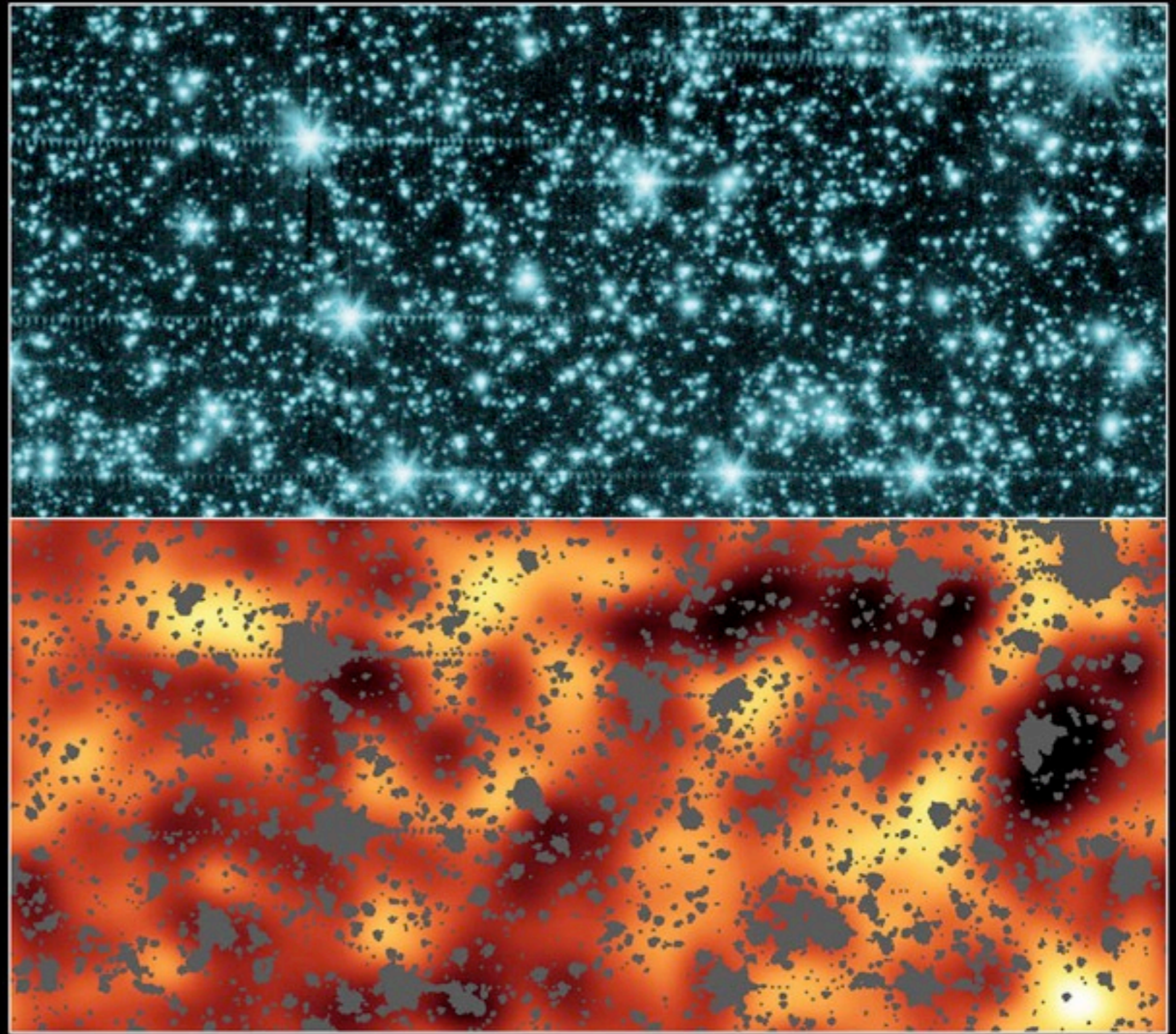


**Figure 26-11**

**The Evolution of Radiation Temperature** As the universe expanded, the photons in the radiation background became increasingly redshifted and the temperature of the radiation fell. Approximately 380,000 years after the Big Bang, when the temperature fell below 3000 K, hydrogen atoms formed and the radiation field "decoupled" from the matter in the universe. After that point, the temperature of matter in the universe was not the same as the temperature of radiation. The time when the first atoms formed is called the era of **recombination** (see Figure 26-12). (Graph courtesy of Clem Pryke, University of Chicago)

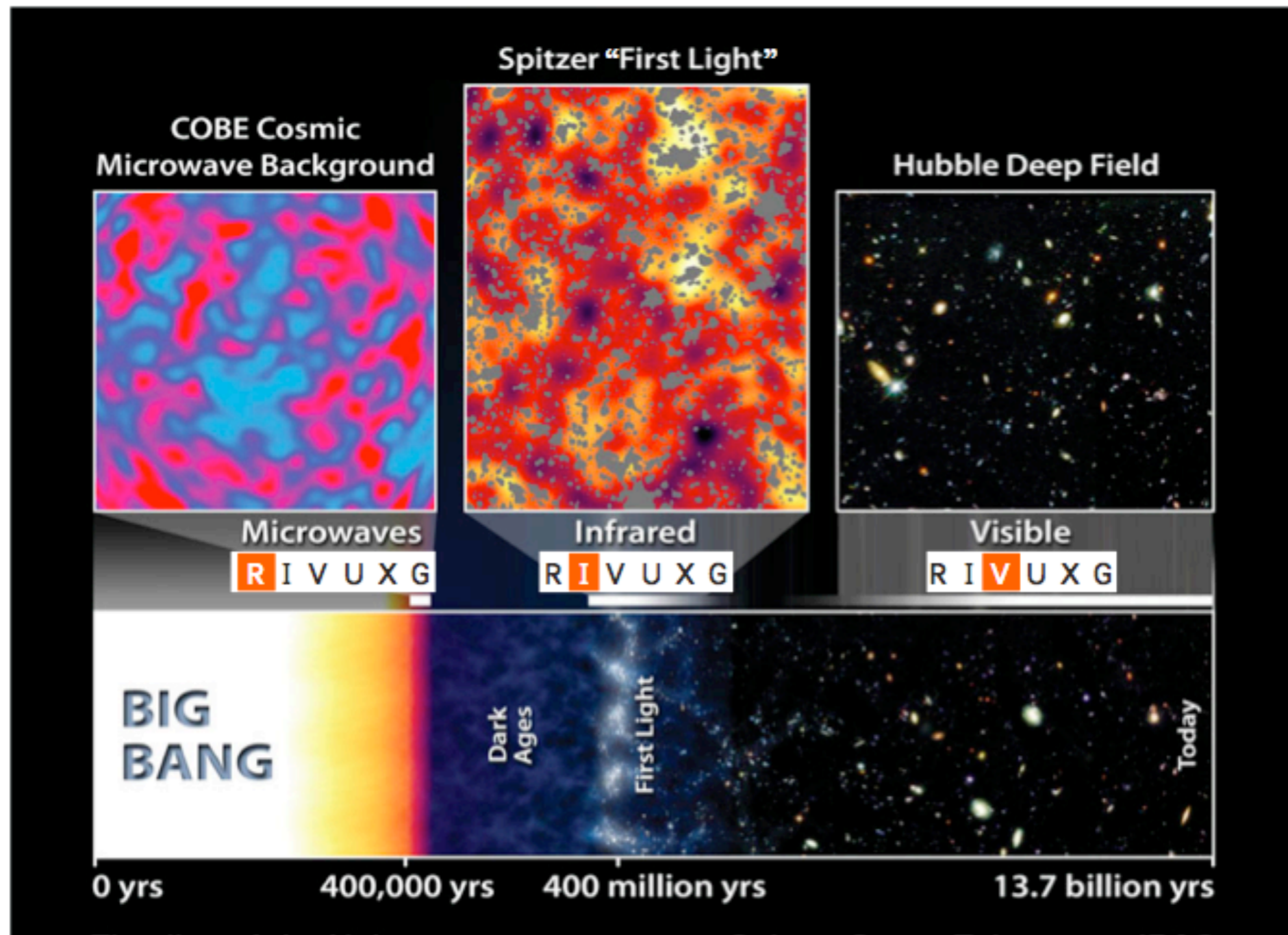
# Deep-Field picture from Spitzer Space Telescope-NASA

- The top panel is an image from NASA's Spitzer Space Telescope of stars and galaxies in the constellation Draco, covering about 50 by 100 million light-years (6 to 12 arcminutes). This is an infrared image showing wavelengths of 3.6 microns, below what the human eye can detect.
- The bottom panel is the resulting image (in the infrared) after all the stars, galaxies and artifacts were masked out. The remaining background has been enhanced to reveal a glow (the bright patches) that is not attributed to galaxies or stars. This might be the glow of the first stars in the universe.



Infrared Background Light from First Stars Spitzer Space Telescope • IRAC  
NASA / JPL-Caltech / A. Kashlinsky (GSFC) ssc2005-22a

# Time-line of light



**Figure 27-14**

**A Timeline of Light in the Universe** The oldest light that we can see today is the cosmic background radiation, which comes from a time 380,000 years after the Big Bang when the universe first became transparent. This light has a redshift of about  $z = 1100$  and appears in the microwave spectrum. Some 400 million years later at a redshift of

about  $z = 11$  the first stars appeared; their light is now redshifted to infrared wavelengths. Galaxies formed more recently and can be seen at visible wavelengths. (NASA; JPL-Caltech; and A. Kashlinsky, Goddard Space Flight Center)

# 3. La massa di Jeans

- Il collasso gravitazionale di un gas diffuso e' stato studiato da J. Jeans all'inizio del '900
- uno studio piu' preciso, nell'Universo in espansione, e' dovuto a E. Lifshitz (1946)
- Una sfera di gas di raggio R (atomi di massa m, densita'  $\rho$ , pressione p, temperatura T), due forze: gravita' (comprime) e pressione (espande).
- Se, per una fluttuazione, il gas si comprime, la pressione agisce da forza di richiamo e il gas oscilla
- l'equilibrio si rompe a favore della gravita' quando il tempo di caduta,  $t_{grav}$ , e' inferiore al tempo di richiamo della pressione,  $t_{press}$ ,
- $t_{grav}$  = tempo di caduta libera per una distanza  $r \sim R$

$$r = \frac{1}{2}gt^2, \quad g = \frac{GM}{R^2} \rightarrow t_{grav} \sim \sqrt{\frac{R}{g}} \sim \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}}$$

- $t_{press}$  e' il tempo che impiega l'onda di pressione a propagarsi su distanze di ordine R, che a sua volta e' determinato dalla velocita' del suono,  $c_s$ :

$$t_{press} \sim \frac{R}{c_s}, \quad c_s^2 \sim \frac{kT}{m} \left( = \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)$$

- la condizione  $t_{press} > t_{grav}$  richiede che R sia piu' grande del raggio di Jeans,  $R_J$ :

$$R > R_J = \sqrt{\frac{c_s^2}{G\rho}} = \sqrt{\frac{kT}{G\rho m}}$$

# una controprova

- Nell'espressione di  $R_J$ , eliminiamo  $\rho$  in favore della massa totale, abbiamo:

$$R > R_J = \sqrt{\frac{c_s^2}{G\rho}} = \sqrt{\frac{kT}{G\rho m}}$$

$$\rho = \frac{M}{R^3}, \text{ quindi : } R_J = \sqrt{\frac{kT}{G\rho m}} = \sqrt{\frac{kT R_J^3}{GMm}}$$

$$\text{ovvero : } kT = \frac{GMm}{R_J}$$

- Il raggio  $R_J$ , e' quello per cui l'energia termica degli atomi e' uguale al potenziale gravitazionale.
- In questa situazione, c'e' equilibrio tra pressione e attrazione gravitazionale
- ma l'equilibrio e' instabile: se la sfera si contrae, la gravita' prevale, se si espande prevale la pressione
- Per raggi superiori a  $R_J$ , la gravita' vince e la sfera collassa.
- Possiamo calcolare la massa che corrisponde a  $R_J$ :

$$M_J = \frac{4}{3}\pi R_J^3 \sim \left(\frac{kT}{Gm}\right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}}; \quad \frac{1}{\rho} = \frac{V}{Nm} = \frac{NkT}{pNm} = \frac{kT}{mp} \text{ da cui}$$

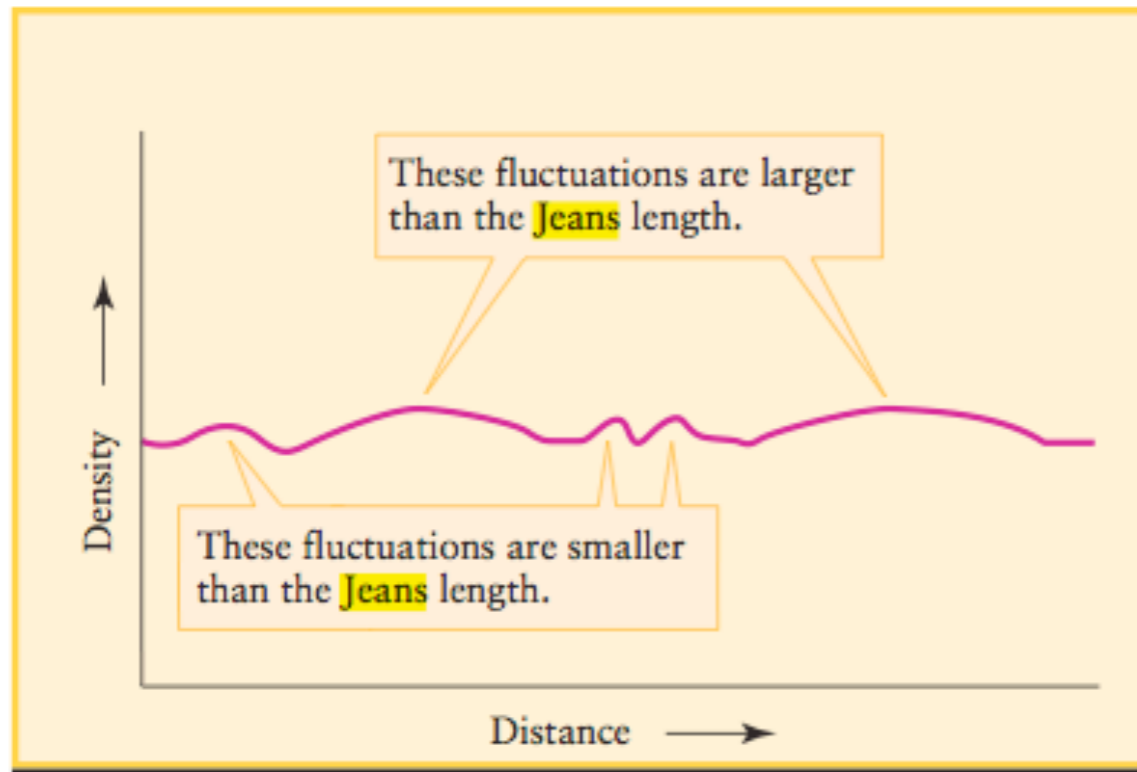
$$M_J \sim \frac{(kT)^2}{p^{1/2}} \frac{1}{G^{3/2}m^2}$$

la massa delle fluttuazione di densita' che hanno successo, *cresce con la temperatura* del gas e *diminuisce con la pressione*

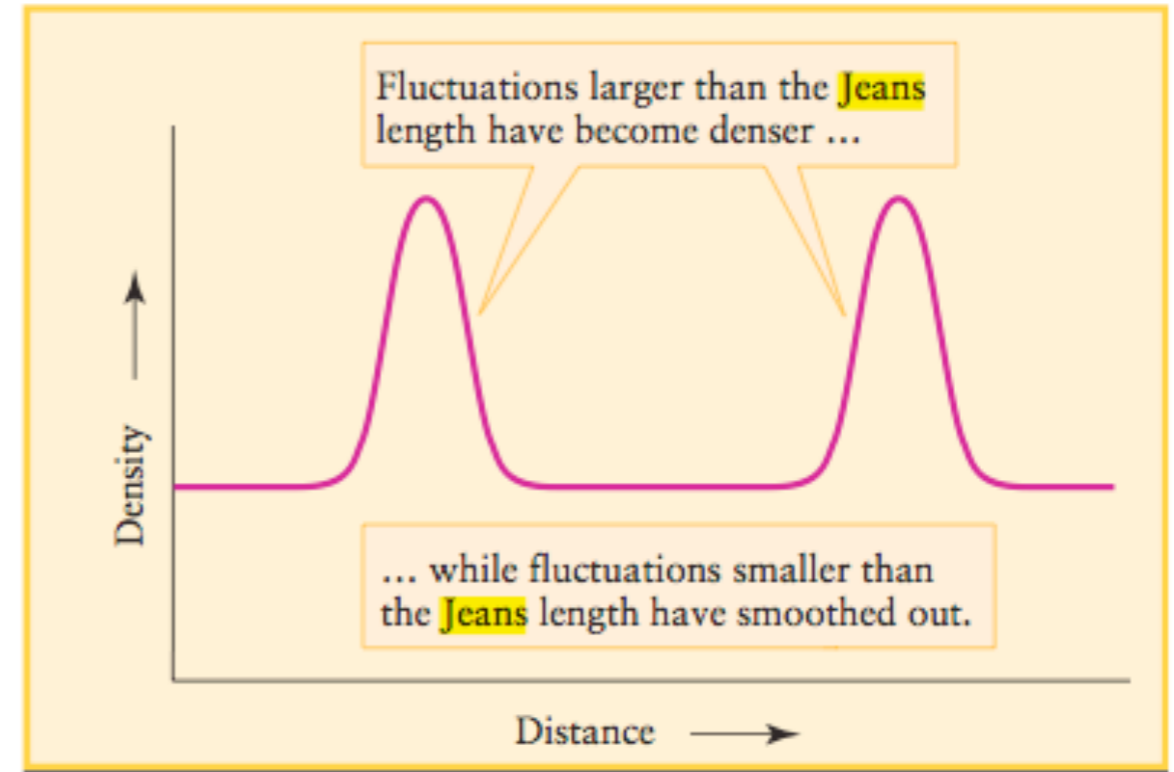
# evoluzione delle fluttuazioni

$$R > R_J = \sqrt{\frac{c_s^2}{G\rho}} = \sqrt{\frac{kT}{G\rho m}}$$

- le fluttuazione di densita' con scala spaziale maggiore del raggio di Jeans si rinforzano, quelle su scale inferiori si riassorbono



(a) At an early time



(b) At a later time

## Figure 27-12

**The Growth of Density Fluctuations** (a) This conceptual illustration shows small density fluctuations in the distribution of matter shortly after the era of recombination. (b) If the size of a fluctuation is greater than

the **Jeans** length ( $L_J$ ), it becomes gravitationally unstable and can grow in amplitude.



### 3. La taglia delle prime stelle

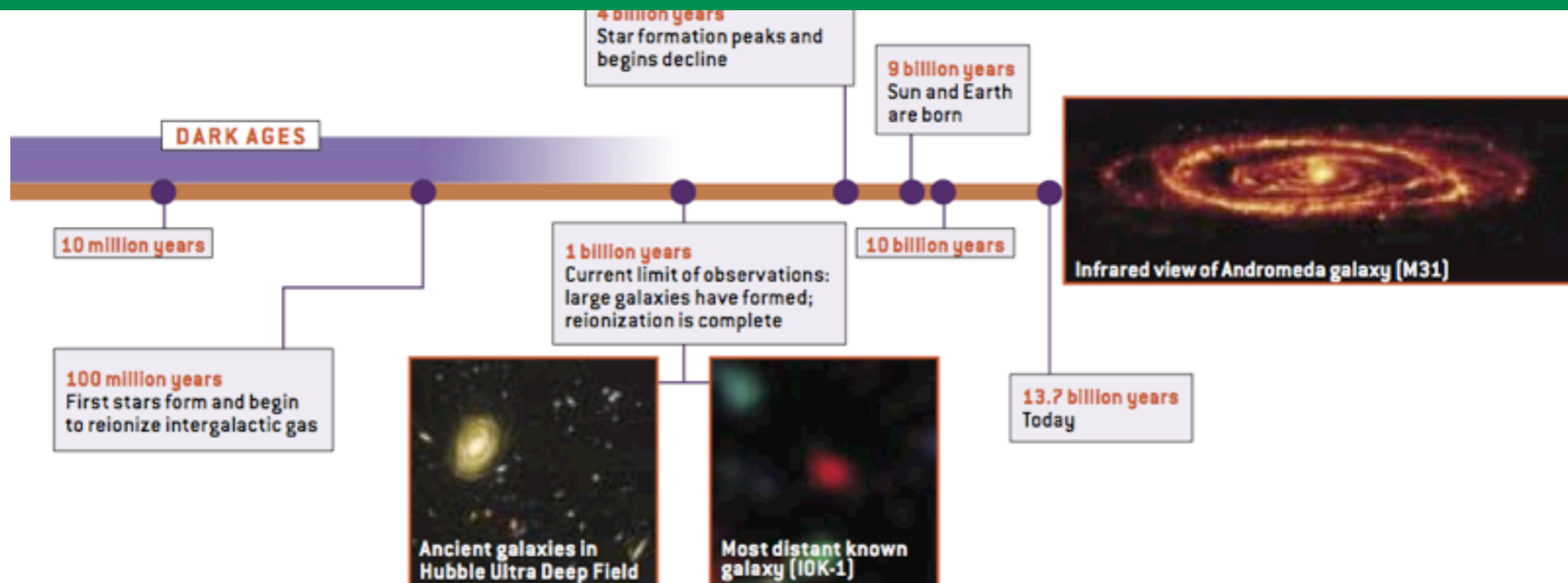
$$M_J \sim \frac{(kT)^2}{p^{1/2}} \frac{1}{G^{3/2} m^2}$$

- La massa di Jeans determina la taglia delle protostelle che si formano per collasso delle fluttuazioni gravitazionali
- la taglia e' molto diversa da quella delle stelle che si formano oggi (Pop. I)
  - la metallicita' e piu' ancora le polveri presenti nelle nubi attuali facilitano il raffreddamento
  - al contrario, l'idrogeno primordiale non raffredda facilmente, neanche sotto forma molecolare
  - mentre  $p$  e' circa uguale, la temperatura del gas primordiale e' 10-30 volte quella delle nubi da cui si formano le attuali stelle, quindi le prime stelle avevano taglie 100-1000 volte superiori
- stelle cosi' grandi hanno temperature esterne molto elevate (10-15.000 0K) ed emettono luce ultravioletta, in grado di ri-ionizzare il gas circostante....
- e vita molto piu' breve, dell'ordine di 100 Milioni di anni, le supernovae corrispondenti diffondono gas con metallicita' considerevole, i semi delle stelle di Pop. II, e finiscono in buchi neri di grandi dimensioni
- in 1 Miliardo di anni si passa dal gas primordiale ai quasar e alla re-ionizzazione
- un Universo del tutto inospitale

# indizi e conferme

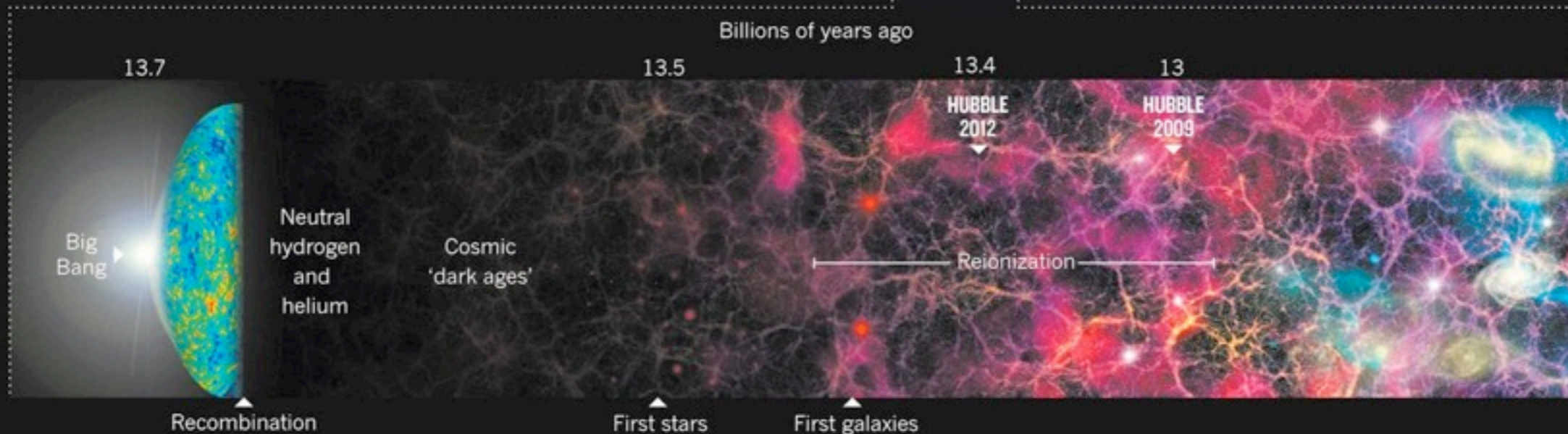
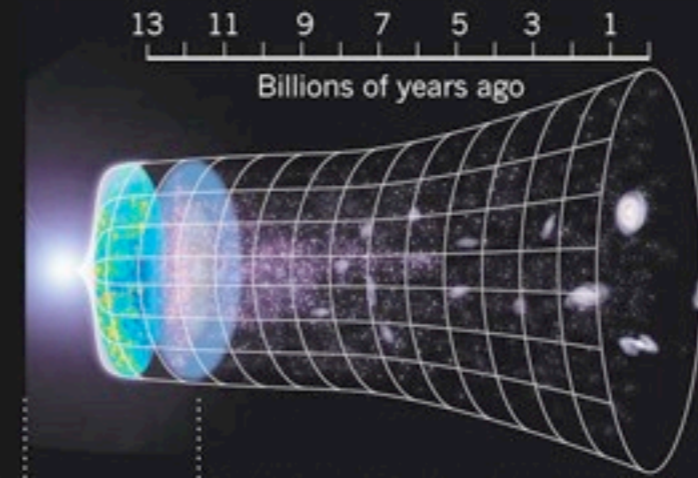
- abbiamo evidenza osservativa della re-ionizzazione
  - la luce dei quasar e' influenzata dalla diffusione su elettroni liberi
  - WMAP: la luce del Fondo cosmico e' leggermente polarizzata (diffusione Compton su elettroni liberi)
- i buchi neri che sono il motore dei quasar potrebbero essere il residuo della Pop. III
- I telescopi spaziali della prossima generazione dovrebbero osservare le prime stelle!

# From Dark Ages to Renaissance



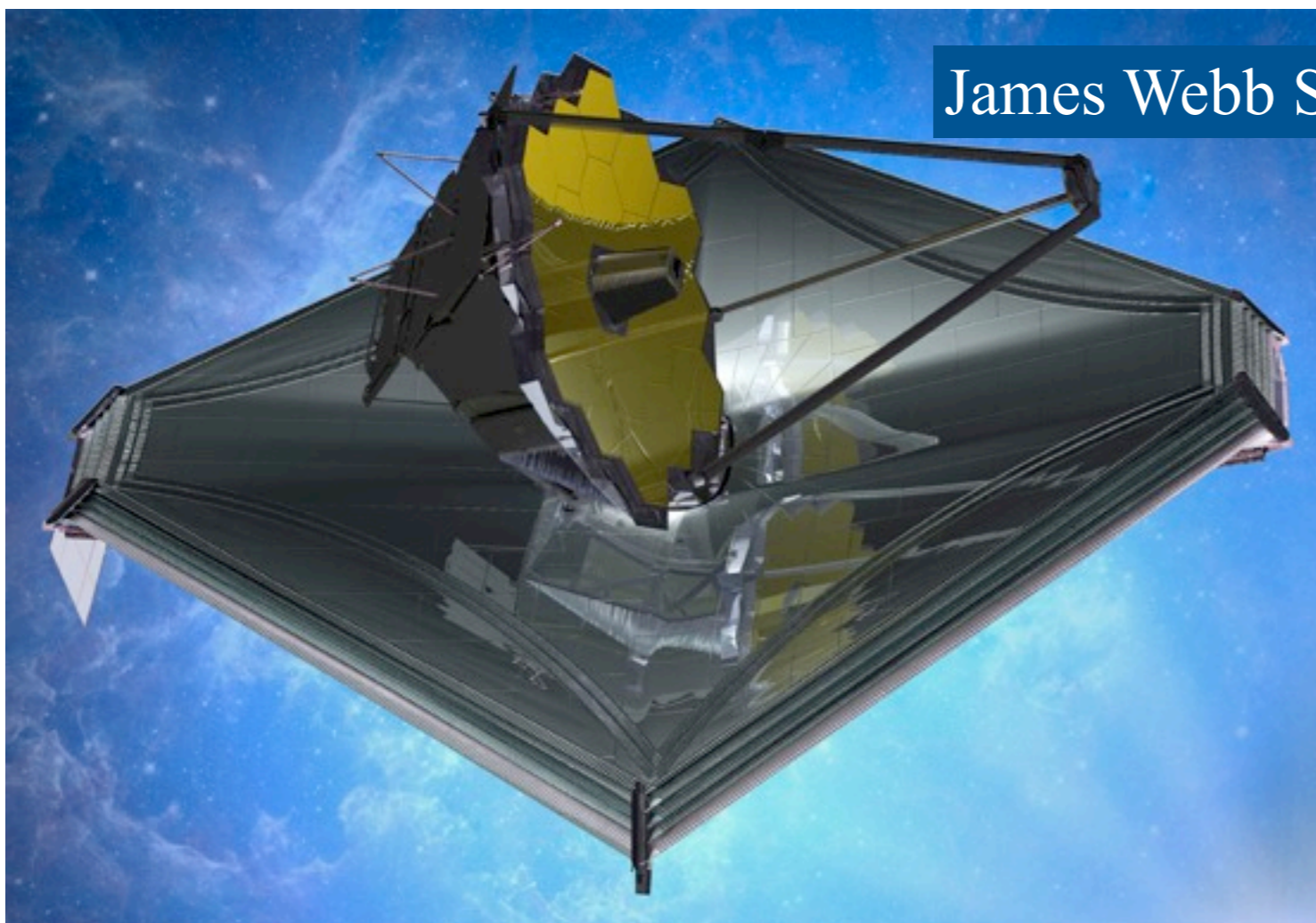
## DAWN'S EARLY LIGHT

The Big Bang generated a haze of primordial hydrogen and helium. After about 370,000 years, cosmic expansion cooled it enough for electrons and protons to form neutral atoms ('recombination'). During the resulting 'dark ages', when the Universe had no stars to light it, gravity magnified slight fluctuations in density and caused the neutral gas to clump. The densest clumps eventually became the first stars and galaxies. Their ultraviolet light ionized the remaining neutral gas ('reionization'), allowed light to stream freely into space, and brought the dark ages to an end.

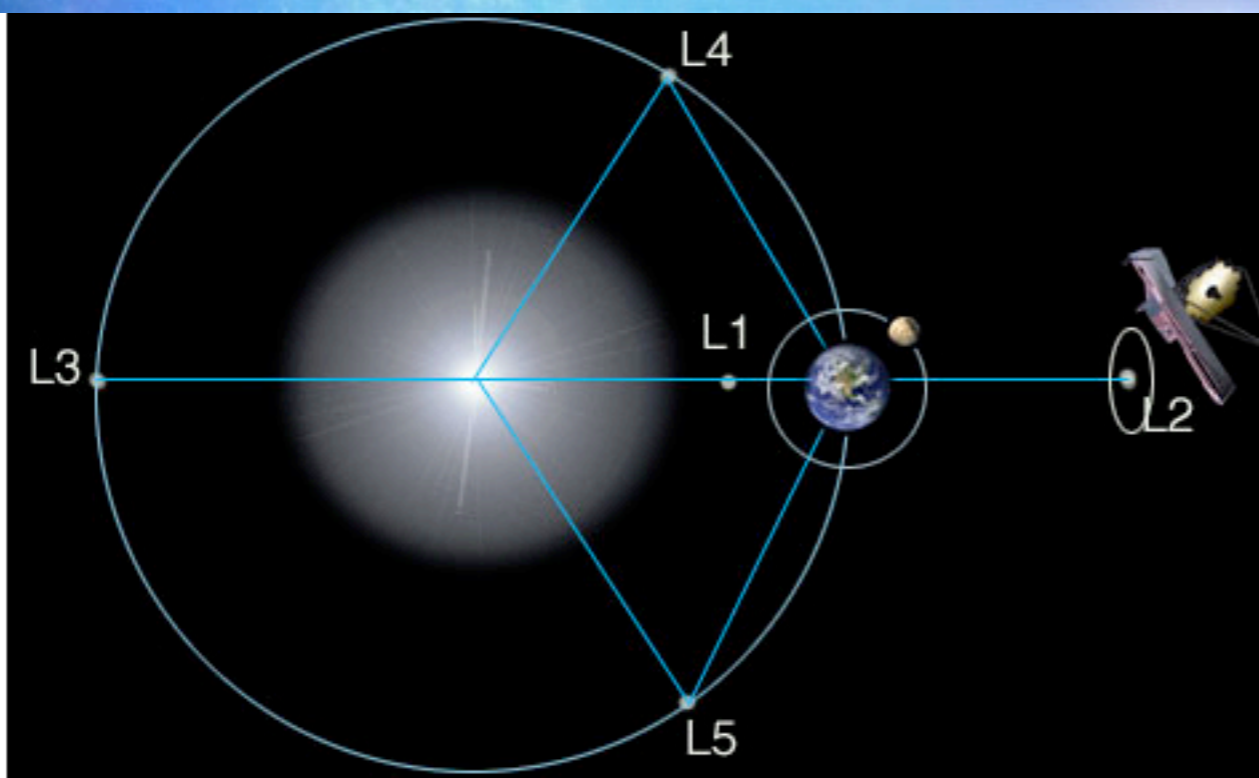


# 4. La prossima generazione di telescopi spaziali

## James Webb Space Telescope-NASA



In costruzione  
costo stimato 8 B\$ (piu di LHC!!)  
difficolta' con il Congresso per il finanziamento: arrivera' in fondo?  
Sono i problemi della Big Science



### Space Telescope Mirror Comparison

