

# Astronomía Extragaláctica

## Cap. 1: Marco cosmológico

Profesor: Favio R. Faifer y Sergio A. Cellone

Facultad de Ciencias Astronómicas y  
Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata,  
Argentina

curso 2023

- 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-Lemaître

Diagrama de Hubble (1929)

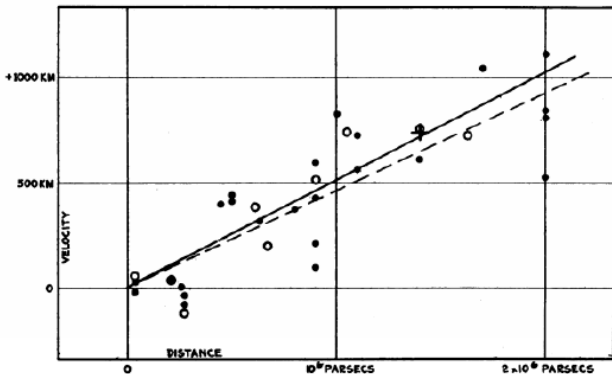


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

(Hubble 1929)

# La ley de Hubble-Lemaître

Diagrama de Hubble para galaxias más brillantes en cúmulos

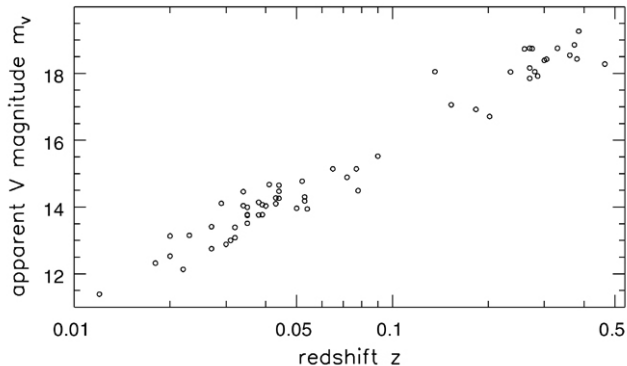


Fig 1.17 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

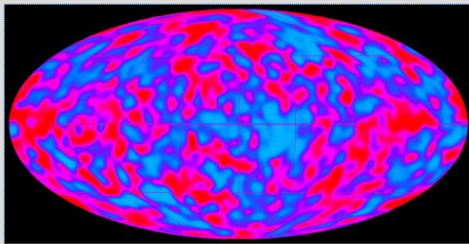
(Gunn & Oke, 1975)

# La ley de Hubble-Lemaître

Velocidades peculiares

	$d$	$m - M$	$V_r$
M 31	783 kpc	24.47	$-120 \text{ km s}^{-1}$
C. Virgo	16.6 Mpc	31.10	$-170 \text{ km s}^{-1}$
C. Coma	102.8 Mpc	35.06	$\sim 7200 \text{ km s}^{-1}$

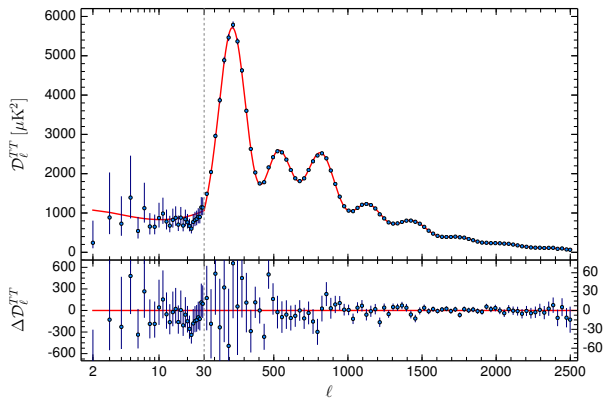
# El fondo cósmico de microondas: Cosmic Background Explorer (COBE)



*The cosmic microwave background radiation is a remnant of the Big Bang. These minute temperature variations (depicted here as varying shades of blue and purple) are linked to slight density variations in the early universe. These variations are believed to have given rise to the structures that populate the universe today: clusters of galaxies, as well as vast, empty regions.*

(<https://science.nasa.gov/missions/cobe>)

# El fondo cósmico de microondas



(Planck Collaboration, 2015)



- 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  $\sim 100$  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  $\sim 100$  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

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

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

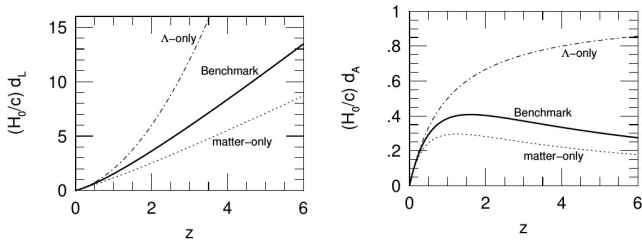
$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[ 1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

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

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

# Distancia de luminosidad y distancia angular

Tres modelos distintos de Universo



(Figura 7.2 y 7.4 - B. Rayden (2006))

$$d_L = \frac{cz}{H_0} \left[ 1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z \right]$$

$$d_A = \frac{cz}{H_0} \left[ 1 - \frac{3 + q_0}{2}z \right].$$

- 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

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

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

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:  $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

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

$\Omega = 1 \rightarrow$  espacio plano

$\Omega > 1 \rightarrow$  curvatura positiva

$\Omega < 1 \rightarrow$  curvatura negativa

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

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

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:  $\Omega = \Omega_\rho + \Omega_\Lambda$

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

$\Omega = 1 \rightarrow$  espacio plano

$\Omega > 1 \rightarrow$  curvatura positiva

$\Omega < 1 \rightarrow$  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 ( $\rho$ ) tiende a frenar la expansión del universo (contribución negativa a la aceleración de  $R(t)$ ).
- $\Lambda > 0 \equiv$  densidad negativa  $\rightarrow$  acelera la expansión.

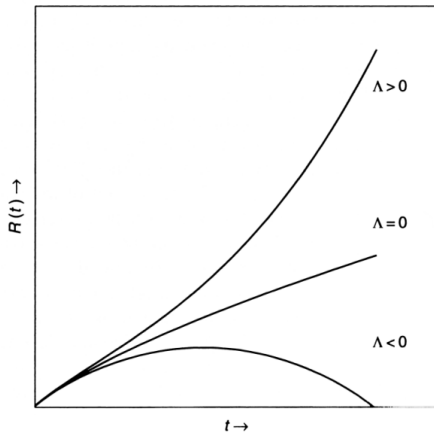
$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 = -kc^2 + \frac{8\pi G\rho(t_0)R(t_0)^3}{3R(t)} + \frac{\Lambda R(t)^2}{3}$$

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

- La autogravitación de la materia ( $\rho$ ) 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
- $\Lambda$  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

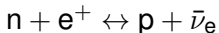
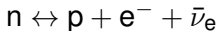
- $\Omega = 1$  ( $k = 0$ )  $\Rightarrow$  geometría plana
- $\Lambda$  valor arbitrario (posiblemente positivo).

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



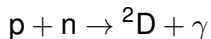
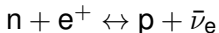
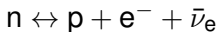
- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis**
- 5 CMB

# Reacciones nucleares primordiales



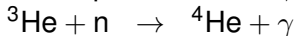
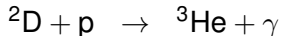
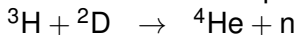
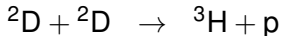
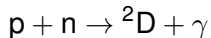
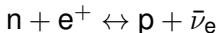
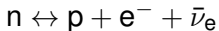
- 0.75 de protones (H)
- $\sim 0.25$  He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$  de deuterio
- $\sim 10^{-5}$  de  ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$  de Li.

# Reacciones nucleares primordiales



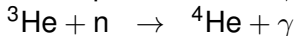
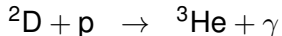
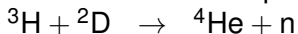
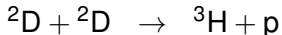
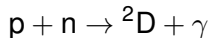
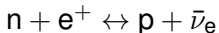
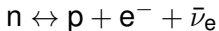
- 0.75 de protones (H)
- $\sim 0.25$  He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$  de deuterio
- $\sim 10^{-5}$  de  ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$  de Li.

# Reacciones nucleares primordiales



- 0.75 de protones (H)
- $\sim 0.25$  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)
- $\sim 0.25$  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**

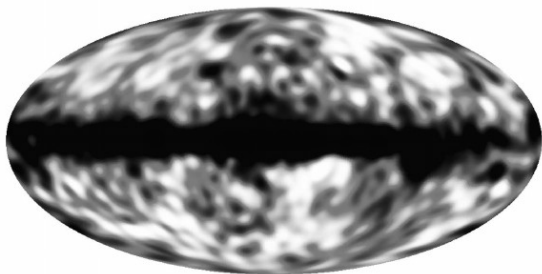
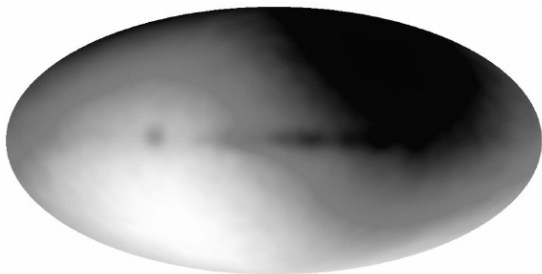
# Parámetros cosmológicos

Resultados del WMAP (2003)

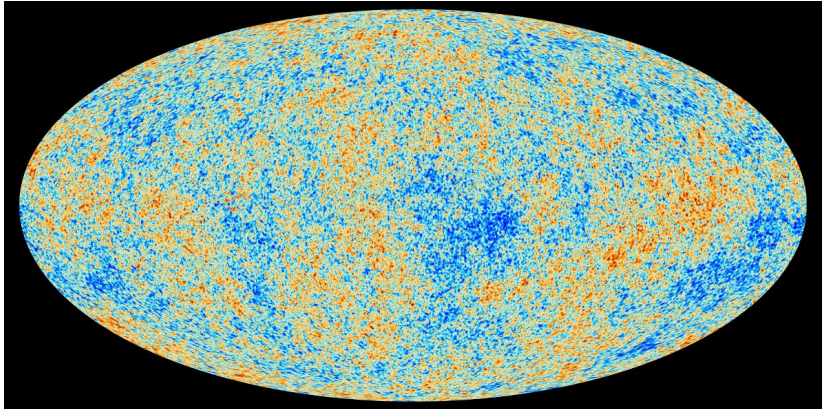
---

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

---







Constante de Hubble	$H_0$ (km s <sup>-1</sup> Mpc <sup>-1</sup> )	$67.74 \pm 0.46$
Edad del Universo	$t_0$ (Gyr)	$13.799 \pm 0.021$
Densidad de cte. cosmol.	$\Omega_\Lambda$	$0.6911 \pm 0.0062$
Densidad de materia	$\Omega_m$	$0.3089 \pm 0.0062$
Corr. al rojo de reioniz.	$z_{re}$	$8.8^{+1.7}_{-1.4}$
Corr. al rojo de desacop.	$z_{dec}$	$1089.90 \pm 0.23$

- *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).