

Astronomía Extragaláctica

Cap. 1: Marco cosmológico

Profesor: Sergio A. Cellone



Facultad de Ciencias Astronómicas y
Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata,
Argentina



curso 2015

- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis
- 5 CMB

- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis
- 5 CMB

La ley de Hubble

Diagrama de Hubble para galaxias más brillantes en cúmulos

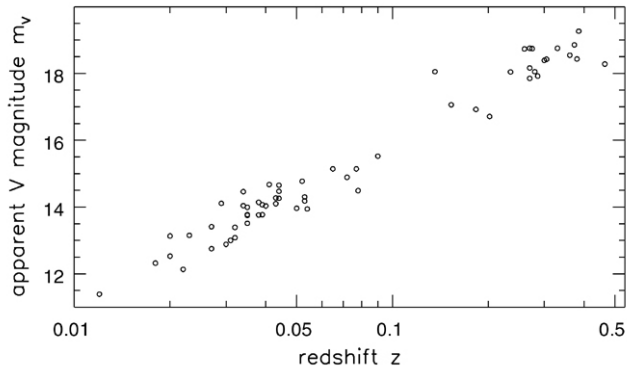
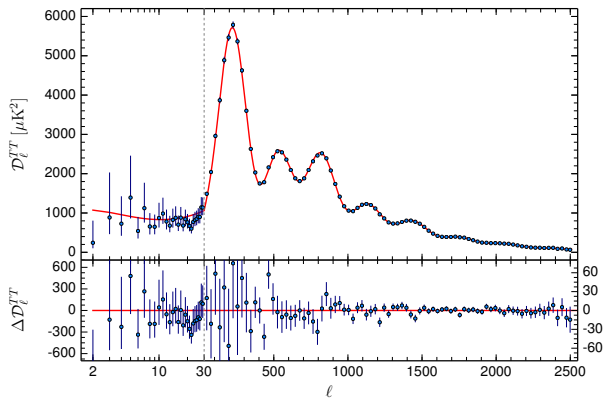


Fig 1.17 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

(Gunn & Oke, 1975)

El fondo cósmico de microondas



(Planck Collaboration, 2015)

La ley de Hubble

Velocidades peculiares

	d	$m - M$
M 31	783 kpc	24.47
C. Virgo	16.6 Mpc	31.10
C. Coma	102.8 Mpc	35.06

- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica**
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis
- 5 CMB

Coordenadas espaciales

Métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

$$r \equiv R(t)\chi, \quad K(t) \equiv \frac{k}{R(t)^2}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left(\frac{d\chi^2}{1 - k\chi^2} + \chi^2 d\theta^2 + \chi^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right).$$

$$R_p = R(t) \int_0^\chi \frac{d\chi}{\sqrt{1 - k\chi^2}} = \begin{cases} R(t) \sin^{-1} \chi & (k = +1) \\ R(t) \chi & (k = 0) \\ R(t) \sinh^{-1} \chi & (k = -1). \end{cases}$$

Coordenadas espaciales

Métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

$$r \equiv R(t)\chi, \quad K(t) \equiv \frac{k}{R(t)^2}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left(\frac{d\chi^2}{1 - k\chi^2} + \chi^2 d\theta^2 + \chi^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right).$$

$$R_p = R(t) \int_0^\chi \frac{d\chi}{\sqrt{1 - k\chi^2}} = \begin{cases} R(t) \sin^{-1} \chi & (k = +1) \\ R(t) \chi & (k = 0) \\ R(t) \sinh^{-1} \chi & (k = -1). \end{cases}$$

Coordenadas espaciales

Métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

$$r \equiv R(t)\chi, \quad K(t) \equiv \frac{k}{R(t)^2}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left(\frac{d\chi^2}{1 - k\chi^2} + \chi^2 d\theta^2 + \chi^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right).$$

$$R_p = R(t) \int_0^\chi \frac{d\chi}{\sqrt{1 - k\chi^2}} = \begin{cases} R(t) \sin^{-1} \chi & (k = +1) \\ R(t) \chi & (k = 0) \\ R(t) \sinh^{-1} \chi & (k = -1). \end{cases}$$

Coordenadas espaciales

Métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

$$r \equiv R(t)\chi, \quad K(t) \equiv \frac{k}{R(t)^2}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left(\frac{d\chi^2}{1 - k\chi^2} + \chi^2 d\theta^2 + \chi^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right).$$

$$R_p = R(t) \int_0^\chi \frac{d\chi}{\sqrt{1 - k\chi^2}} = \begin{cases} R(t) \sin^{-1} \chi & (k = +1) \\ R(t) \chi & (k = 0) \\ R(t) \sinh^{-1} \chi & (k = -1). \end{cases}$$

La escala local

A pequeñas escalas domina la fuerza electromagnética.

A la escala del SS y de la MW, incluso del LG, dominan los efectos gravitacionales locales.

La expansión del Universo se nota a escalas mayores a ~ 100 Mpc.

La escala local

A pequeñas escalas domina la fuerza electromagnética.

A la escala del SS y de la MW, incluso del LG, dominan los efectos gravitacionales locales.

La expansión del Universo se nota a escalas mayores a ~ 100 Mpc.

Calcule cuánto “crecería” usted en 1 año debido a la expansión del Universo (si no dominara la fuerza electromagnética a esa escala).

Expansión del Universo

Expresiones a 2do orden

$$R(t_e) = R(t_0) + (t_e - t_0) \frac{dR(t_0)}{dt} + \frac{1}{2} (t_e - t_0)^2 \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2}.$$

$$R(t_e) = R(t_0) \left[1 + H_0 (t_e - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t_e - t_0)^2 \right].$$

$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

$$t_0 - t_e = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2} \right) z^2 \right]$$

$$\chi = \frac{c}{R(t_0) H_0} \left[z - \frac{1}{2} (1 + q_0) z^2 \right].$$

Expansión del Universo

Expresiones a 2do orden

$$R(t_e) = R(t_0) + (t_e - t_0) \frac{dR(t_0)}{dt} + \frac{1}{2} (t_e - t_0)^2 \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2}.$$

$$R(t_e) = R(t_0) \left[1 + H_0 (t_e - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t_e - t_0)^2 \right].$$

$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

$$t_0 - t_e = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2} \right) z^2 \right]$$

$$\chi = \frac{c}{R(t_0) H_0} \left[z - \frac{1}{2} (1 + q_0) z^2 \right].$$

Expansión del Universo

Expresiones a 2do orden

$$R(t_e) = R(t_0) + (t_e - t_0) \frac{dR(t_0)}{dt} + \frac{1}{2} (t_e - t_0)^2 \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2}.$$

$$R(t_e) = R(t_0) \left[1 + H_0 (t_e - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t_e - t_0)^2 \right].$$

$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

$$t_0 - t_e = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2} \right) z^2 \right]$$

$$\chi = \frac{c}{R(t_0) H_0} \left[z - \frac{1}{2} (1 + q_0) z^2 \right].$$

Expansión del Universo

Expresiones a 2do orden

$$R(t_e) = R(t_0) + (t_e - t_0) \frac{dR(t_0)}{dt} + \frac{1}{2} (t_e - t_0)^2 \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2}.$$

$$R(t_e) = R(t_0) \left[1 + H_0 (t_e - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t_e - t_0)^2 \right].$$

$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

$$t_0 - t_e = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2} \right) z^2 \right]$$

$$\chi = \frac{c}{R(t_0) H_0} \left[z - \frac{1}{2} (1 + q_0) z^2 \right].$$

Expansión del Universo

Expresiones a 2do orden

$$R(t_e) = R(t_0) + (t_e - t_0) \frac{dR(t_0)}{dt} + \frac{1}{2} (t_e - t_0)^2 \frac{d^2 R(t_0)}{dt^2}.$$

$$R(t_e) = R(t_0) \left[1 + H_0 (t_e - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t_e - t_0)^2 \right].$$

$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

$$t_0 - t_e = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2} \right) z^2 \right]$$

$$\chi = \frac{c}{R(t_0) H_0} \left[z - \frac{1}{2} (1 + q_0) z^2 \right].$$

- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica**
- 4 Nucleosíntesis
- 5 CMB

Ecuación de Friedmann

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{8\pi G\rho(t)R(t)^2}{3}$$

$$H(t)^2 = -\frac{kc^2}{R(t)^2} + \frac{8\pi G\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}$$

Densidad crítica: $\rho_c = 3H(t)^2/(8\pi G)$

Parámetro de densidad (de materia): $\Omega_\rho = \rho/\rho_c$

Parámetro de densidad (c. cosm.): $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H(t)^2)$

Parámetro de densidad: $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

$$(1 - \Omega) H(t)^2 R(t)^2 = -kc^2.$$

$\Omega = 1 \rightarrow$ espacio plano

$\Omega > 1 \rightarrow$ curvatura positiva

$\Omega < 1 \rightarrow$ curvatura negativa

Ecuación de Friedmann

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{(8\pi G\rho(t) + \Lambda) R(t)^2}{3}$$

$$H(t)^2 = -\frac{kc^2}{R(t)^2} + \frac{8\pi G\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}$$

Densidad crítica: $\rho_c = 3H(t)^2/(8\pi G)$

Parámetro de densidad (de materia): $\Omega_\rho = \rho/\rho_c$

Parámetro de densidad (c. cosm.): $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H(t)^2)$

Parámetro de densidad: $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

$$(1 - \Omega) H(t)^2 R(t)^2 = -kc^2.$$

$\Omega = 1$ → espacio plano

$\Omega > 1$ → curvatura positiva

$\Omega < 1$ → curvatura negativa

Ecuación de Friedmann

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{(8\pi G\rho(t) + \Lambda) R(t)^2}{3}$$

$$H(t)^2 = -\frac{kc^2}{R(t)^2} + \frac{8\pi G\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}.$$

Densidad crítica: $\rho_c = 3H(t)^2/(8\pi G)$

Parámetro de densidad (de materia): $\Omega_\rho = \rho/\rho_c$

Parámetro de densidad (c. cosm.): $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H(t)^2)$

Parámetro de densidad: $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

$$(1 - \Omega) H(t)^2 R(t)^2 = -kc^2.$$

$\Omega = 1$ → espacio plano

$\Omega > 1$ → curvatura positiva

$\Omega < 1$ → curvatura negativa

Ecuación de Friedmann

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{(8\pi G\rho(t) + \Lambda) R(t)^2}{3}$$

$$H(t)^2 = -\frac{kc^2}{R(t)^2} + \frac{8\pi G\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}.$$

Densidad crítica: $\rho_c = 3H(t)^2/(8\pi G)$

Parámetro de densidad (de materia): $\Omega_\rho = \rho/\rho_c$

Parámetro de densidad (c. cosm.): $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H(t)^2)$

Parámetro de densidad: $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

$$(1 - \Omega) H(t)^2 R(t)^2 = -kc^2.$$

$\Omega = 1 \rightarrow$ espacio plano

$\Omega > 1 \rightarrow$ curvatura positiva

$\Omega < 1 \rightarrow$ curvatura negativa

Ecuación de Friedmann

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{(8\pi G\rho(t) + \Lambda) R(t)^2}{3}$$

$$H(t)^2 = -\frac{kc^2}{R(t)^2} + \frac{8\pi G\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}.$$

Densidad crítica: $\rho_c = 3H(t)^2/(8\pi G)$

Parámetro de densidad (de materia): $\Omega_\rho = \rho/\rho_c$

Parámetro de densidad (c. cosm.): $\Omega_\Lambda = \Lambda/(3H(t)^2)$

Parámetro de densidad: $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

$$(1 - \Omega) H(t)^2 R(t)^2 = -kc^2.$$

$\Omega = 1$ → espacio plano

$\Omega > 1$ → curvatura positiva

$\Omega < 1$ → curvatura negativa

$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{8\pi G\rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)} + \frac{\Lambda R(t)^2}{3}$$

$$\frac{d^2R(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi G\rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)^2} + \frac{\Lambda R(t)}{3}$$

- La autogravitación de la materia (ρ) tiende a frenar la expansión del universo (contribución negativa a la aceleración de $R(t)$).
- $\Lambda > 0 \equiv$ densidad negativa \rightarrow acelera la expansión.

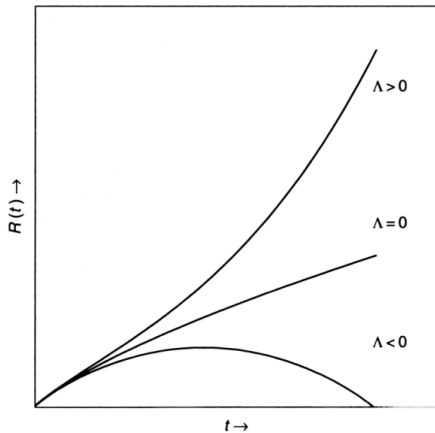
$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{8\pi G\rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)} + \frac{\Lambda R(t)^2}{3}$$

$$\frac{d^2R(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi G\rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)^2} + \frac{\Lambda R(t)}{3}$$

- La autogravitación de la materia (ρ) tiende a frenar la expansión del universo (contribución negativa a la aceleración de $R(t)$).
- $\Lambda > 0 \equiv$ densidad negativa \rightarrow acelera la expansión.

Historias de $R(t)$

Universo plano: $\Omega = 1$ ($k = 0$)



Modelo cosmológico más aceptado

- $\Omega = 1$ ($k = 0$) \Rightarrow geometría plana
- Λ valor arbitrario (posiblemente positivo).

$$R(t) = \begin{cases} R(t_0) \left(\frac{8\pi G\rho(t_0)}{\Lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \sinh^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{2} t \sqrt{3\Lambda} \right) & \Lambda > 0 \\ R(t_0) (6\pi G\rho(t_0))^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}} & \Lambda = 0 \\ R(t_0) \left(\frac{8\pi G\rho(t_0)}{|\Lambda|} \right)^{\frac{1}{3}} \sin^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{2} t \sqrt{3|\Lambda|} \right) & \Lambda < 0 \end{cases}$$

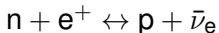
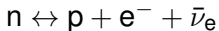
Modelo cosmológico más aceptado

- $\Omega = 1$ ($k = 0$) \Rightarrow geometría plana
- Λ valor arbitrario (posiblemente positivo).

$$R(t) = \begin{cases} R(t_0) \left(\frac{8\pi G\rho(t_0)}{\Lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \sinh^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{2} t \sqrt{3\Lambda} \right) & \Lambda > 0 \\ R(t_0) (6\pi G\rho(t_0))^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}} & \Lambda = 0 \\ R(t_0) \left(\frac{8\pi G\rho(t_0)}{|\Lambda|} \right)^{\frac{1}{3}} \sin^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{2} t \sqrt{3|\Lambda|} \right) & \Lambda < 0 \end{cases}$$

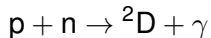
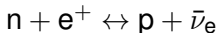
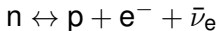
- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis**
- 5 CMB

Reacciones nucleares primordiales



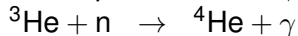
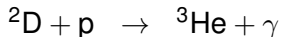
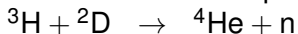
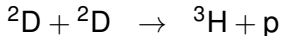
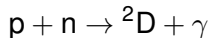
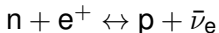
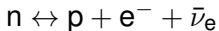
- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

Reacciones nucleares primordiales



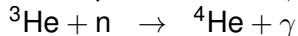
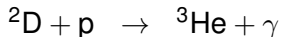
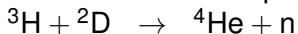
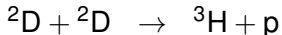
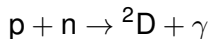
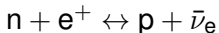
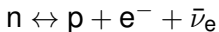
- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

Reacciones nucleares primordiales



- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

Reacciones nucleares primordiales



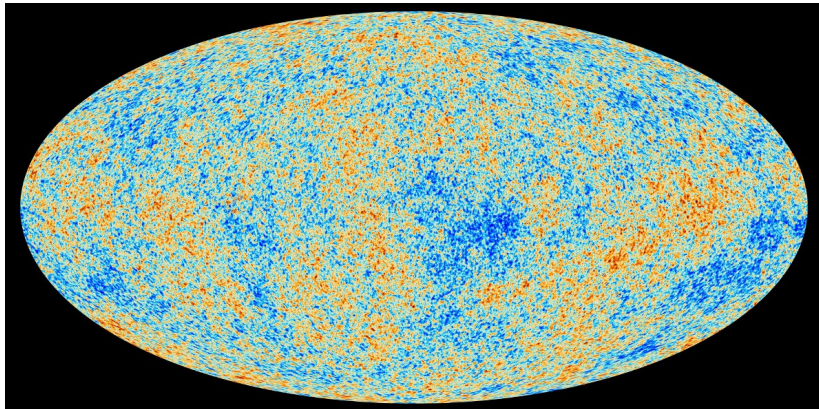
- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis
- 5 CMB**

Parámetros cosmológicos

Resultados del WMAP (2003)

Temp. del CMB	T_{CMB} (K)	2.725 ± 0.002
Constante de Hubble	H_0 ($\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$)	71^{+4}_{-3}
Densidad total	Ω	1.02 ± 0.02
Densidad de cte. cosmol.	Ω_Λ	0.73 ± 0.04
Densidad bariónica	Ω_b	0.044 ± 0.004
Densidad de DM	Ω_{DM}	0.22 ± 0.04
Densidad de fotones	Ω_γ (10^{-5})	(4.800 ± 0.014)
Edad del Universo	t_0 (Gyr)	13.7 ± 0.2
Corr. al rojo para $\rho = \rho_r$	z_{eq}	3233^{+194}_{-210}
Corr. al rojo de desacop.	z_{dec}	1089 ± 1
Edad de desacoplamiento	t_{dec} (10^3 yr)	379^{+8}_{-7}



Constante de Hubble	H_0 (km s ⁻¹ Mpc ⁻¹)	67.74 ± 0.46
Edad del Universo	t_0 (Gyr)	13.799 ± 0.021
Densidad de cte. cosmol.	Ω_Λ	0.6911 ± 0.0062
Densidad de materia	Ω_m	0.3089 ± 0.0062
Corr. al rojo de reioniz.	z_{re}	$8.8^{+1.7}_{-1.4}$
Corr. al rojo de desacop.	z_{dec}	1089.90 ± 0.23

- *Evolution of Stars and Stellar Populations*, Mauro Salaris & Santi Cassisi (Wiley-VCH, 2005).
- *Introduction to Cosmology*, Barbara Ryden (The Ohio State University).
- *Galaxies in the Universe: An Introduction*, Linda S. Sparke & John S. Gallagher III (Cambridge University Press, 2nd. Edition, 2000).