

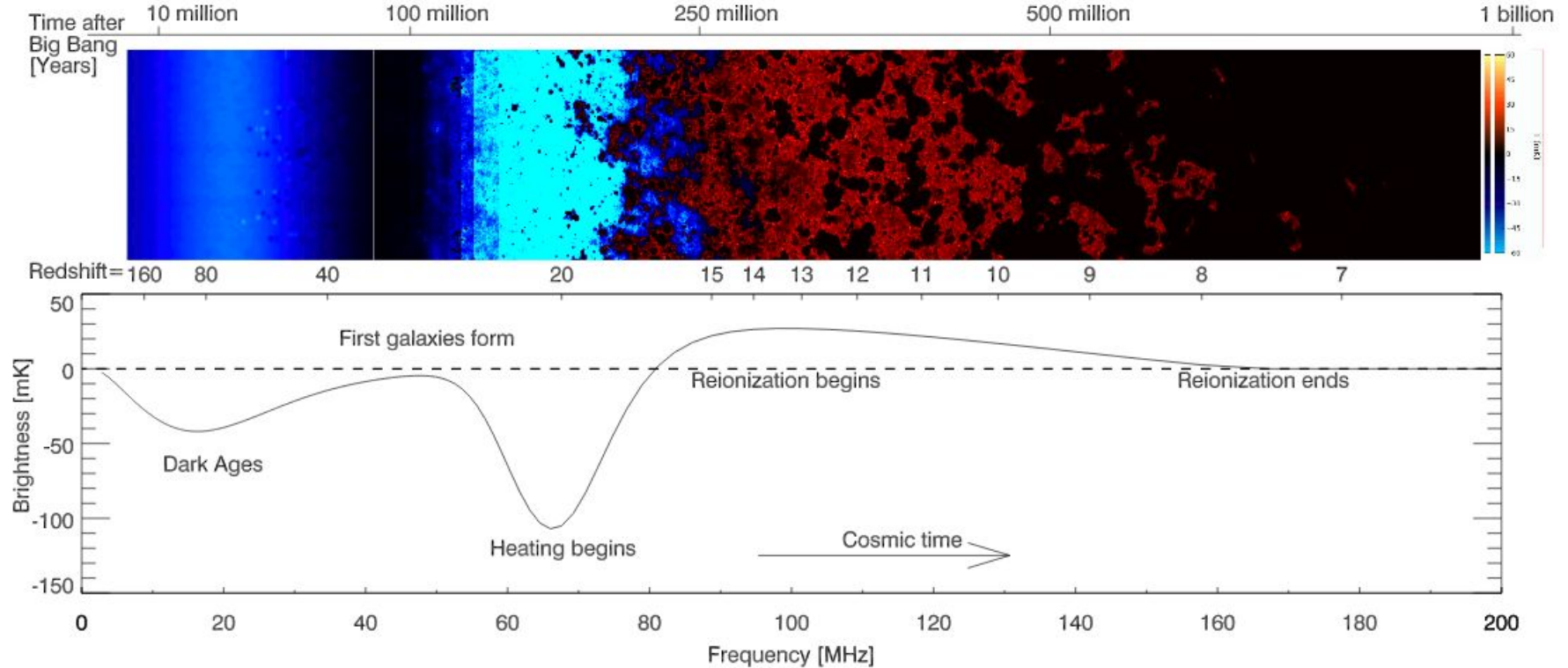
# **Unidad V.**

## **Fondo Cósmico de Microondas**

*Parte 1: Historia y fluctuaciones de temperatura*

Recordatorio...

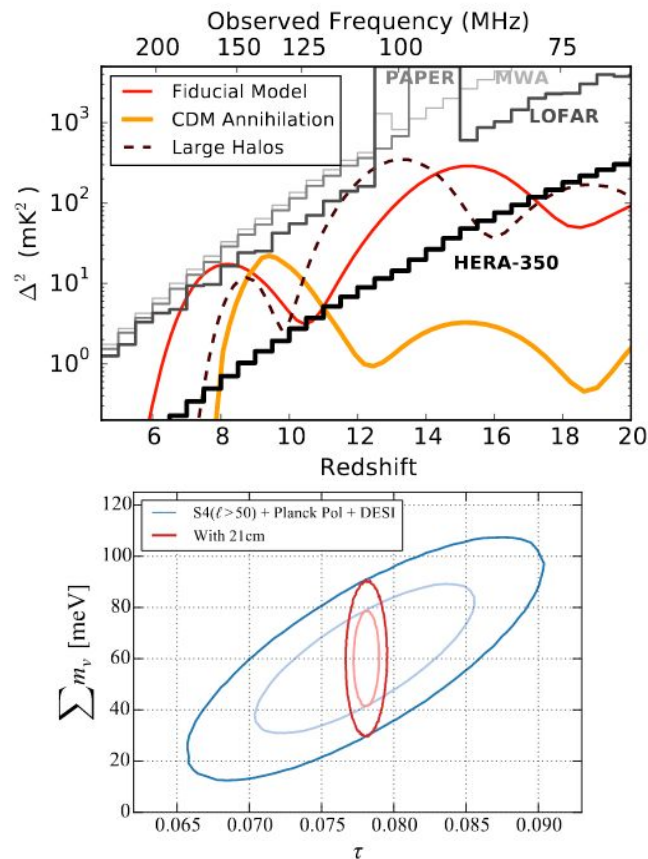
# El mundo según HI



# Experimentos de reionización

Muchos experimentos han tratado de establecer límites al espectro de potencias de HI pre-reionización, pero hasta hoy no tienen la sensibilidad necesaria. Se espera que experimentos futuros como HERA o SKA sí puedan hacerlo.

Al observar directamente la evolución del contenido de HI, podrán romper la principal degeneración en experimentos de CMB hoy en día - la profundidad óptica a reionización - mejorando significativamente límites a parámetros que determinan extensiones a  $\Lambda$ CDM



Sigamos!

# Historia temprana de la radiación de fondo

En 1941, Andrew McKellar midió la temperatura del espacio interestelar a 2.3 K, al medir la potencia de líneas moleculares (CN y CH) interestelares. La teoría del CMB no había sido desarrollada todavía, y esta medición no tuvo mayor relevancia en el momento.

Alpher & Herman (1948) razonaron que la energía de radiación producida en la etapa temprana del Universo debe existir hoy, enfriado significativamente por la expansión, con una temperatura aproximada de 5 K.

# Re-descubrimiento del CMB

En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson trabajaban para los laboratorios Bell en Nueva Jersey, EEUU, calibrando una antena de microondas para su uso en telecomunicaciones y astronomía. Sin embargo encontraron que, sin importar qué hicieran, persistía un ruido de fondo de 3.5 K. El ruido era isotrópico, por lo que no podía tratarse de la Galaxia, ni de fuentes puntuales, ni probablemente tampoco de origen terrestre ni humano.

Al mismo tiempo, el grupo liderado por Robert Dicke en Princeton predijo, a partir del Big Bang, la existencia de radiación isotrópica, y planeaban un experimento para detectarla cuando se enteraron de la medición de Penzias y Wilson. Ambos equipos se coordinaron para publicar sus resultados - la observación y su explicación - en 1965, estableciendo una de las principales líneas de evidencia para la teoría del Big Bang (Dicke et al. 1965, Penzias & Wilson 1965).

Penzias y Wilson ganaron el premio Nobel de física en 1978 por su descubrimiento.

Siguiendo al descubrimiento de Penzias y Wilson, hubo múltiples intentos por detectar anisotropías en el CMB (más allá del dipolo), pero sin éxito. Los experimentos en la Tierra no eran suficientemente sensibles, dada la inestabilidad térmica en la Tierra.

A partir de mediados de los años 80 comenzaron a ejecutarse experimentos desde el espacio y desde globos aerostáticos. COBE fue el más notorio, pero otros, particularmente el globo BOOMERANG también hicieron contribuciones significativas al estudio temprano de las fluctuaciones del CMB.



# 1990s: COBE

El Cosmic Background Explorer (COBE), que operó entre 1989 y 1993, fue el primer satélite dedicado a estudiar el fondo cósmico de radiación. Constaba de tres instrumentos:

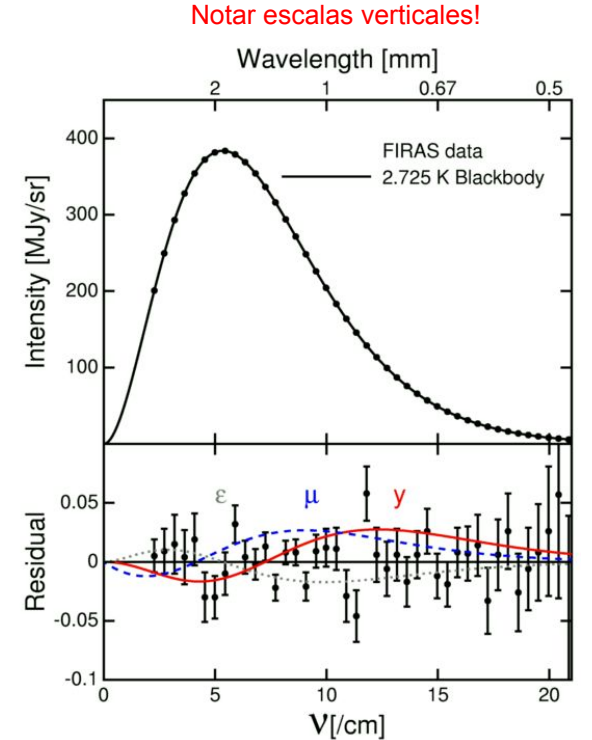
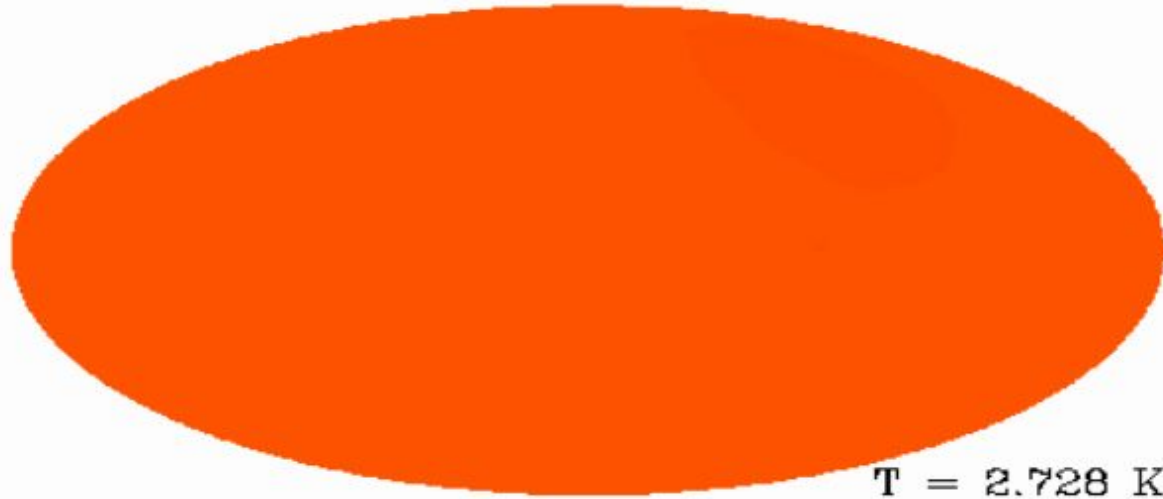
- Far Infrared Absolute Spectrometer (FIRAS,  $\lambda=0.1-10$  mm), para medir el espectro de la radiación de fondo;
- Differential Microwave Radiometers (DMR:  $\lambda=3-10$  mm), para detectar y caracterizar las fluctuaciones; y
- Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE,  $\lambda=12-100$   $\mu\text{m}$ ), para medir el fondo cósmico de infrarrojo y la emisión de la Galaxia.

Los investigadores principales de COBE, John Mather y George Smoot, ganaron el Premio Nobel de Física el 2006.



# 1990s: COBE

COBE probó que, con enorme precisión, el CMB es un cuerpo negro (i.e., emite en equilibrio termal) con una temperatura de  $2.725 \pm 0.002$  K.



Adaptado de Fixsen et al. (1996)

# ¿Por qué debería ser así?

Los fotones se desacoplan muy temprano en la historia del Universo. ¿Hay suficiente tiempo para termalizar este fluido?

- Podemos definir un tiempo dinámico del fluido,  $\tau_{\text{dyn}} \propto \rho^{-1/2}$ , con  $\rho$  la densidad de energía.
- En el Universo temprano dominado por radiación,  $\rho \propto a^{-4}$ , de manera que  $\tau_{\text{dyn}} \propto a^2$ .
- Podemos pensar en un tiempo de “liberación” del fondo termal  $1/\tau_{\text{dyn}} \propto a^{-2}$ .
- Por otra parte, la termalización del fluido se debería a interacciones entre las partículas, que escalan como  $n \propto V^2 \propto a^{-6}$ .
- Así que cuando  $a \rightarrow 0$ , la tasa de colisiones ( $\propto a^{-6}$ ) aumenta mucho más rápido que la tasa dinámica ( $\propto a^{-2}$ ).

Por lo tanto, el fluido se termaliza fácilmente en tiempos tempranos, de manera que al momento de recombinación previo a la superficie de última dispersión el fluido está altamente termalizado.

Más aún, un cuerpo negro tiene la propiedad de ser observado como un cuerpo negro pese a la expansión del Universo.

Un cuerpo negro tiene un espectro de Planck,

$$B_\nu d\nu \propto \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

de manera que, observado a un redshift  $z$ ,  $\nu'=(1+z)\nu$ , y

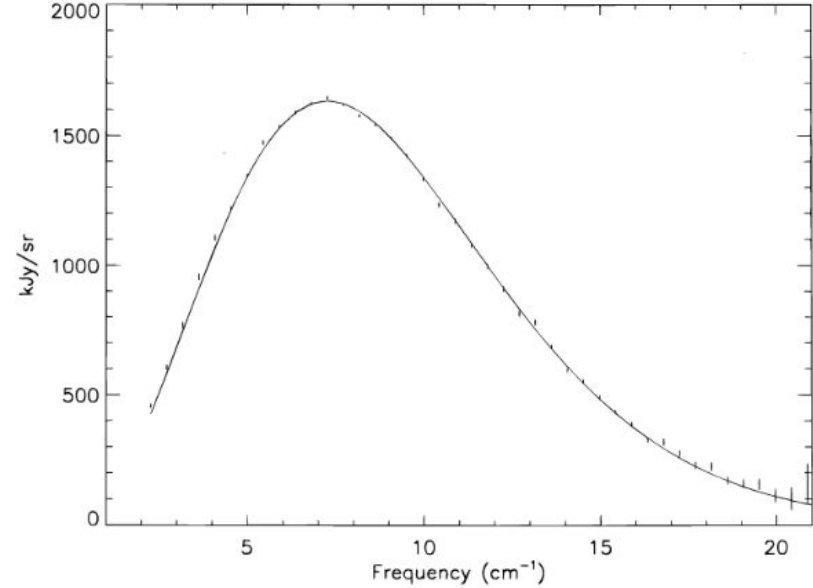
$$B_{\nu'}(T) \frac{d\nu'}{1+z} \propto \frac{[\nu'(1+z)]^3}{e^{h\nu'(1+z)/kT} - 1} \frac{d\nu'}{1+z}$$

Absorbiendo los factores  $(1+z)$  en la constante de proporcionalidad,

$$B_{\nu'}(T') d\nu' \propto \frac{(\nu')^3}{e^{h\nu'/kT'} - 1} d\nu'$$

con  $T' = (1+z)T$ .

Un cálculo detallado revela que el fluido fotón-barión debe haberse termalizado a un redshift  $z > 2 \times 10^6$ .



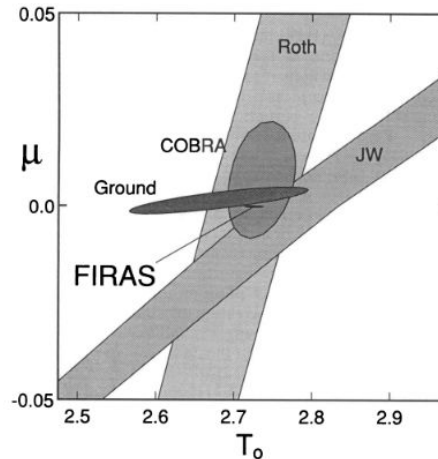
Mediciones de  $dB/dT$  por COBE/FIRAS y el espectro de Planck que mejor se ajusta (Fixsen et al. 1996).

# 1990s: COBE

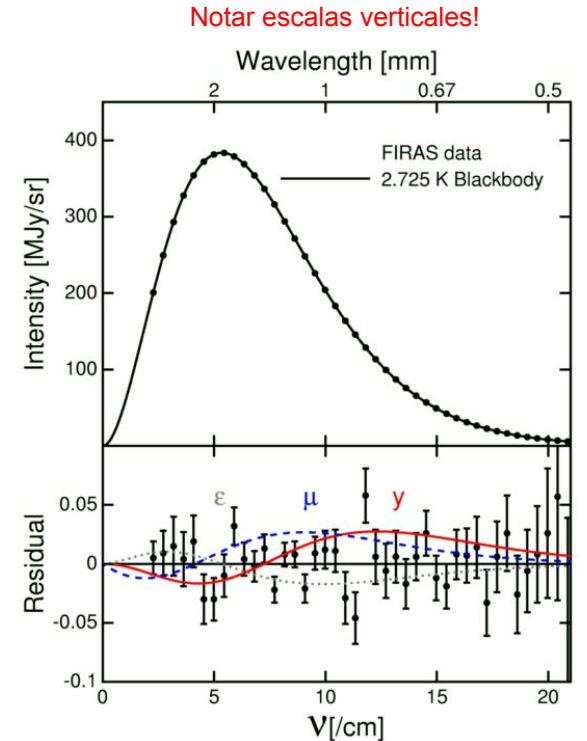
COBE probó que, con enorme precisión, el CMB es un cuerpo negro (i.e., emite en equilibrio termal) con una temperatura de  $2.725 \pm 0.002$  K.

Además restringió la amplitud de distorsiones espectrales producto de desviaciones en el equilibrio termal en el Universo temprano, a una parte en un millón.

El gráfico inferior pone a COBE en un contexto histórico: el salto en precisión fue tan significativo como los que han entregado sus sucesores.



Wright et al. (1994a)



Adaptado de Fixsen et al. (1996)

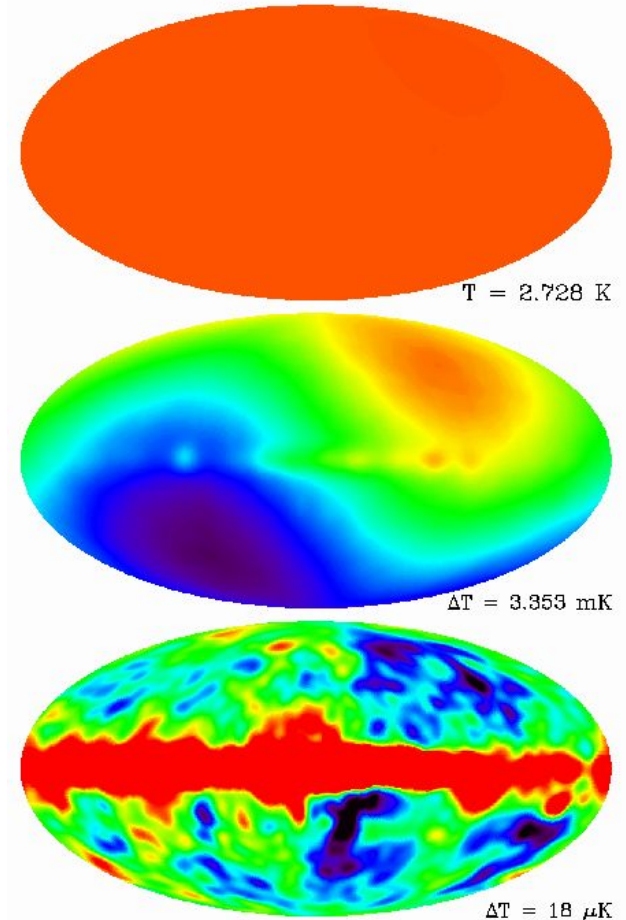
# 1990s: COBE

COBE probó que, con enorme precisión, el CMB es un cuerpo negro (i.e., emite en equilibrio termal) con una temperatura de  $2.725 \pm 0.002$  K.

Además de medir la temperatura global del fondo cósmico, COBE midió las variaciones espaciales en esta temperatura, con una resolución FWHM de  $7^\circ$ .

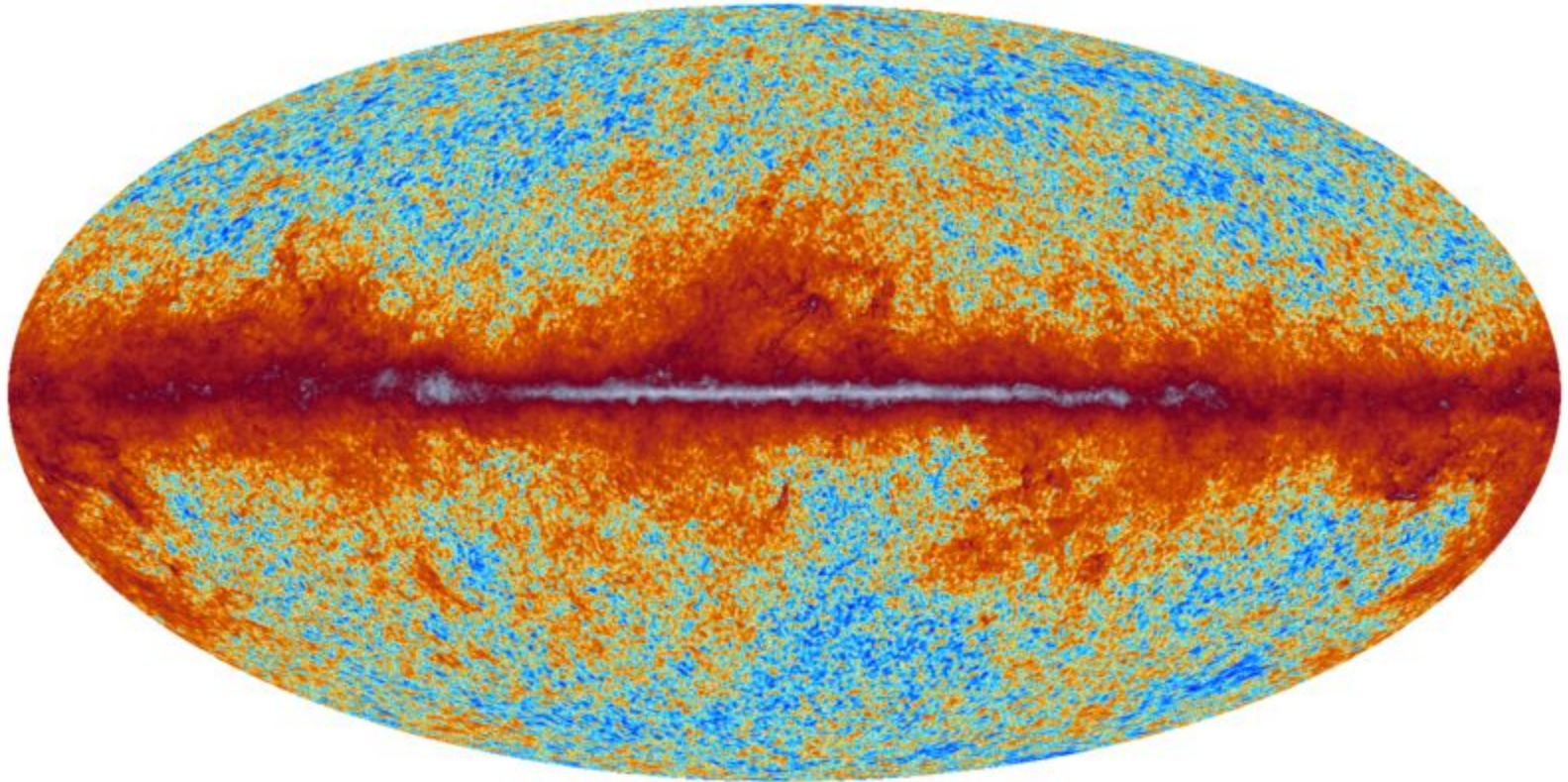
La fluctuación más notoria es el dipolo producido por nuestro movimiento respecto del CMB; la escala de esta fluctuación es  $\sim 10^{-3}$  y significa que la Galaxia se mueve respecto del CMB a unos 600 km/sec.

Las fluctuaciones cosmológicas son del orden de  $10^{-5}$ .

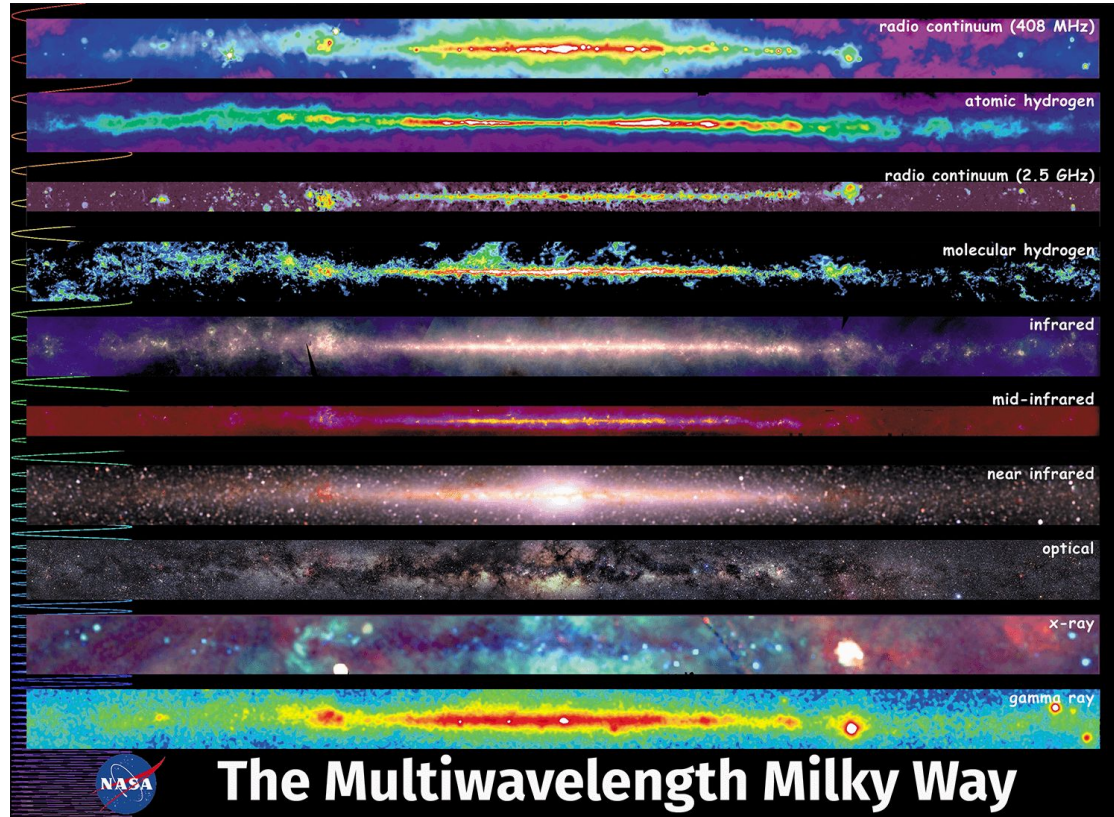




# De mapas del cielo a cosmología



# No hay caso con la Galaxia!





# El cielo según COBE: la Galaxia, el Sistema Solar, y... ruido de fondo



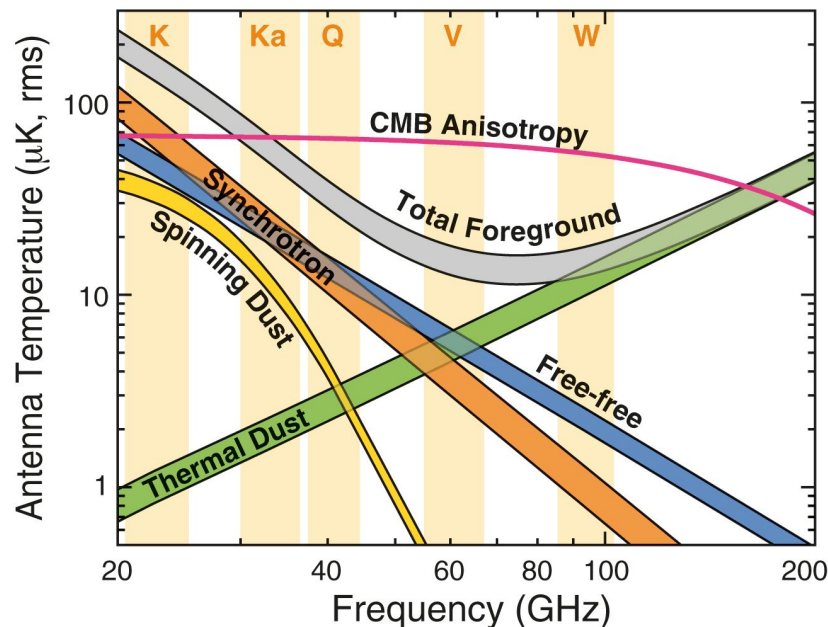
Crédito: Equipo DIRBE, COBE, NASA. Fuente: [APOD](#)

# Contaminantes al CMB

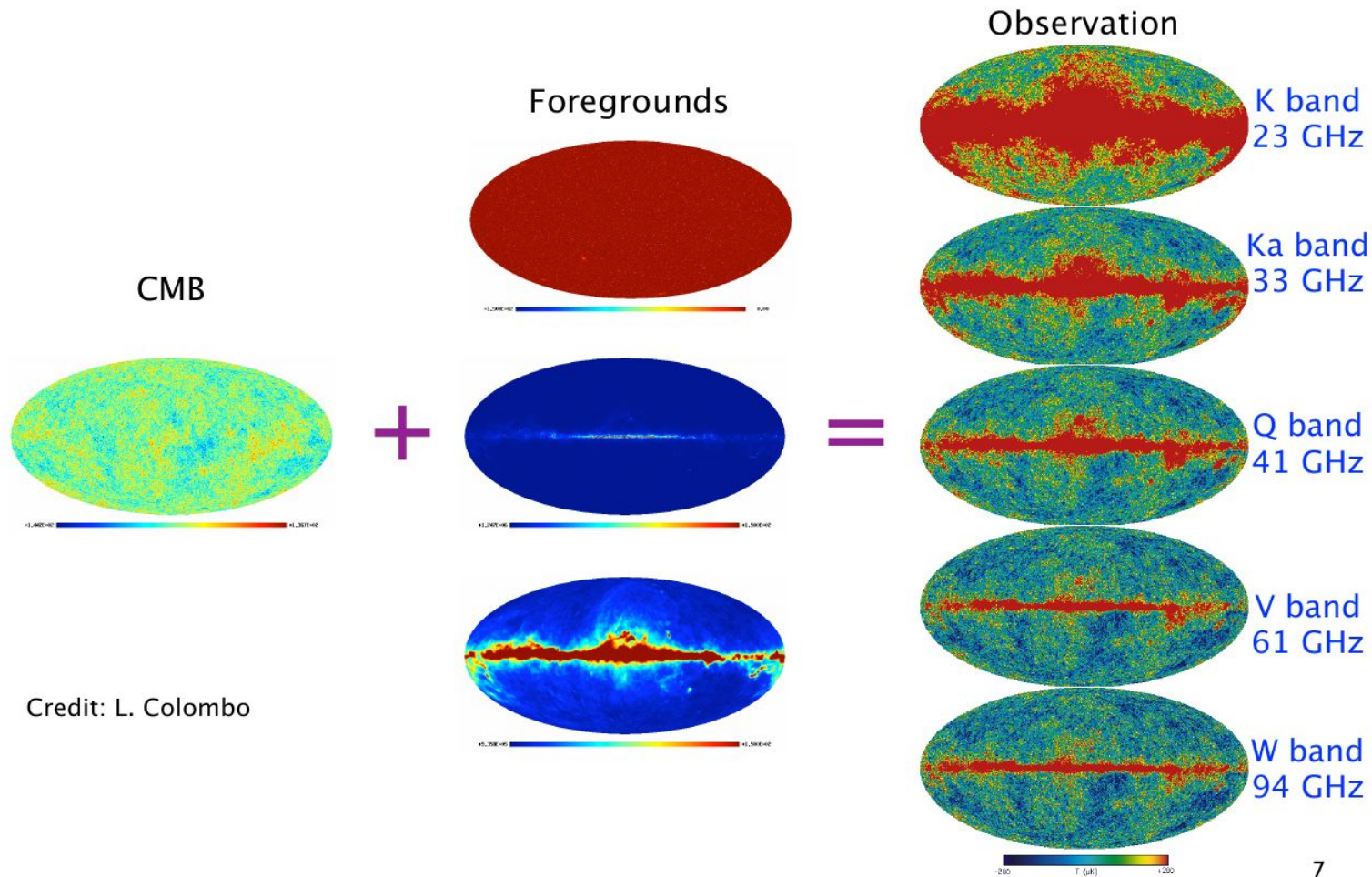
En microondas, el principal contaminante es polvo en el disco Galáctico, producido particularmente por remanentes de supernova, emisión libre-libre de regiones ionizadas en zonas de formación estelar, y emisión termal del mismo polvo.

Afortunadamente hay un rango de frecuencia donde el CMB domina, pero aún así hay contaminación significativa.

Las dependencias de cada uno de estos componentes con la frecuencia es relativamente simple, por lo que observando en múltiples frecuencias se puede modelar gran parte de esta emisión.



Bennett et al. (2013)



Credit: L. Colombo

# Del mapa del CMB a anisotropías

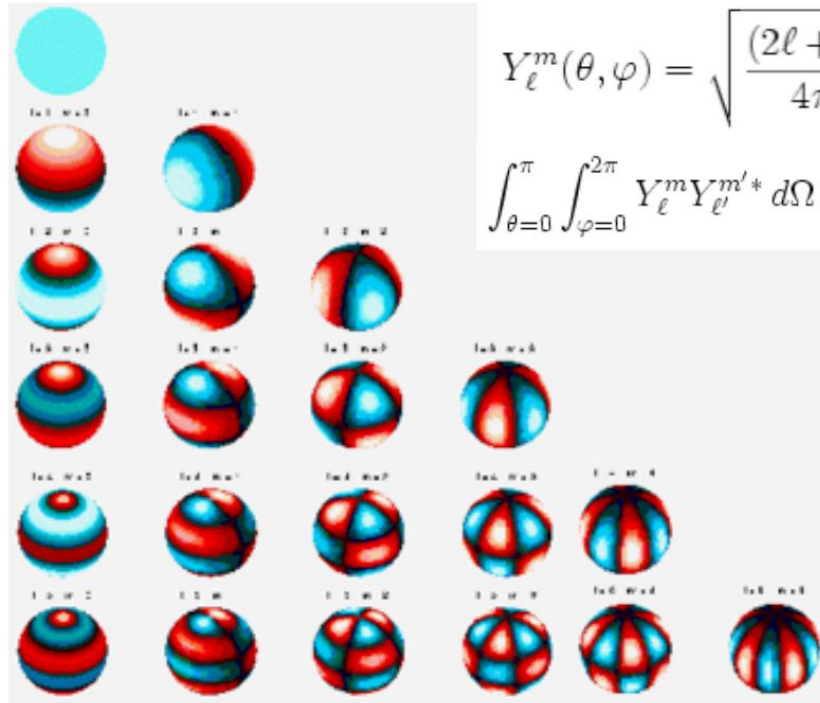
Las anisotropías se pueden representar como diferencias locales de temperatura,

$$\frac{\delta T}{T}(\vec{\mathbf{x}}) = \frac{T(\theta, \phi) - \bar{T}}{\bar{T}}$$

que es conveniente descomponer en armónicos esféricos,

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_m^{\ell}(\theta, \phi)$$

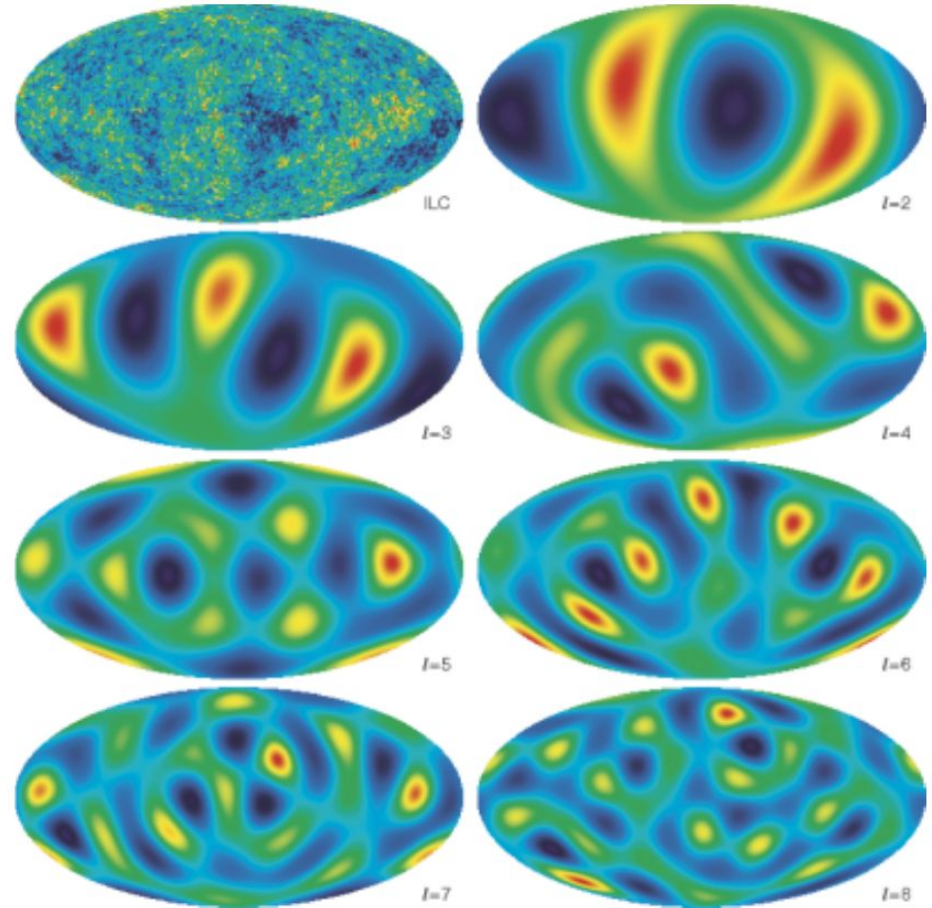
# Visualización de esféricos harmónicos



$$Y_{\ell}^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2\ell+1)(\ell-m)!}{4\pi(\ell+m)!}} \cdot e^{im\varphi} \cdot P_{\ell}^m(\cos \theta)$$

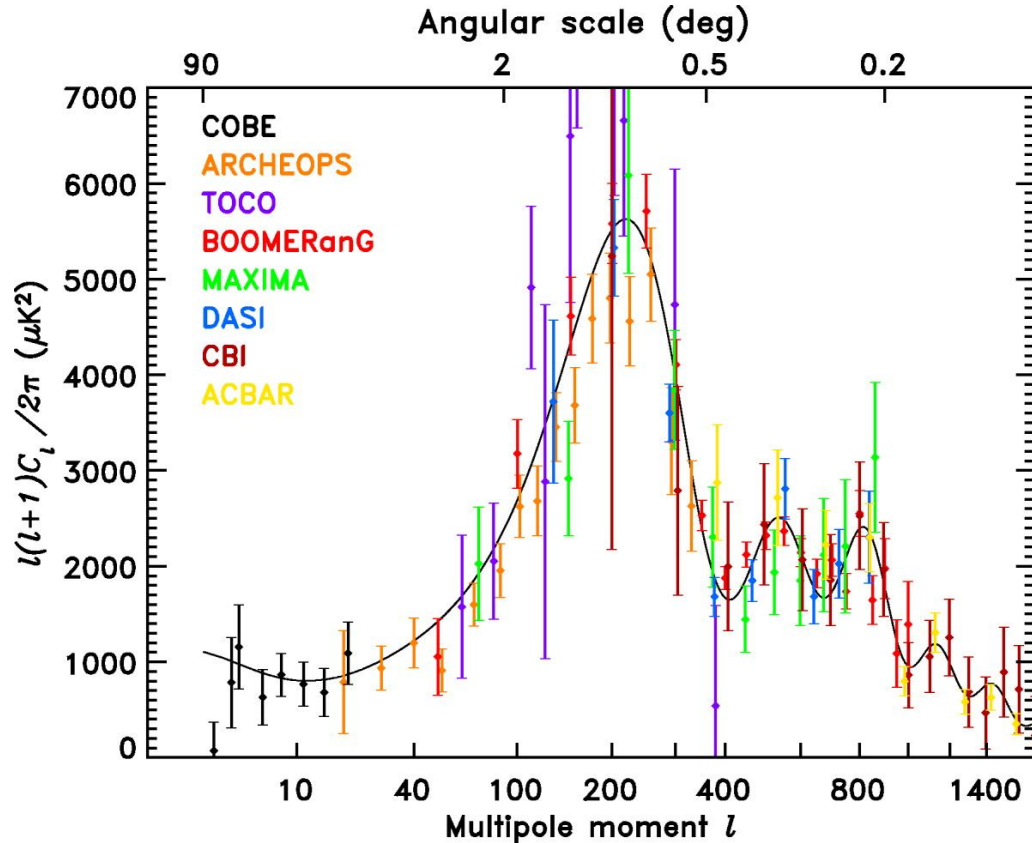
$$\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} Y_{\ell}^m Y_{\ell'}^{m'}{}^* d\Omega = \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'} \quad d\Omega = \sin \theta d\varphi d\theta$$

La descomposición del mapa del CMB se ve así:

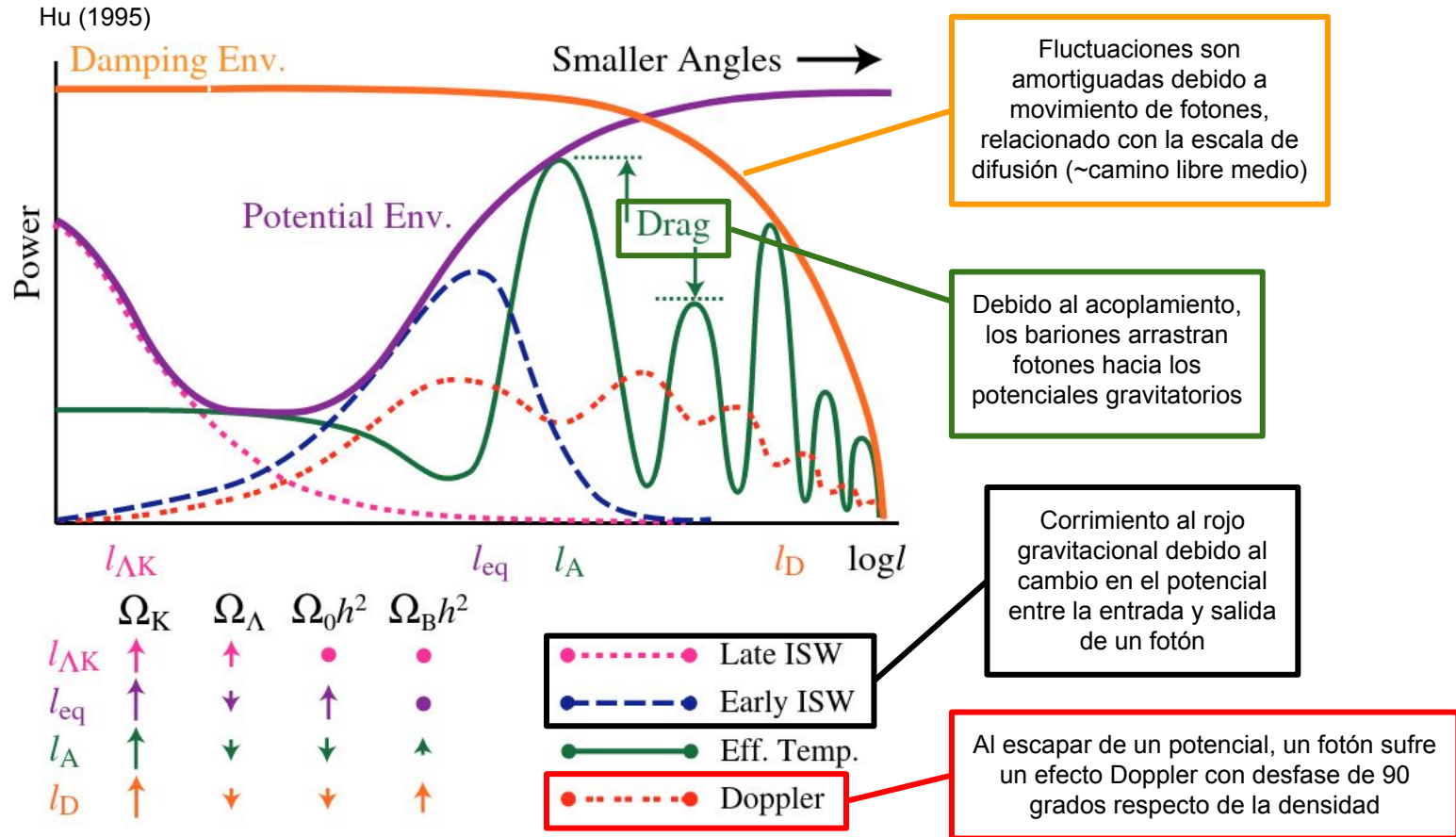




# Espectro de potencias de temperatura en tiempos de COBE

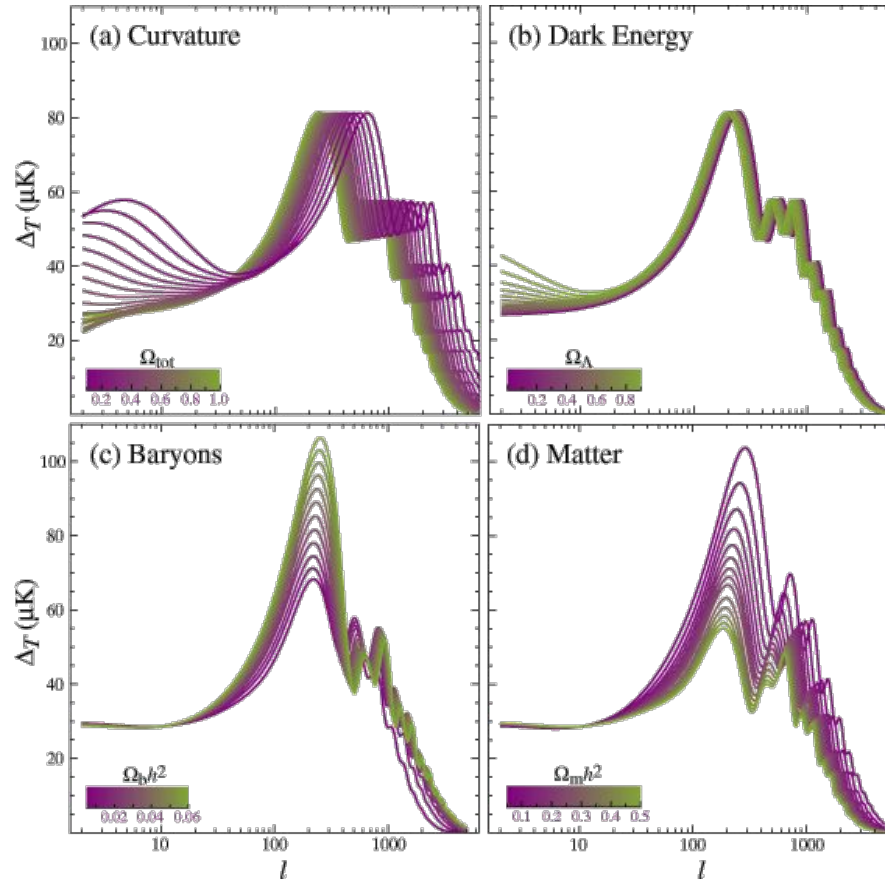


El espectro de potencias del CMB contiene una enorme cantidad de información cosmológica.



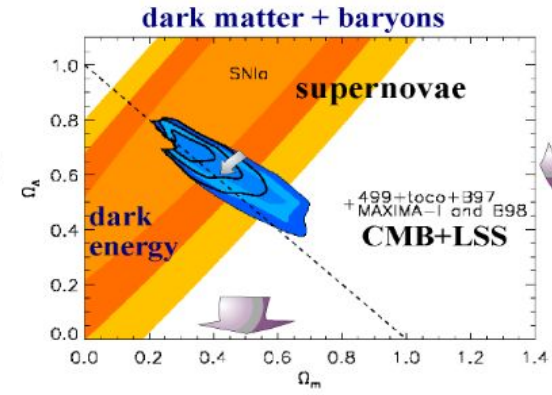
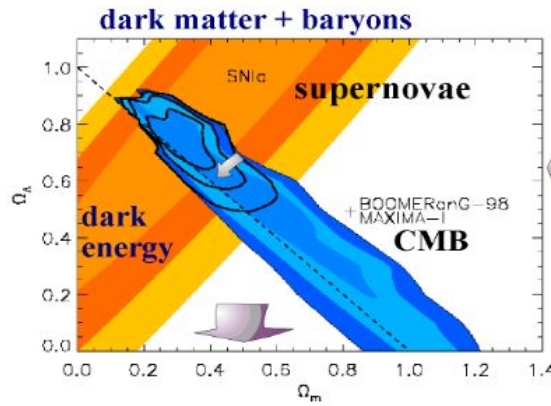


Disfruten la entretención del espectro angular de potencias del CMB en [LAMBDA!](#)



Crédito: [Wayne Hu](#)

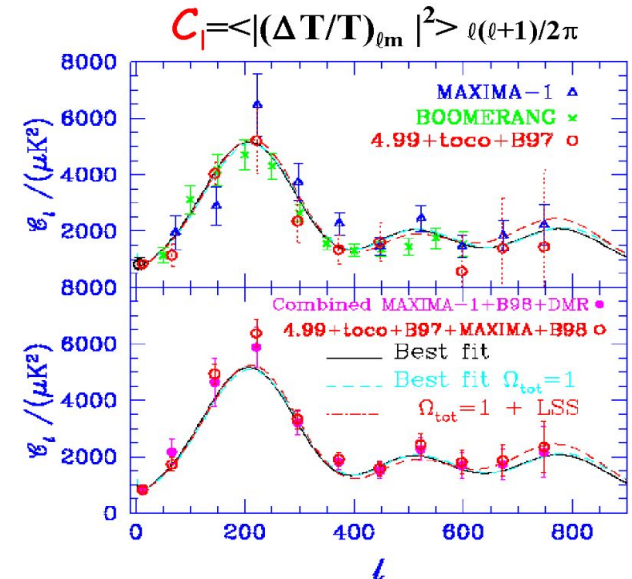
# Escena pre-WMAP



Bond et al. (2000)

Durante los años 90 hubo muchas mediciones de las fluctuaciones del CMB. Bond et al. (2000) unificaron todas las observaciones hasta la fecha para producir los resultados de la derecha.

Recuerden que para el año 2000 ya habían sido publicados los resultados de las supernova, y también existían los primeros resultados de abundancia de cúmulos y aglomeración de galaxias. La evidencia combinada de un Universo (aproximadamente) plano con energía oscura era abrumadora.



# Referencias

- Alpher, R., & Herman, R., 1948. *Evolution of the Universe*. [Nature, 162, 774](#)
- Bennett, C., et al., 2013. *Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results*. [ApJS, 208, 20](#)
- Bond, J., et al., 2000. *CMB Analysis of Boomerang & Maxima & the Cosmic Parameters  $\{\Omega_{tot}, \Omega_b h^2, \Omega_{cdm} h^2, \Omega_{\Lambda}, n_s\}$* . [arXiv:astro-ph/0011378](#)
- Dicke, R., et al., 1965. *Cosmic Black-Body Radiation*. [ApJ, 142, 414](#)
- Fixsen, D., et al., 1996. *The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE FIRAS Data Set*. [ApJ, 473, 576](#)
- Hu, W., 1995. *Wandering in the Background: A CMB Explorer*. PhD Thesis, UC Berkeley. [arXiv:astro-ph/9508126](#)
- McKellar, A., 1941. *Molecular Lines from the Lowest States of Diatomic Molecules Composed of Atoms Probably Present in Interstellar Space*. [PDAO, 7, 251](#)
- Netterfield, C., et al., 1997. *A Measurement of the Angular Power Spectrum of the Anisotropy in the Cosmic Microwave Background*. [ApJ, 474, 47](#)
- Penzias, A., & Wilson, R., 1965. *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.* [ApJ, 142, 419](#)
- Wright, E., et al., 1994a. *Interpretation of the COBE FIRAS CMBR Spectrum*. [ApJ, 420, 450](#)
- Wright, E., et al., 1994b. *Angular Power Spectrum of the Microwave Background Anisotropy Seen by the COBE Differential Microwave Radiometer*. [ApJ, 436, 443](#)
- Wright, E., et al., 1996. *Angular Power Spectrum of the Cosmic Microwave Background Anisotropy seen by the COBE DMR*. [ApJL, 464, 21](#)