

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 2024

- 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)

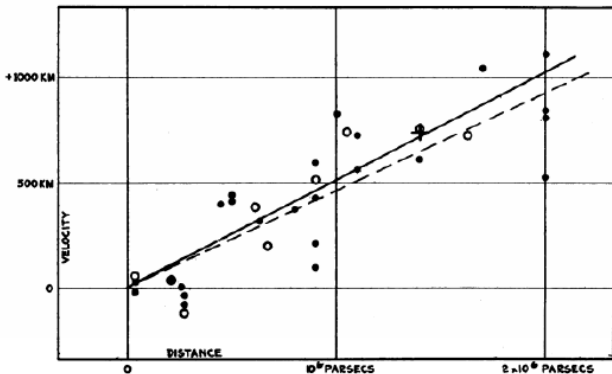


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

(Hubble 1929)

La ley de Hubble-Lemaître

Diagrama de Hubble para galaxias más brillantes en cúmulos

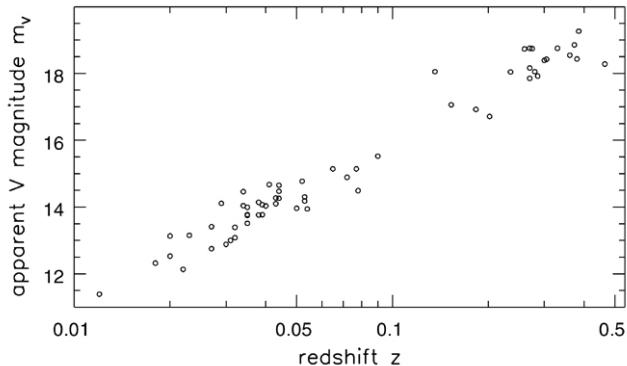


Fig 1.17 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

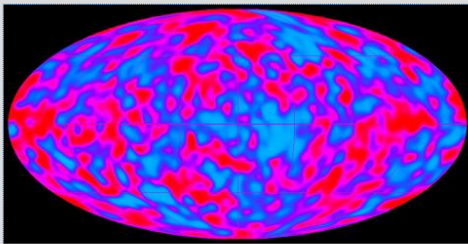
(Gunn & Oke, 1975)

La ley de Hubble-Lemaître

Velocidades peculiares

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

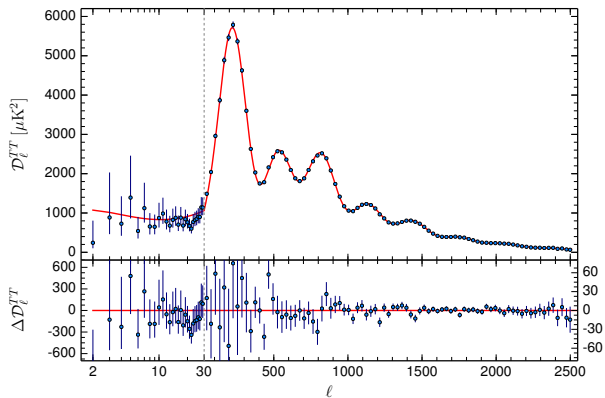
El fondo cósmico de microondas: Cosmic Background Explorer (COBE)



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 ~ 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

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

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

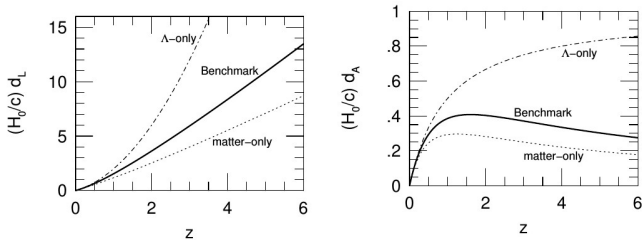
$$z = H_0 (t_0 - t_e) + H_0^2 (t_0 - t_e)^2 \left[1 + \frac{q_0}{2} \right].$$

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

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

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

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

$\Omega = 1$ → espacio plano

$\Omega > 1$ → curvatura positiva

$\Omega < 1$ → curvatura negativa

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

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

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

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

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

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 (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.

Modelo cosmológico más aceptado

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

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

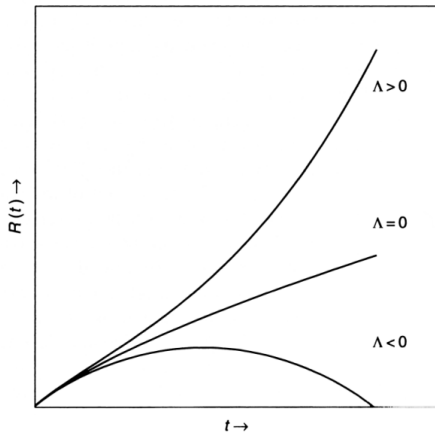
Modelo cosmológico más aceptado

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

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

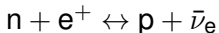
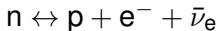
Historias de $R(t)$

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



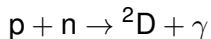
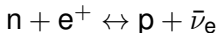
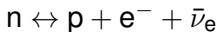
- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis**
- 5 CMB

Reacciones nucleares primordiales



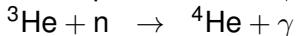
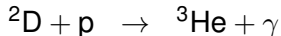
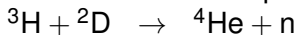
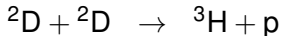
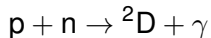
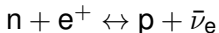
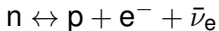
- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

Reacciones nucleares primordiales



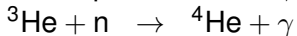
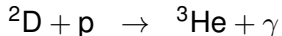
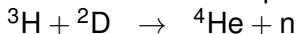
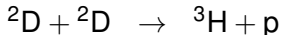
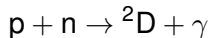
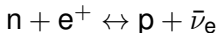
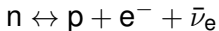
- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

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



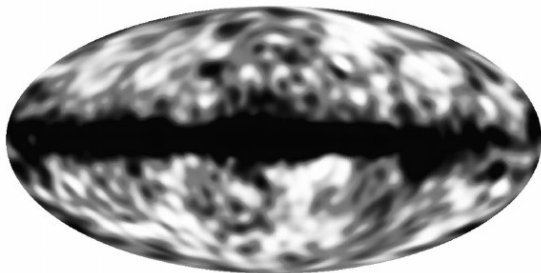
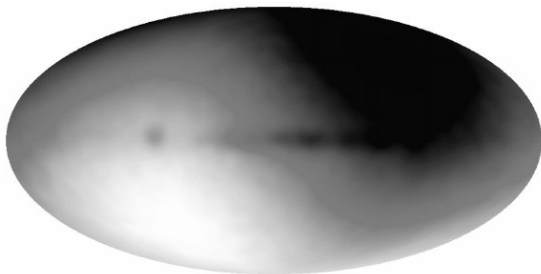
- 0.75 de protones (H)
- ~ 0.25 He (limitada por la abundancia de neutrones)
- $\sim 10^{-4}$ de deuterio
- $\sim 10^{-5}$ de ${}^3\text{He}$
- $\sim 10^{-10}$ de Li.

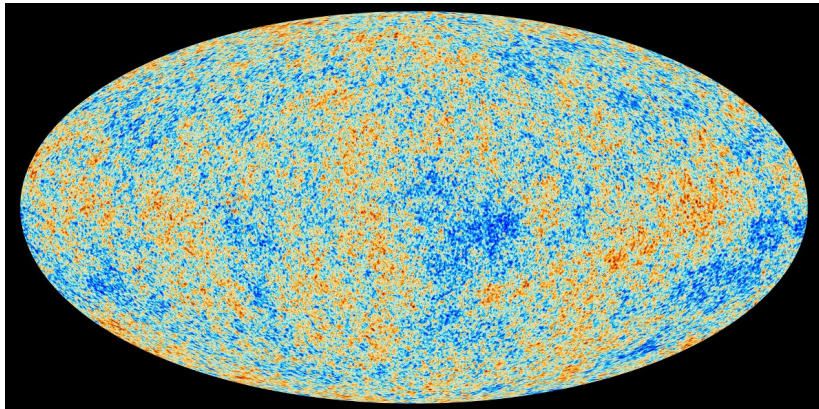
- 1 Bases observacionales
- 2 Cinemática cósmica
- 3 Dinámica cósmica
- 4 Nucleosíntesis
- 5 CMB**

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).