

Clase anterior

- Nociones de Cosmología. Algunas preguntas fundamentales.
- Estructura de Gran Escala. Principio Cosmológico (homogeneidad e isotropía).
- Expansión del Universo. Ley de Hubble.
- Modelo de expansión homogénea e isotrópica.
- Modelos de Universos abiertos y cerrados. Modelo de Einstein-de Sitter.
- Parámetro de desaceleración y factor de densidad.

Evolución de la temperatura

- Para este tema (cosmología no relativista) vengo siguiendo el libro de Battaner 1996 ("Astrophysical Fluid Dynamics", cap. 8).

- Si queremos estudiar la evolución de la temperatura, escribimos la ecuación de balance de calor:

$$\frac{3}{2} \frac{\rho k_B}{m_p} (\partial_t T + \underline{u} \cdot \nabla T) = -\rho \nabla \cdot \underline{u}$$

- Mantenemos por supuesto nuestras hipótesis de homogeneidad e isotropía. Para la presión suponemos dos escenarios:

(a) Universo dominado por materia

$$\rho = \frac{\rho k_B T}{m_p} \rightarrow \frac{3}{2} \frac{\rho k_B}{m_p} (\partial_t T + \underline{u} \cdot \nabla T) = -\frac{\rho k_B T}{m_p} \nabla \cdot \underline{u}$$

$\nabla T = 0$
(homogeneo)

$$\left. \begin{array}{l} \underline{u} = H \underline{r} \\ \nabla \cdot \underline{r} = 3 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = -2H$$

$$H = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \rightarrow TR^2 = \text{cte} \rightarrow T = T_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2$$

(b) Universo dominado por radiación (se enfría)

$$\rho = \frac{4\sigma T^4}{3c} \rightarrow \frac{3}{2} \frac{\rho k_B}{m_p} \frac{dT}{dt} = -\frac{4\sigma T^4}{3c} \cdot 3H$$

σ : Stefan-Boltzmann

Ahora usamos que $\rho = \rho_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3$ y que $H = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$

Entonces: $\left[\frac{3}{8} \frac{k_B c}{m_p \sigma} \rho_0 R_0^3 \right] \frac{1}{T^4} \frac{dT}{dt} = -R^2 \frac{dR}{dt}$

Probamos $T \sim R^a \rightarrow a = -1 \rightarrow TR = \text{cte}$

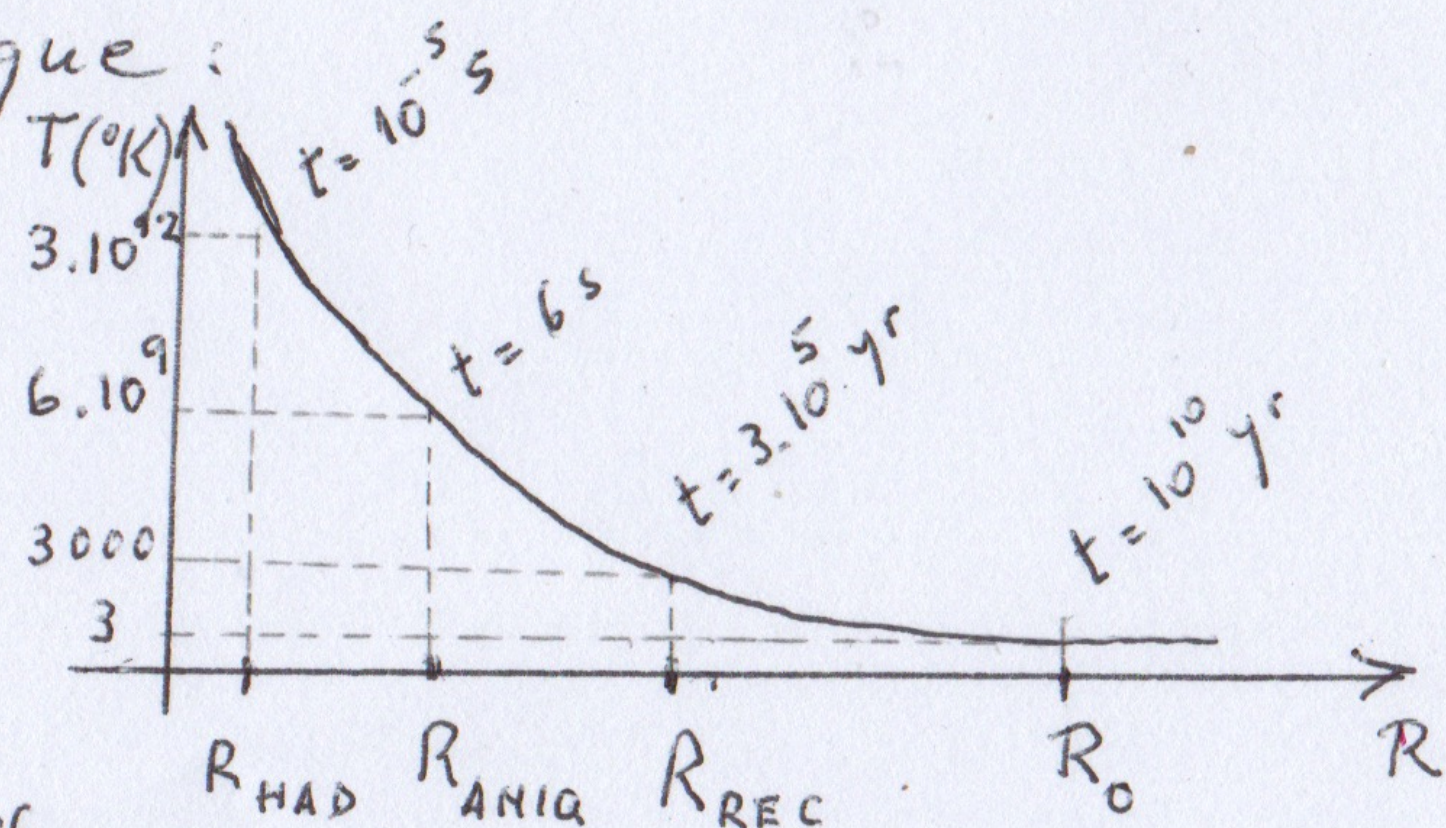
$$\therefore T = T_0 \left(\frac{R_0}{R} \right) \text{ (se enfría, pero menos)}$$

Epocas del Universo

- Pese a lo simple del modelo, intentemos ver como se veía el Universo si retrocedemos en el tiempo, usando que:

$$T = T_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)$$

$$R = R_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{2/3}$$



- El Universo hoy está lleno de átomos formados en estrellas, pero H y He son primordiales.

- Hacia el pasado T crece. Para $T_{REC} \sim 3000K$ cruzamos la era de recombinación, donde e^- libres condensaron en átomos neutros de H. Cuando fue eso?

$$\frac{R_{REC}}{R_0} \sim \frac{T_0}{T_{REC}} \sim \frac{3K}{3000K} \sim 10^{-3}$$

$$\frac{R_{REC}}{R_0} \sim \left(\frac{t_{REC}}{t_0} \right)^{2/3} \sim 10^{-3} \quad \begin{matrix} \xrightarrow{t_0 \sim 10^{10} \text{ yr}} \\ t_{REC} \sim 3 \cdot 10^5 \text{ yr} \end{matrix}$$

- Ocurrió aprox. $3 \cdot 10^5 \text{ yr}$ después del Big Bang cuando el Universo era mil veces más pequeño.

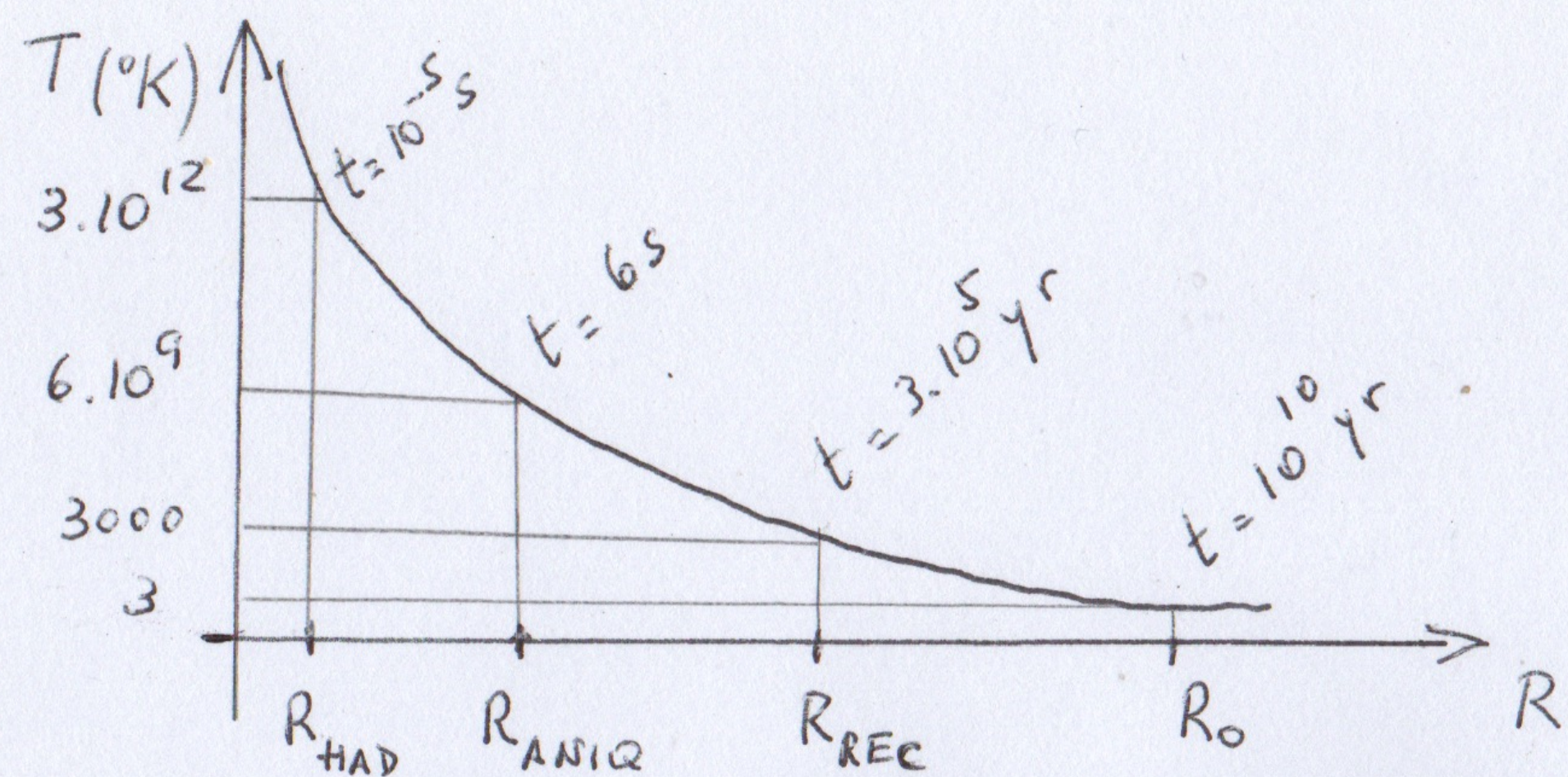
- Antes de eso radiación y materia estaban acoplados y posiblemente en equilibrio termodinámico, pero en t_{REC} los e^- libres quedaron ligados y el Universo se volvió transparente.

- El espectro de radiación quedó entonces congelado, con un cuerpo negro de $3000K$ (infrarrojo), el cual se fue enfriando por expansión, hasta los $3K$ actuales (microondas).

- Ese espectro de radiación de gran escala, correspondiente a un cuerpo negro de $3K$ y además homogéneo e isotrópico, es lo que conocemos como radiación de fondo de microondas.

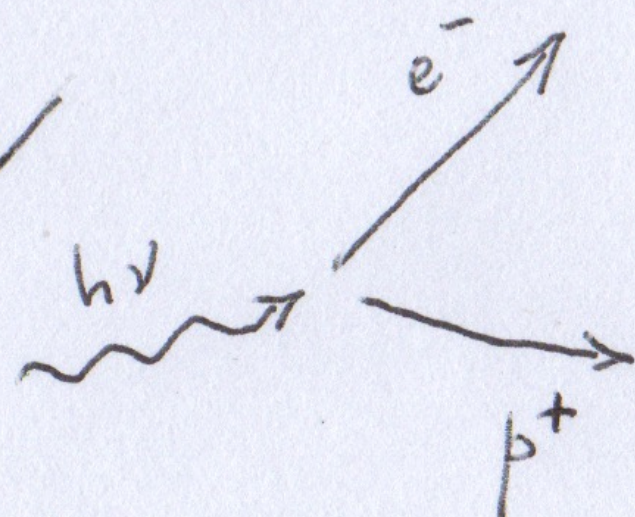
- La materia se desacopló de la radiación. Los grupos sobredensos y autogravitantes formaron galaxias. La expansión las separó a distancias de 10^3 veces su tamaño.

Epocas del Universo



- Si seguimos retrocediendo en el tiempo, el Universo debió alcanzar la era de aniquilación, con una $T_{ANIQ} \sim 6 \cdot 10^9 \text{ K}$ correspondiente a la energía de creación de pares $e^- - p^+$, es decir

$$k_B T_{ANIQ} \approx m_e c^2 \approx 511 \text{ keV}$$



- Cuando ocurrió?

$$\frac{R_{ANIQ}}{R_0} \sim \frac{T_0}{T_{ANIQ}} \sim \frac{3 \text{ K}}{6 \cdot 10^9 \text{ K}} \sim 5 \cdot 10^{-10}$$

$$t_{ANIQ} \sim 6 \text{ s} \quad (\text{con modelos más precisos})$$

- Además de crear e^- y p^+ a partir de fotones UV, en esa época se produjo nucleosíntesis de He, es decir, crear núcleos de He (partículas α) a partir de dos protones más dos neutrones.

- Yendo aun más atrás en el tiempo, apenas 10^{-5} después del Big Bang, la temperatura era

$$k_B T_{HAD} \sim 1 \text{ GeV} \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ K} \sim m_p c^2$$

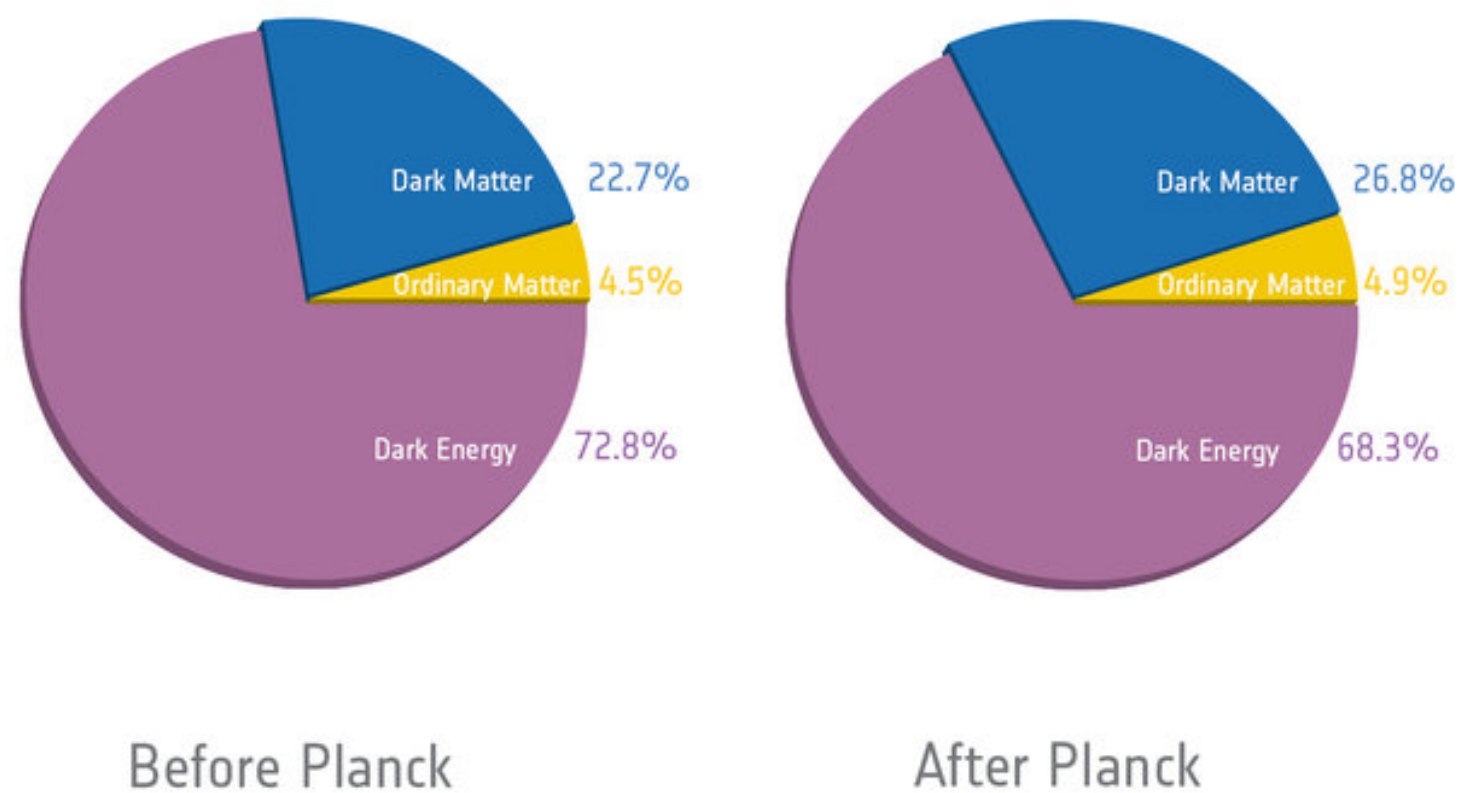
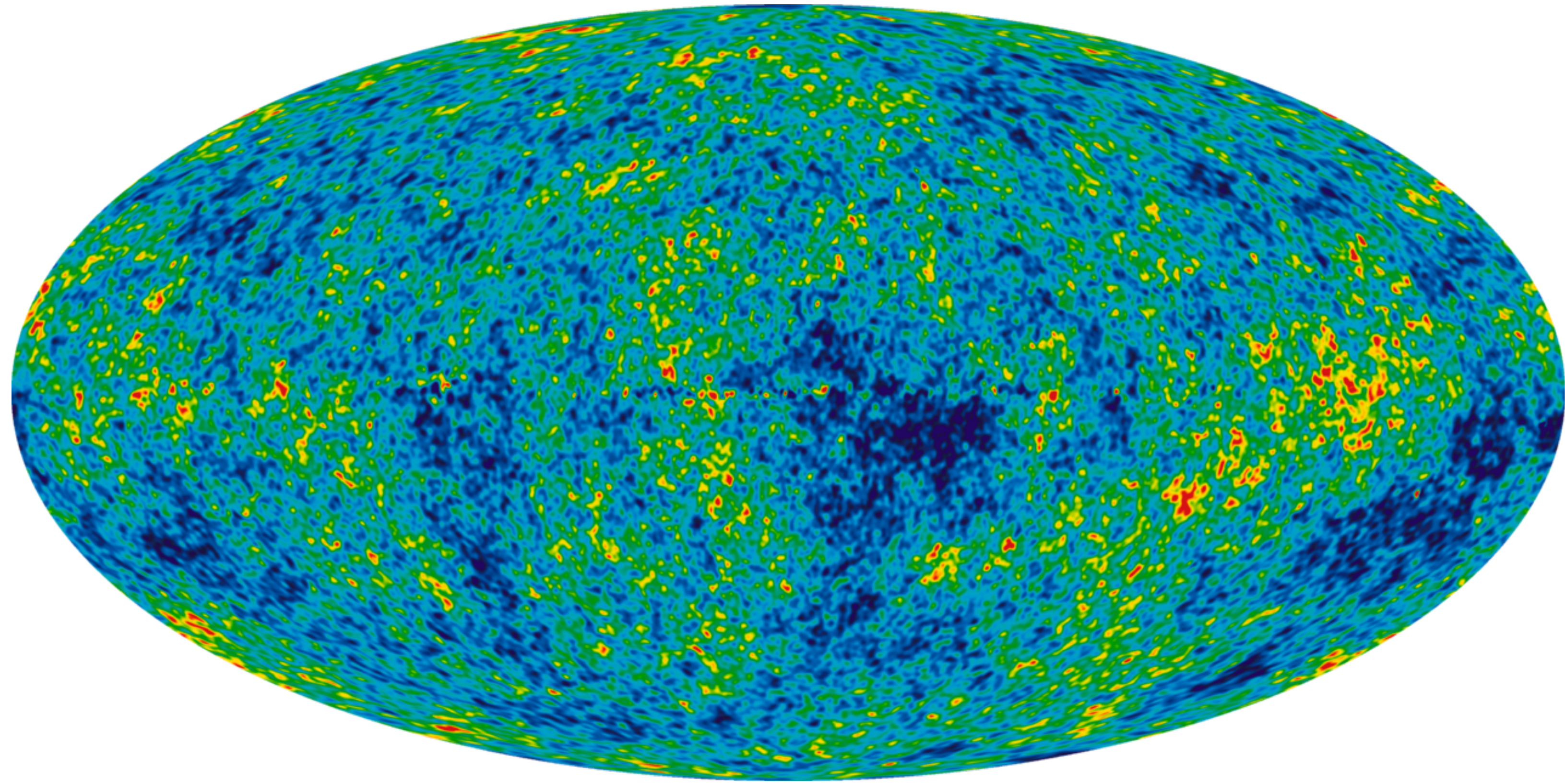
A esas energías se producen hadrones a partir de quarks.

- Antes de eso, el Universo se supone formado por una sopa de quarks y gluones, en la llamada era de los quarks.

- Cerca del Big Bang, se requiere incorporar Relatividad General y Mecánica Cuántica para una descripción adecuada.

Radiación de fondo de microondas

- La radiación de fondo de microondas fue observada por Penzias y Wilson en 1965.
- Corresponde a emisión de cuerpo negro casi perfecto de $T_{CMB} = 2.725 K$.
- Este resultado fue confirmado por los satélites COBE (1989), WMAP (1996) y Planck (2009).
- Se verifica además un altísimo grado de isotropía, con $\Delta T_{CMB} = 18 \mu K$.
- De un estudio detallado de las pequeñas anisotropías, se puede estimar el contenido de materia oscura.



- Estos resultados son consistentes con el modelo cosmológico Λ CDM, que corresponde a un Universo con constante cosmológica (energía oscura) y compuesto por materia oscura fría (CDM) y algo de materia bariónica.
- La constante cosmológica Λ en las ecs. Einstein representa la energía de vacío distribuida espacialmente en ausencia de materia. Esa energía es opuesta a la gravedad y provoca la expansión acelerada en la época actual.

Epocas del Universo

