Fondo de Microondas

Big Bang

Fondo de Radiación Cósmica

Redshift del último escatering

Temperatura del Fondo

Densidad de Materia vs Densidad de Radiación

Parámetros Cosmológicos

- **Densidad: ρ**
  - **Densidad de masa - materia ordinaria**
  - **Energía Cinética de partículas y radiación**
  - **Energía asociada a campos**
  - **Energía asociada al vacío**
- **Curvatura: k/a^2 (a medida que el universo se estira, este término se hace menos importante),**
- **Consideremos un universo compuesto únicamente de:**
  - **materia bariónica (ordinaria) y oscura (exótica), ρ_m**
  - **curvatura, ρ_k**
  - **energía de vacío (constante cosmológica), ρ_Λ**

Parámetros cont.

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

$$1 = \frac{8\pi G}{3H^2}(\rho_m + \rho_\Lambda) - \frac{k}{R(t)^2 H^2}$$

$$\Omega_m = \frac{8\pi G}{3H^2}\rho_m, \quad \geq 0$$

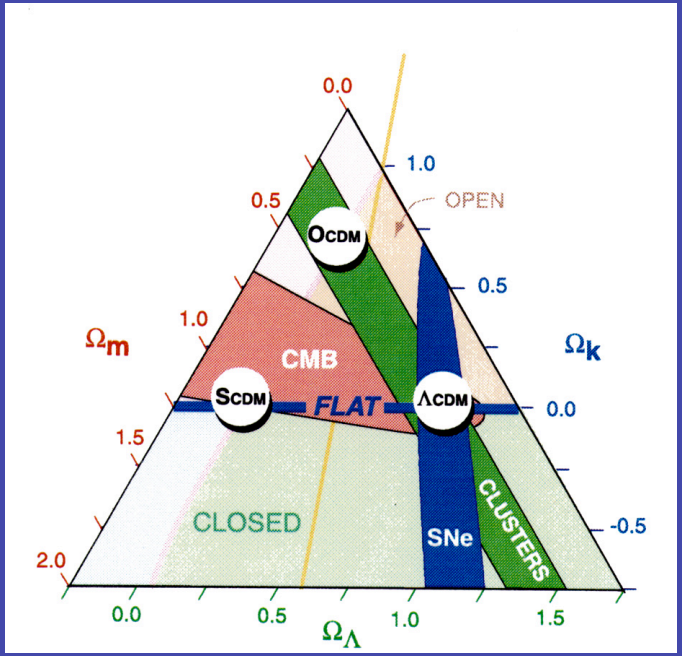
$$\Omega_\Lambda = \frac{8\pi G}{3H^2}\rho_\Lambda, \quad \gtrless 0$$

$$\Omega_k = -\frac{k}{(RH)^2}, \quad \gtrless 0$$

$$1 = \Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda$$

Modelos, CDM

Model	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	H_o	Tilt	Age
Cosmological const. (ΛCDM)	1/3	2/3	0	65	1	14.1
Open (OCDM)	1/3	0	2/3	65	1.3	12.0
Standard (SCDM)	1	0	0	50	1	13.0
Tilted (TCDM)	1	0	0	50	0.7	13.0



Paradigma Actual

1- Universo evoluciona

⇒Big Bang

⇒ Inflación

⇒ Era dominada por Radiación

⇒ Era dominada por Materia

⇒ Era dominada por Energía Oscura

2- La Gravedad es la Fuerza principal que determina la evolución Cósmica

3- Perturbaciones de densidad crecen a partir de pequeñas fluctuaciones aleatorias generadas durante inflación.

4- El Universo está hecho de:

- **materia bariónica (estrellas, planetas, gas)**
- **materia oscura, fría (CDM) o caliente (HDM)**
- **energía oscura**

5- Universo Plano: $\Omega_{Total} = 1$

BIG BANG

PRINCIPIO COSMOLÓGICO

UNIVERSO

HOMOGÉNEO / ISOTRÓPICO

MÉTRICA R-W CONSISTENTE

tiempo propio

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

factor de escala

k : CURVATURA ESPACIAL 0 o ± 1

Notación :

$$R(t) \equiv a(t)$$

REDSHIFT $\quad 1+z = \dfrac{a(t_0)}{a(t_e)}$ — t_0: Tiempo recepción; t_e: Tiempo emisión

DINÁMICA <=> ECS CAMPO DE EINSTEIN

$$3\left(\frac{\dot{a}}{a}\right) = 8\pi G\rho - \frac{3kc^2}{a^2} + \Lambda$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right)$$

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \qquad \Omega = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}$$

$$H_0 = H(t_0) \qquad \Omega_0 = \Omega(t_0)$$

Notación:

$R(t) \equiv a(t)$

Ecuación de Evolución del Universo en función de tres constantes universales, H_0, Ω_M y Ω_Λ

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho_0\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 = -\frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \qquad (2.02)$$

Multiplying through by $1/H_0$ yields

$$\left(\frac{R_0}{\dot{R}_0}\right)^2\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8}{3H_0}\pi G\rho_0\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 - \left(\frac{kc^2}{R_0^2H_0^2}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \qquad (3.07)$$

or, after dividing through by $(R_0/R)^2$,

$$\left(\frac{\dot{R}}{\dot{R}_0}\right)^2 = \Omega_M\left(\frac{R_0}{R}\right) + \Omega_k + \Omega_\Lambda\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \qquad (3.08)$$

Notación:

$$R(t) \equiv a(t)$$

Si $\Omega_k = 1 - \Omega_M - \Omega_\Lambda$ y si $x = R/R_0 = a/a_0$

$$\left(\frac{1}{H_0}\right)^2\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = 1 + \Omega_M\left(\frac{1}{x} - 1\right) + \Omega_\Lambda\left(x^2 - 1\right)$$

$$q_0 = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda$$

El Fondo de Microondas

El modelo del Big Bang predice que el universo era distinto en el pasado de lo que es ahora:

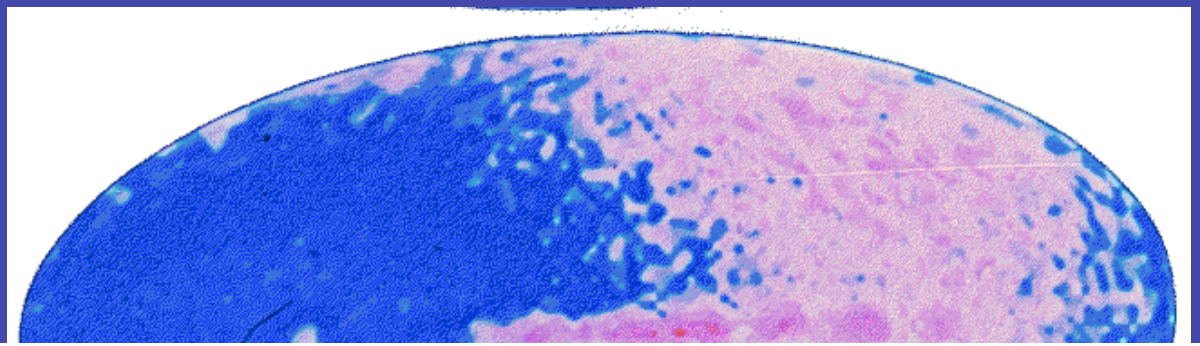
- **Más caliente**
- **Más denso**

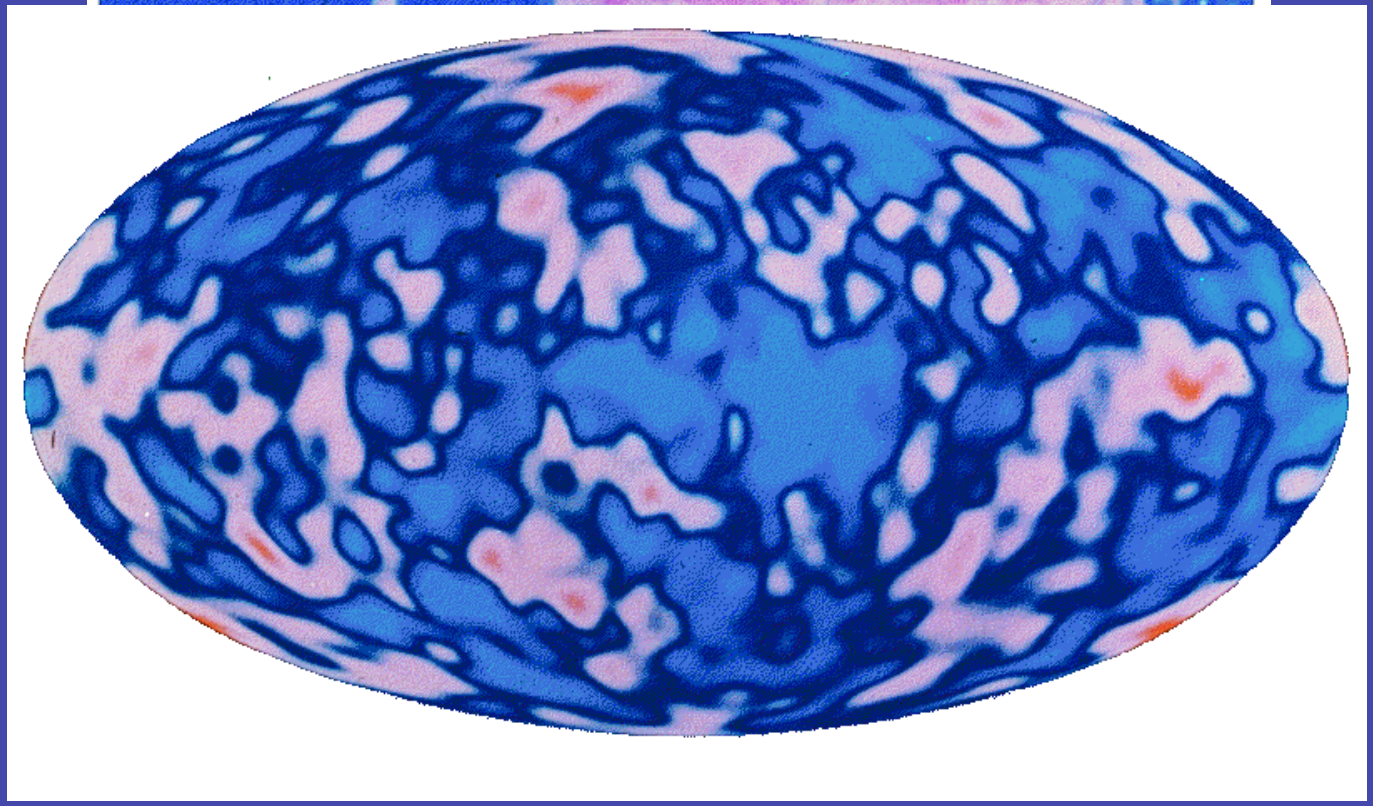
La evidencia más directa del Big Bang es la radiación del "Fondo de Microondas". Observaciones recientes indican que la temperatura del fondo actual es de 2.73 grados Kelvin.

¿Cómo es la radiación?

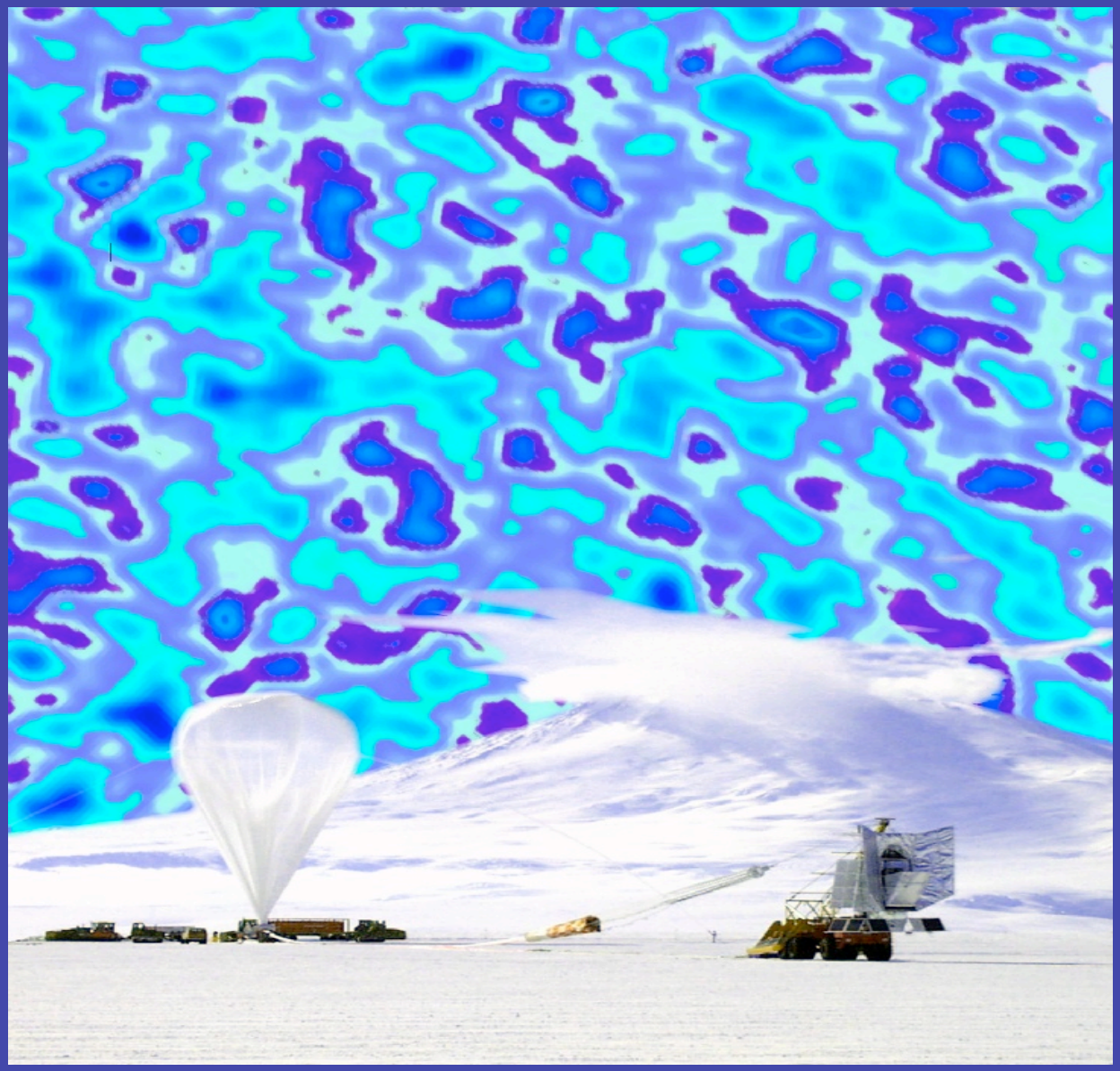
- 1965, Penzias y Wilson, radiación llena el Universo.
- 1991, observaciones con COBE.
  - ✓Cuerpo negro, T =2.73 K, Radiación casi perfectamente isotrópica
  - ✓Levemente más caliente hacia constelación de Leo
    - ➪ Resultado del movimiento general de la Tierra con una velocidad de ~ 390 km./s hacia Leo
    - ➪ Vía Láctea se mueve hacia Centauros con 600 km../s.
- 1999, observaciones con BOOMERANG
- 2003, WMAP

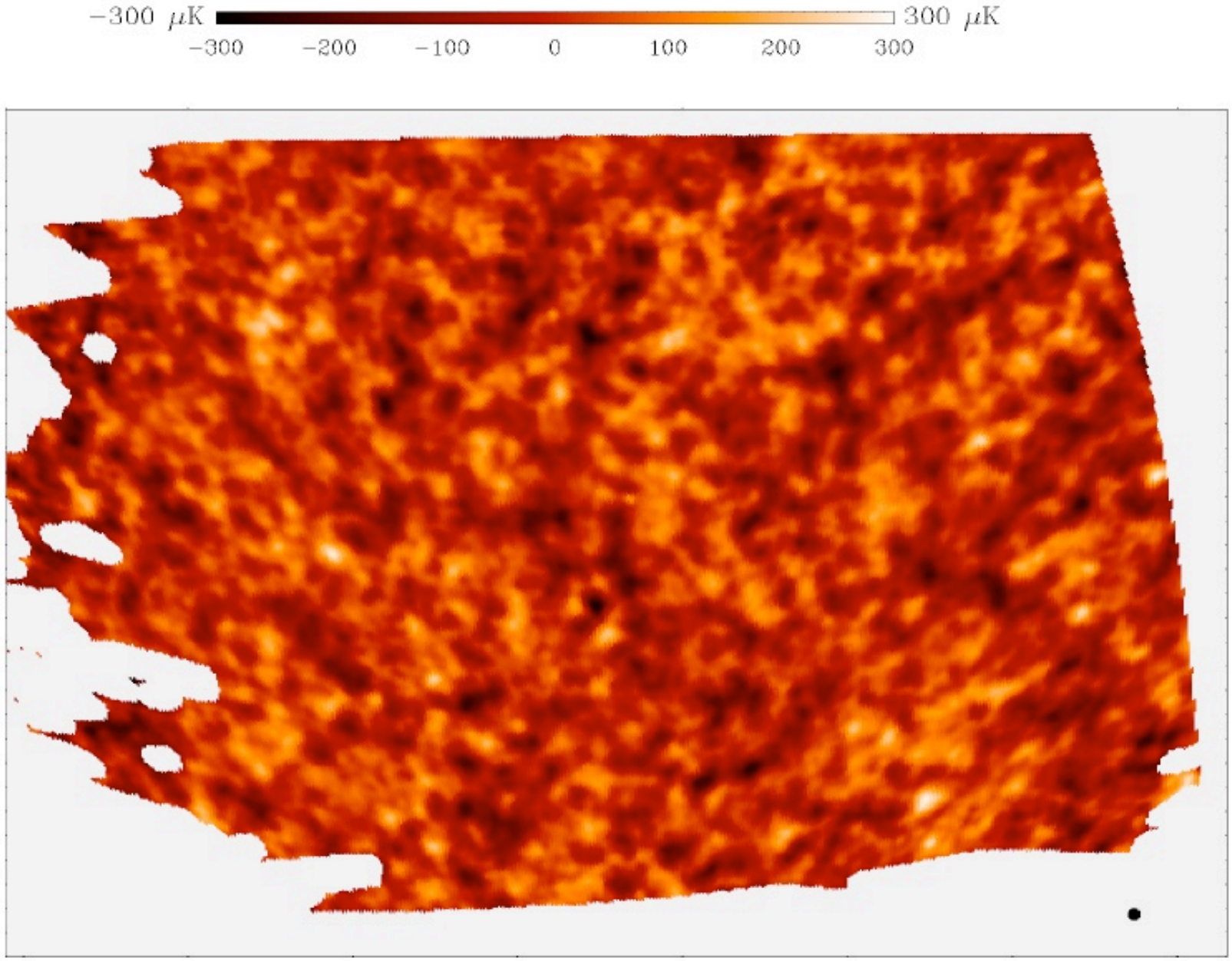
COBE

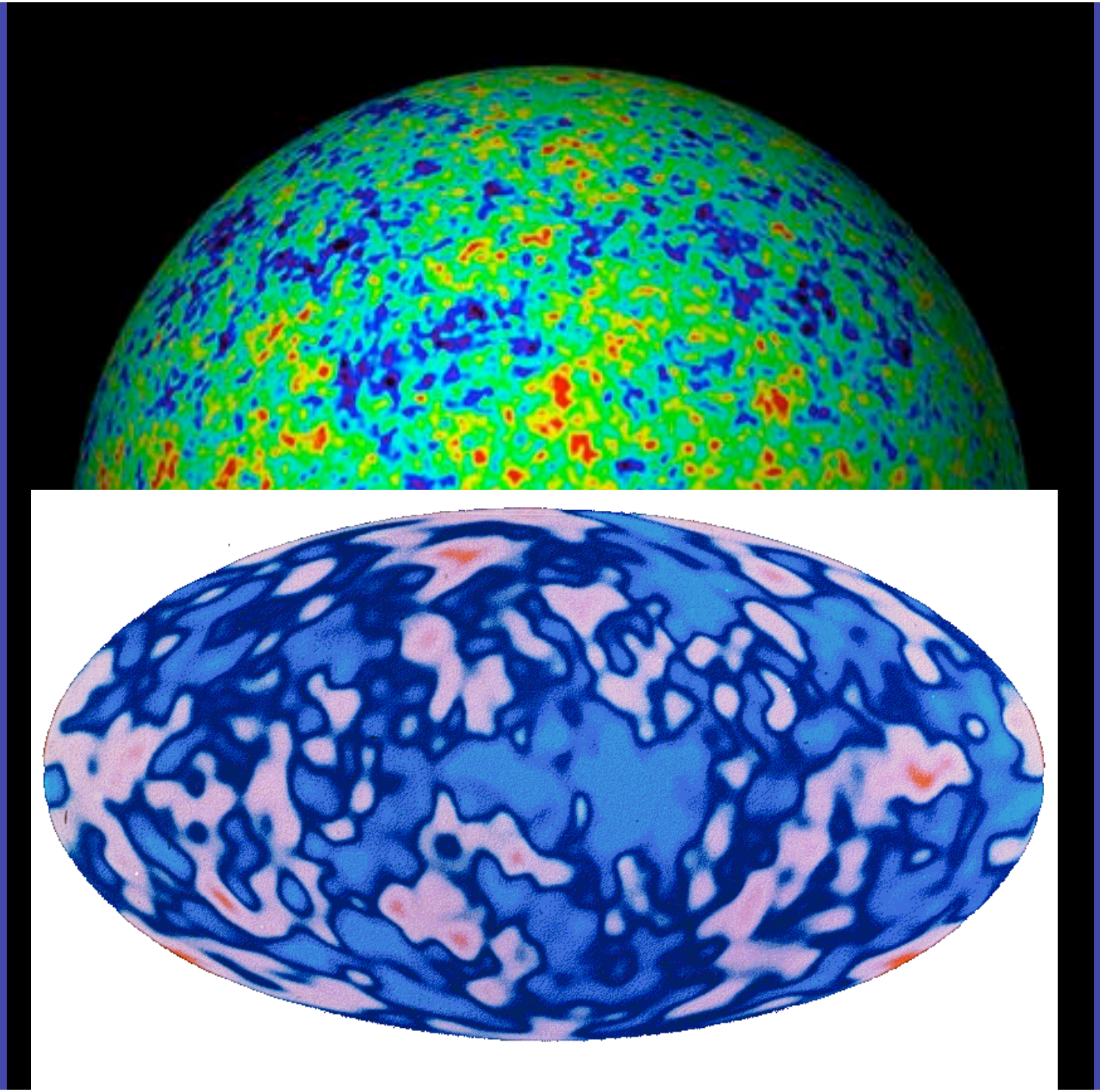




Boomerang




−300 μK
300 μK
−300
−200
−100
0
100
200
300



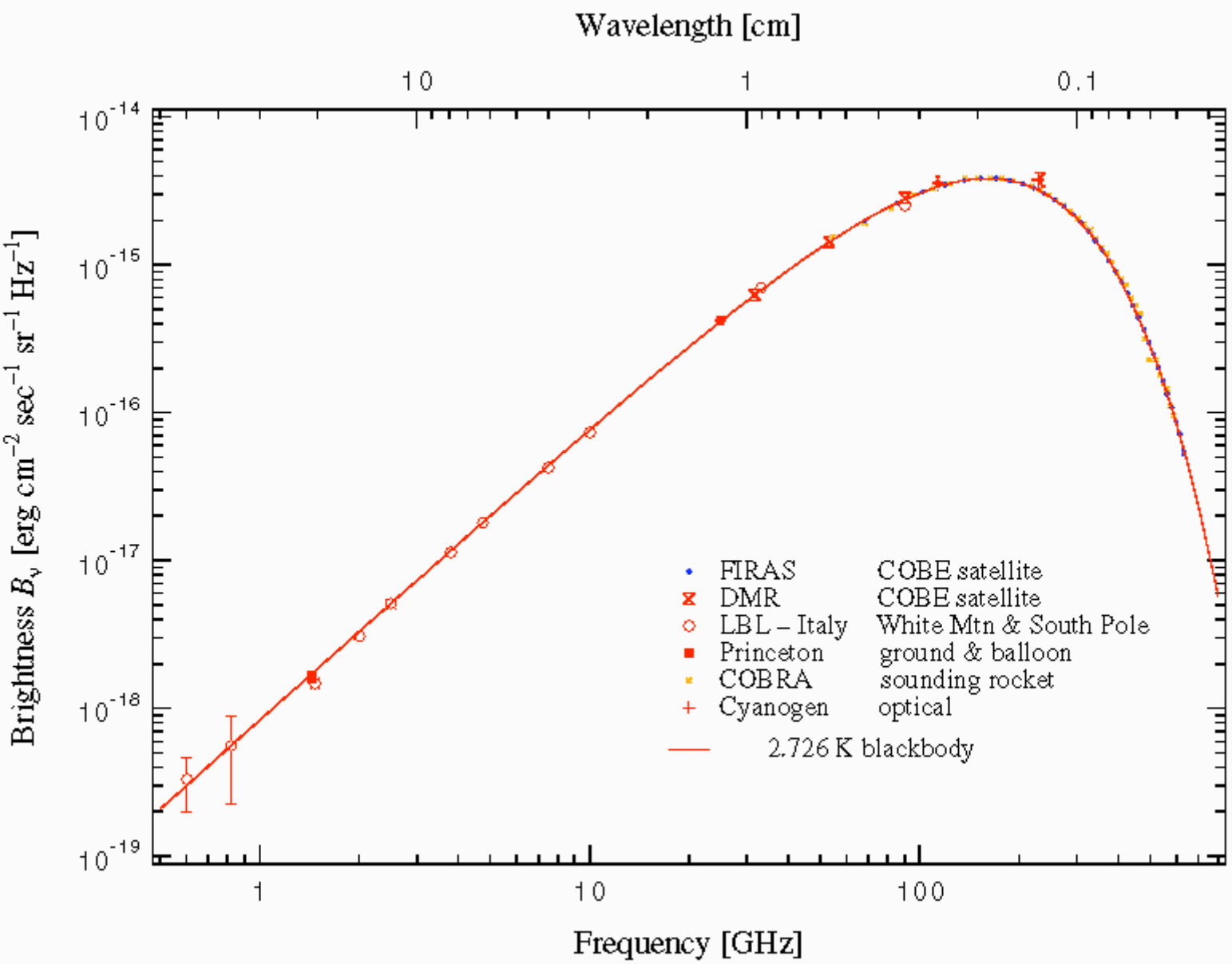
¿De donde viene esta radiación?

Dado el redshift, la temperatura del fondo de microondas ha cambiado con redshift, específicamente, $\nu_e = \nu_0(1+z) \Rightarrow T=T_0(1+z)$

Esto significa que el universo era mucho más caliente en el pasado que lo que es ahora. Atrás, hubo un tiempo en que el hidrógeno estaba completamente ionizado;

- **los electrones podían difundir fotones libremente.**
- **Camino medio de fotones era muy corto**
- **Energía de los fotones distribuidas como un cuerpo negro.**

Eventualmente la temperatura bajó lo suficiente de manera que los electrones se recombinaron y formaron átomos de hidrógeno. A este tiempo se le llama tiempo de "último escatering", donde los electrones ya no pueden interactuar mas con los fotones, y la luz queda libre para viajar por el universo.


Wavelength [cm]
10
1
0.1
10^{-14}
10^{-15}
10^{-16}
10^{-17}
10^{-18}
10^{-19}
Brightness B_ν [erg cm^{-2} sec^{-1} sr^{-1} Hz^{-1}]
1
10
100
Frequency [GHz]
FIRAS COBE satellite
DMR COBE satellite
LBL – Italy White Mtn & South Pole
Princeton ground & balloon
COBRA sounding rocket
Cyanogen optical
2.726 K blackbody

Redshift del último escatering

¿Cuál es el redshift del último escatering? O de otra forma: ¿Cuándo se hizo neutro la mayor parte del hidrógeno?

Supongamos que en el universo hay sólo hidrógeno. Consideremos la ecuación de Saha, que da la fracción de un elemento en estado ionizado i+1 respecto a i:

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} N_e = 2\left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} \frac{u_{i+1}}{u_i} e^{-\chi/kT}$$

u	**Función partición (2 para H neutro, 1 para H ionizado)**
χ	**Energía de ionización del H (13.6 eV)**
N	**Número total de partículas por cm^3.**

Claramente, para hidrógeno puro,
$N_e = N_{i+1}$
$N = N_{i+1} + N_i$

Si $x = N_{i+1}/N$ es la fracción de ionización entonces

$$\frac{Nx^2}{1-x} = \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} e^{-\chi/kT}$$

Si sustituimos N usando $\rho = \mathrm{N m_H}$, $T = T_0(1+z)$

y notamos que

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 = \rho_0 (1+z)^3$$

de tal forma que

$$\frac{x^2}{1-x} = \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} \frac{m_H}{\rho_0} (1+z)^{-3/2} e^{-\chi/kT_0(1+z)}$$

Recombinación debe ocurrir cuando $x = 0.5$.

Con esta sustitución, el redshift de recombinación se calcula a partir de

$$(1+z) = \left(\frac{2\pi m_e k T_0}{h^2}\right)\left(\frac{m_H}{\rho_0}\right)^{2/3}\left(\frac{1-x}{x^2}\right)^{2/3} e^{-2\chi/3kT_0(1+z)}$$

TAREA

Resolver esta ecuación numéricamente

Resultado: recombinación ocurrió z~1500 y T_{rec}~4000 ^oK

¿Cómo varía la densidad de materia, ρ_m, y la densidad de densidad de radiación, ρ_{rad}, con el tiempo o con el factor de escala, R?

1964, Penzias y Wilson $\Rightarrow$ $T \neq 0$

Consideremos $R(t)$ para $t \rightarrow 0$

Radiación $\Rightarrow$ 1ra termodinámica

$$dQ = dU + PdV$$

Energía Interna

Trabajo mecánico

Si $dQ = 0$ (no hay disipación)

$$\frac{dU}{dt} = -P\frac{dV}{dt}$$

$$U_{rad} = \rho_{rad} c^2 R^3 \quad [\text{Vol} \quad R^3]$$

$$P_{rad} = \rho_{rad} \frac{c^2}{3}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\rho_{rad}c^2R^3\right) = -\rho_{rad}\frac{c^2}{3}\frac{dR^3}{dt}$$

$$= -\rho_{rad}\frac{c^2}{3}3R^2\frac{dR}{dt} \quad / xR$$

Pero, $\frac{d}{dt}\left(\rho_{rad}R^4\right) = \rho_{rad}R^3\frac{dR}{dt} + R\frac{d}{dt}\left(\rho_{rad}R^3\right)$

$$\Rightarrow \quad \frac{d}{dt}\left(\rho_{rad}R^4\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \left(\rho_{rad}R^4\right) = \text{cte} = \left(\rho_{0,rad}R_0^4\right)$$

Recordemos que $\rho_m R^3 = cte = \rho_{0,m}R_0^3$

$$\rho_{rad} \propto R^{-4} \quad \text{y} \quad \rho_m \propto R^{-3}$$

Las densidades se cruzan en $z \approx 1000$ (recombinación)

El universo era dominado por radiación en el pasado, $R \propto t^{1/2}$

Si la radiación tiene energía y la energía es equivalente a la masa, ¿hay suficiente radiación hoy para cerrar el universo?

Cuerpo negro $\rho_{rad} = aT^4/c^2$, para $T = 3^oK$

$\Rightarrow \rho_{rad} = 6.5 \times 10^{-34}$ gr/cc

mucho menor que ρ_m en galaxias

$\Rightarrow$ Vivimos en una época dominada por materia o por energía oscura (constante cosmológica).