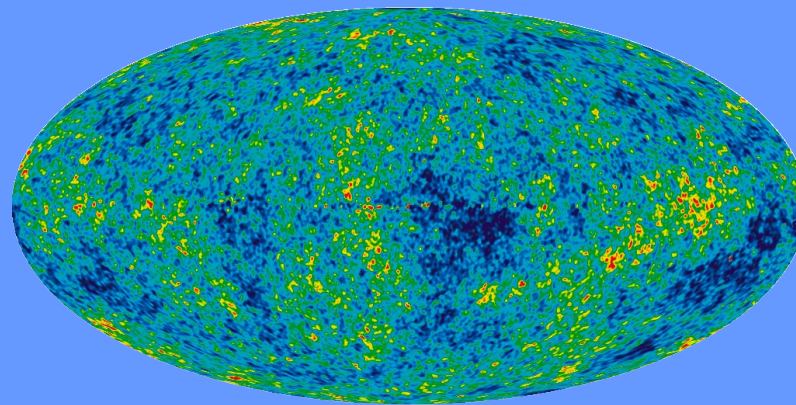


# Cosmología

Eduardo Battaner  
Universidad de Granada



-200 T( $\mu$ K) +200 WMAP 5-year

Museo Elder. 2009



# Problemas cosmológicos

- La expansión
- La composición
- El fondo cósmico de microondas
- La estructura a gran escala
- La homogeneidad
- La planitud



# Espacio y tiempo

En el Cosmos, lo lejano y lo antiguo coinciden.

Distancia, tiempo, tamaño del Universo, velocidad (Ley de Hubble), desplazamiento al rojo.



# Algunas relaciones

$$v = H_0 r$$

$$H_0 = 71 \text{ km}/(\text{s Mpc})$$

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

$$z = v / c$$

$$R_0 / R = 1 + z$$

$$R = R(t) ?$$

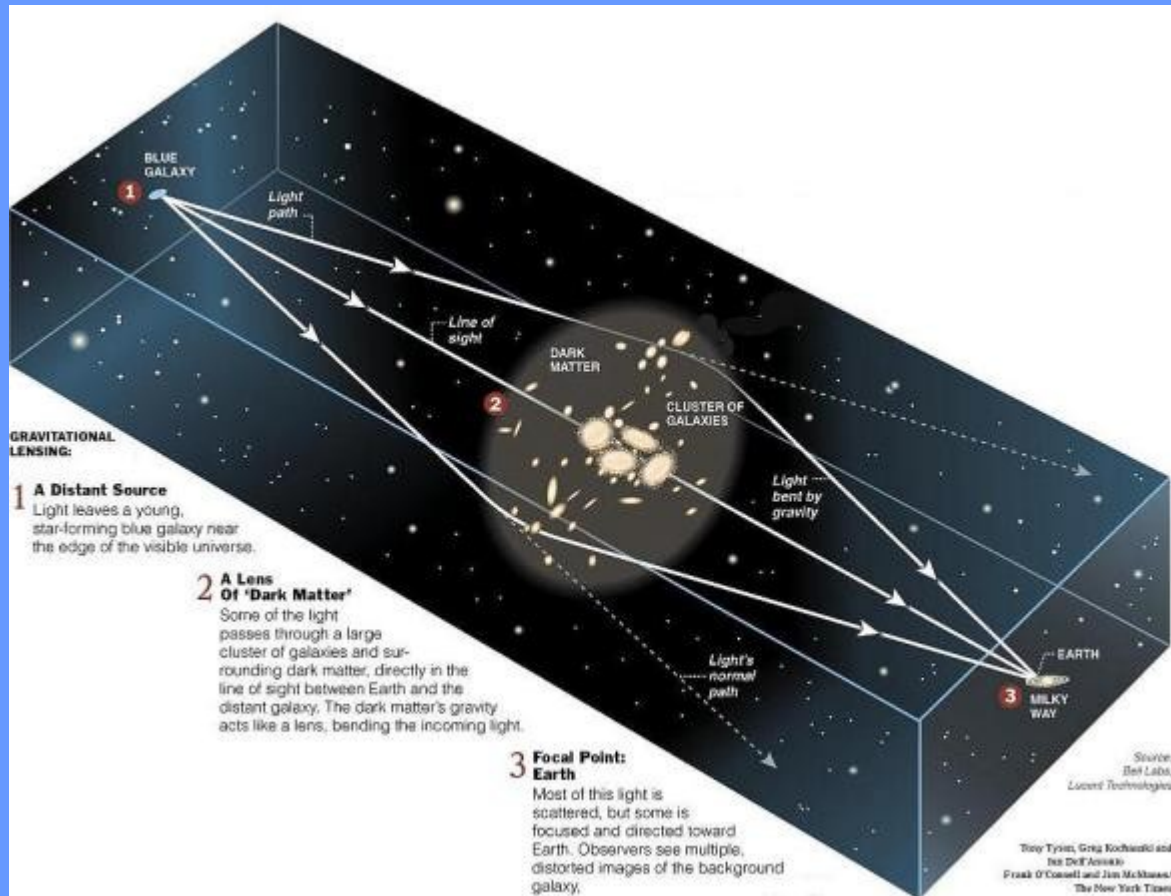


# Tablita

- $z = 0.003$ , 47 M al,  $v = 900$  km/s
- $z = 0.3$ , 4.6 G al,  $v = 90000$  km/s
- $z = 1$ , 12 G al,  $v = 3/5c$
- $z = 5$ ,  $v = 12/13c$ , el Universo era 6 veces más pequeño que hoy.
- $z = 10$ ,  $v = 99/101c$ , la galaxia más lejana.
- Usted está a  $10^{-8}$  segundos-luz de mí









**Distant Galaxy Lensed by Cluster Abell 2218  
Hubble Space Telescope • WFPC2 • ACS**

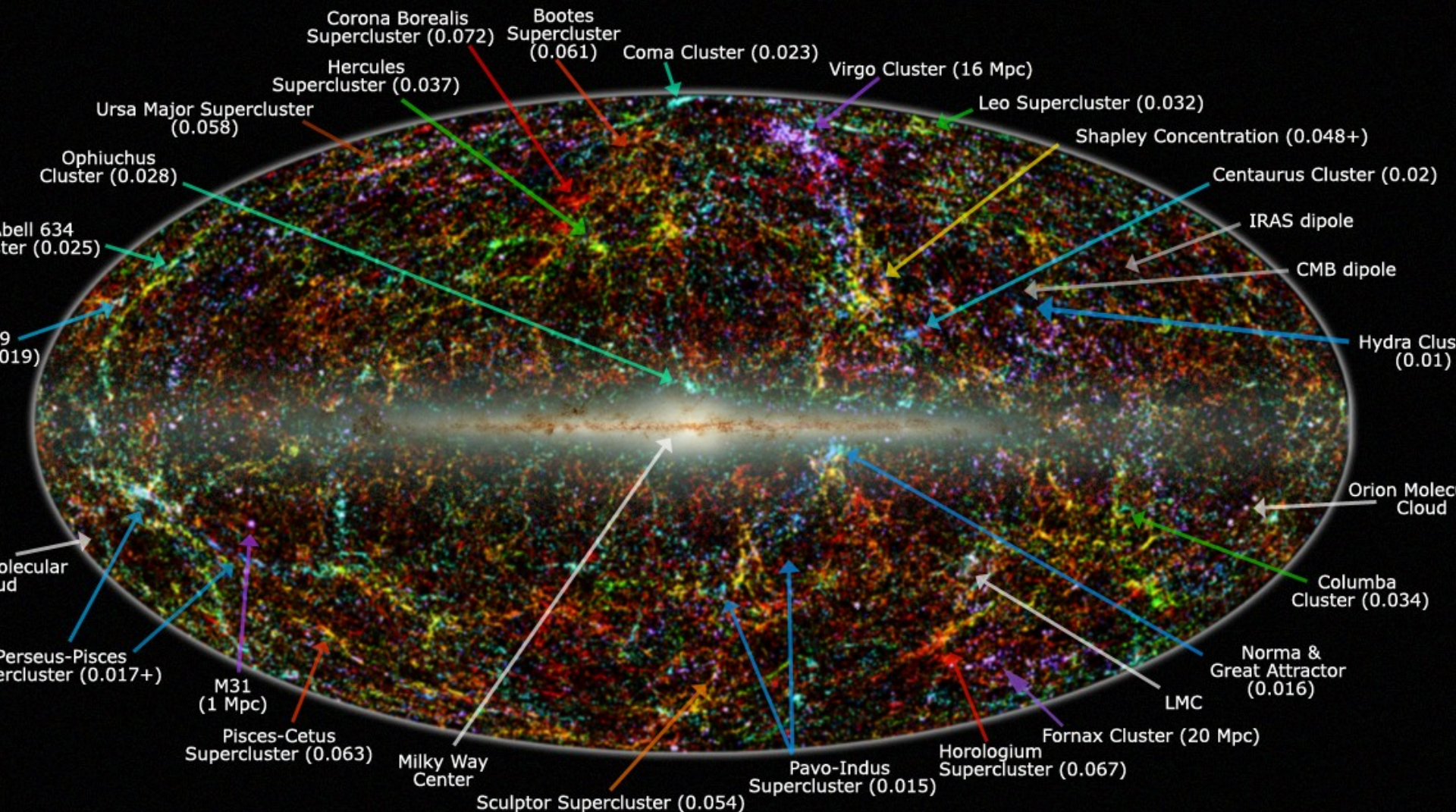
ESA, NASA, J.-P. Kneib (Caltech/Observatoire Midi-Pyrénées) and R. Ellis (Caltech)

STScI-PRC04-08



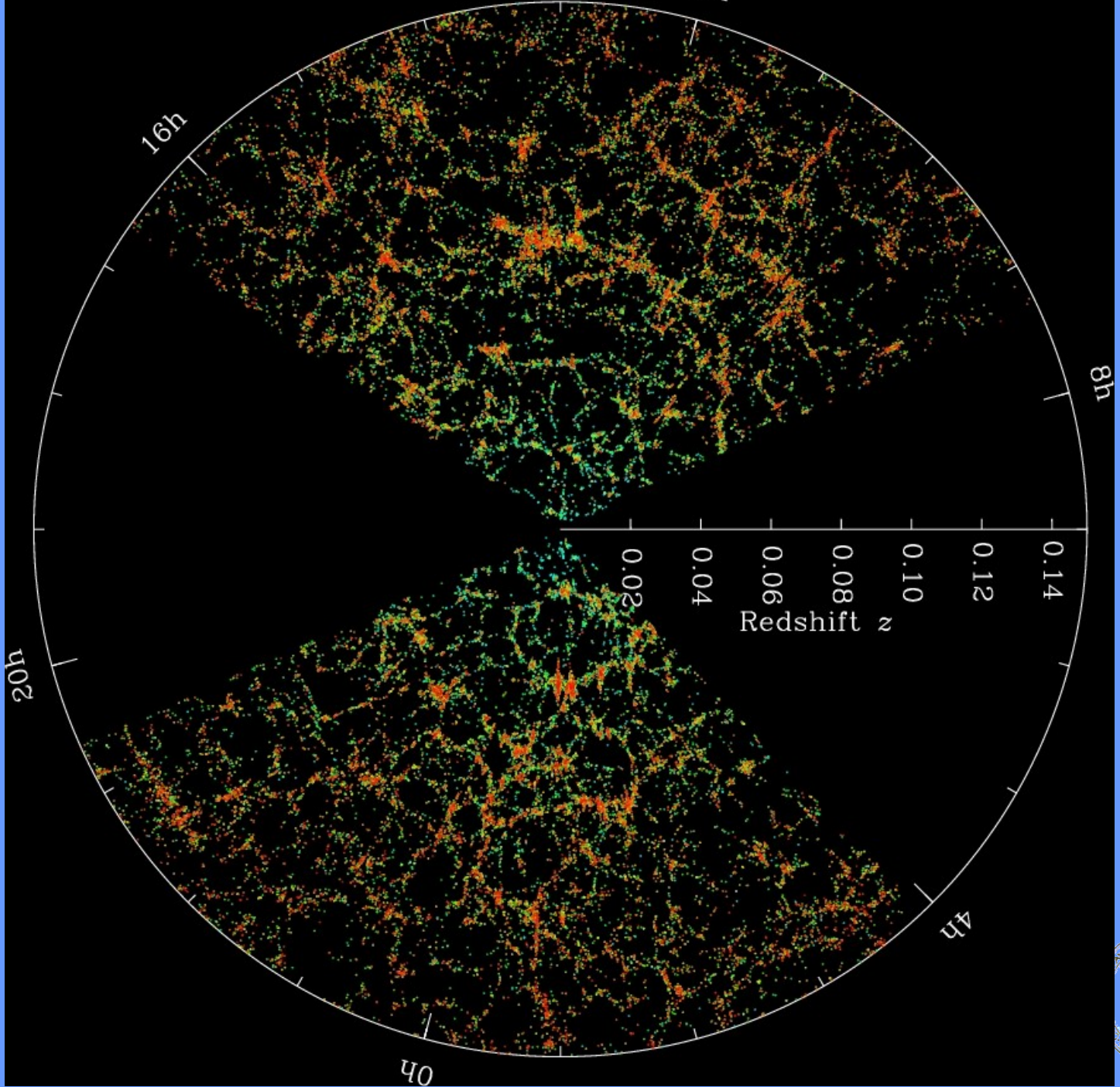


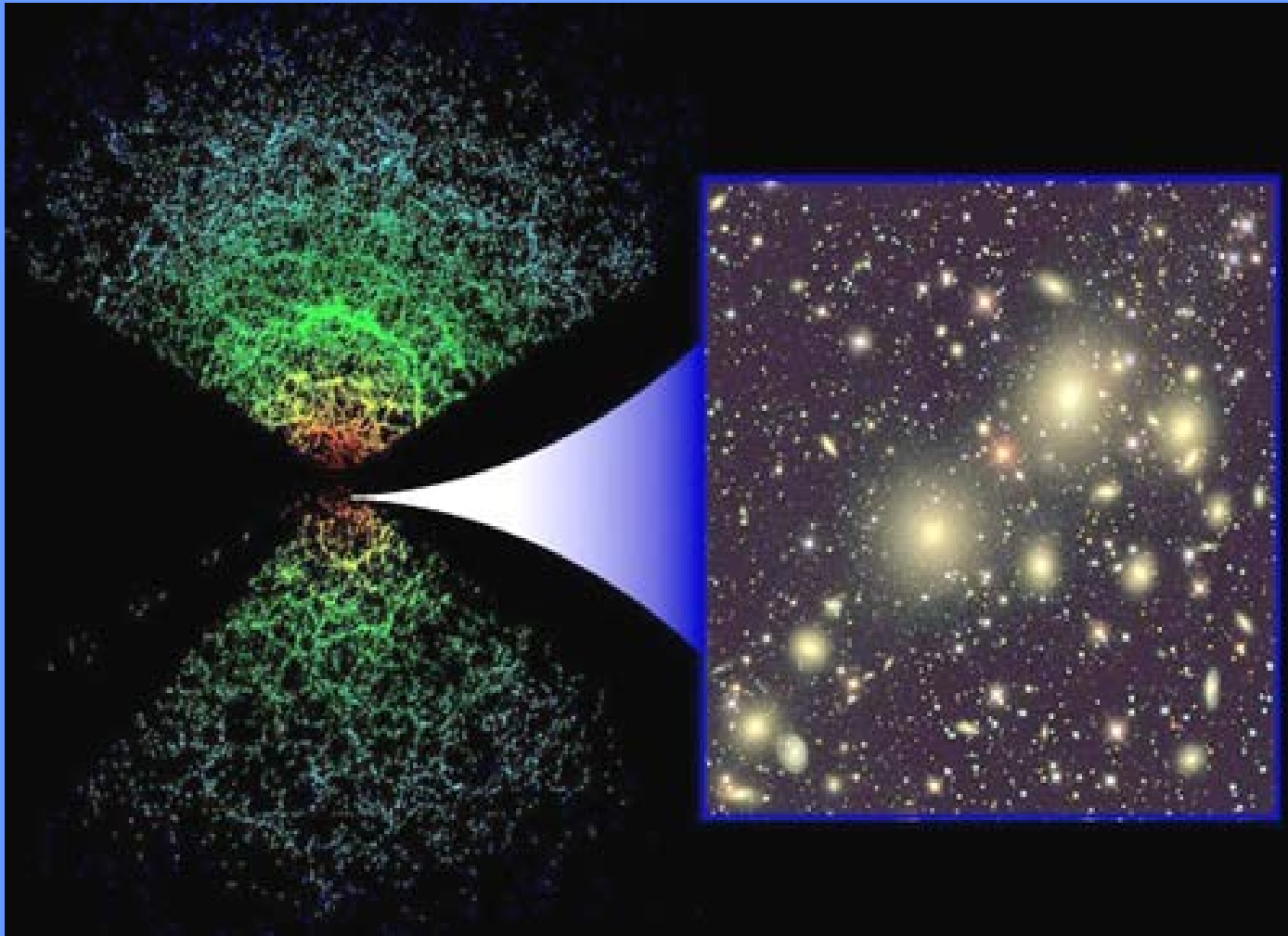
# Large Scale Structure in the Local Universe



**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).  
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

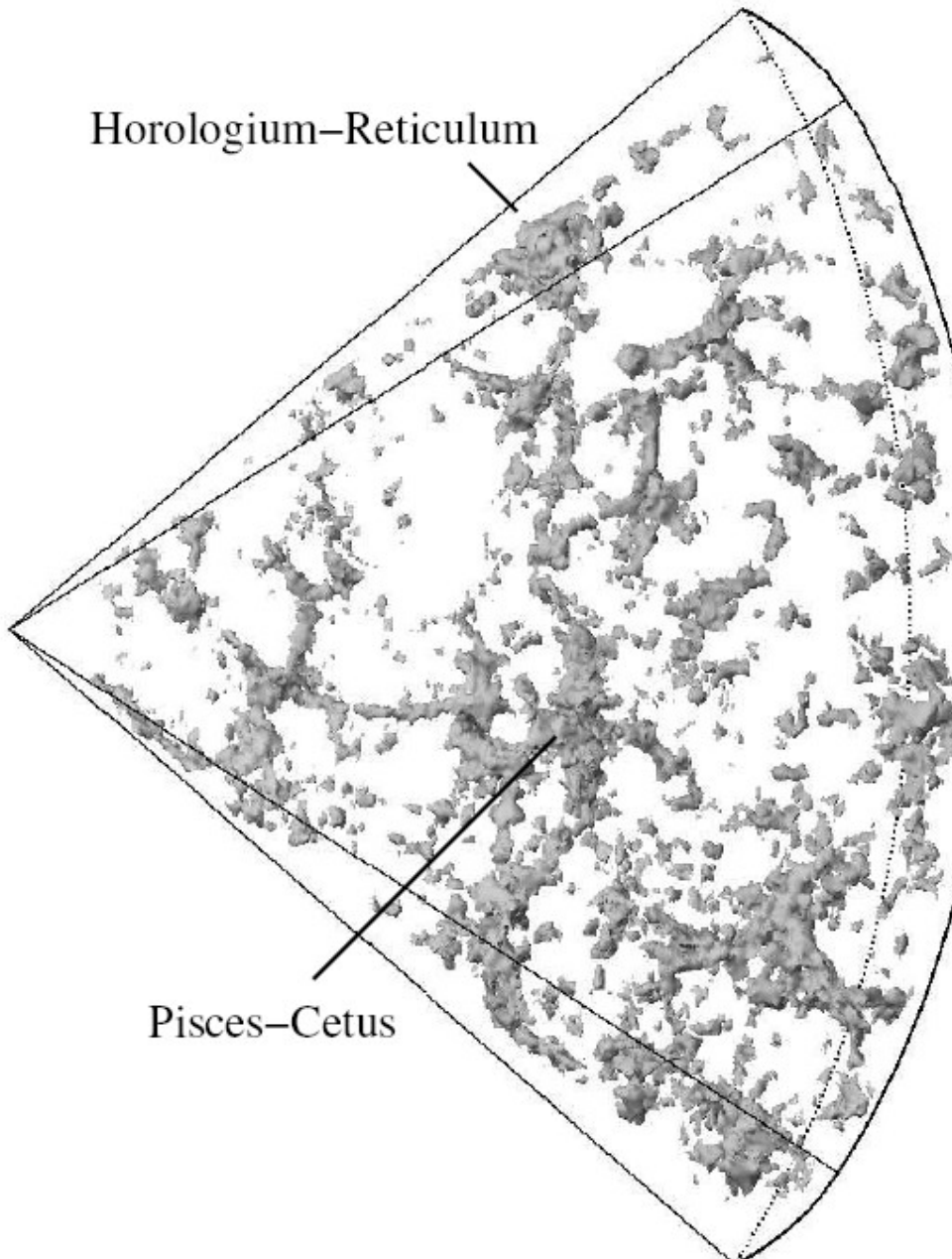
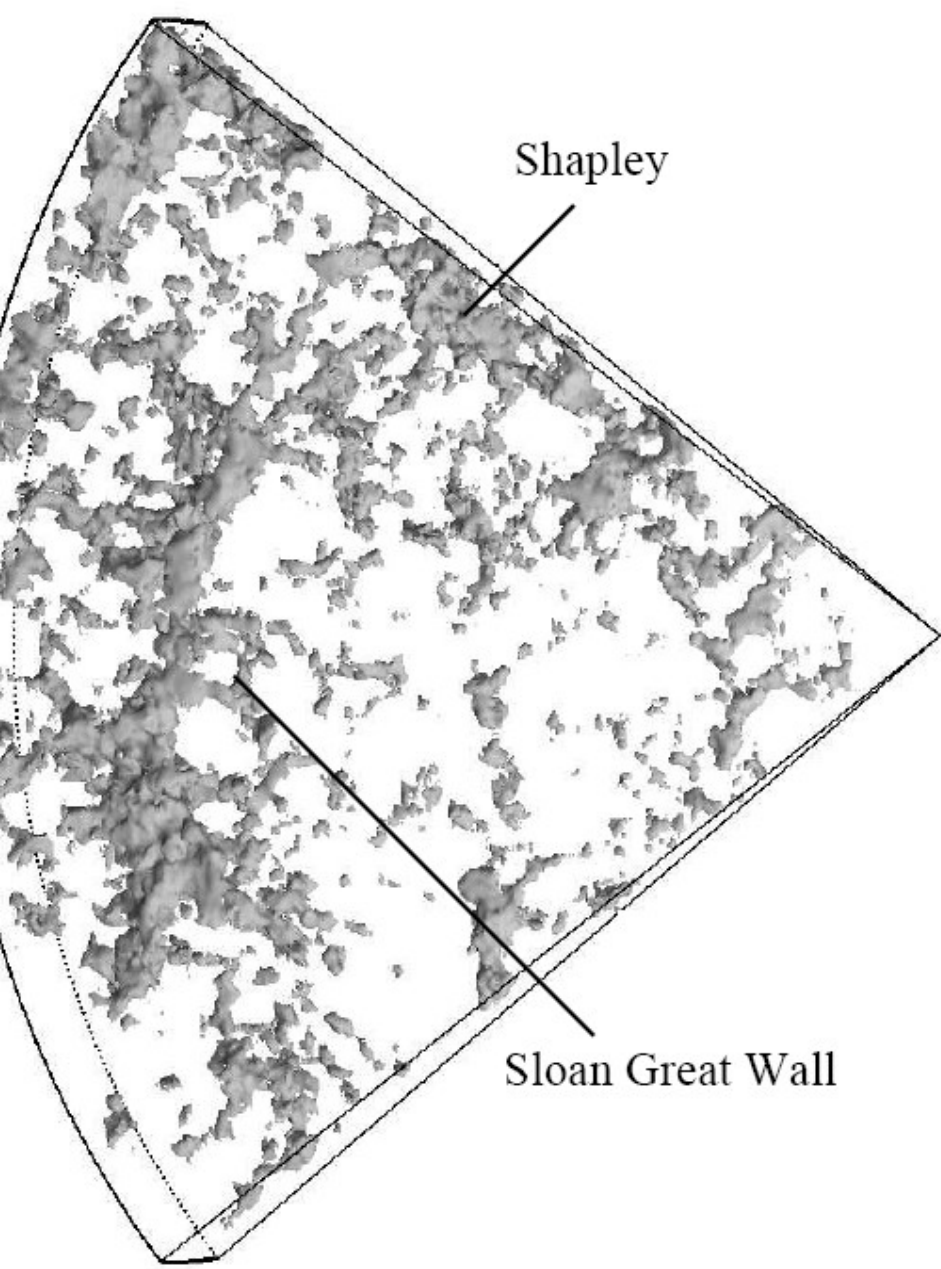






Museo Elder. 2009





# CMB

Hay algo mucho más lejano:

CMB = Cosmic Microwave Radiation

= Radiación de fondo

= Radiación Cómica de Microondas

Está a  $z = 1100$  →

el Universo 1100 veces más pequeño

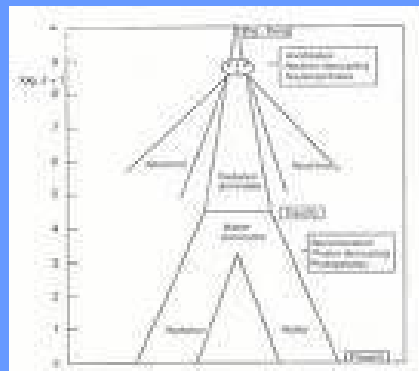
unos 400000 años después del Big-Bang

(Hoy 13 mil millones de años)



# Límite en z

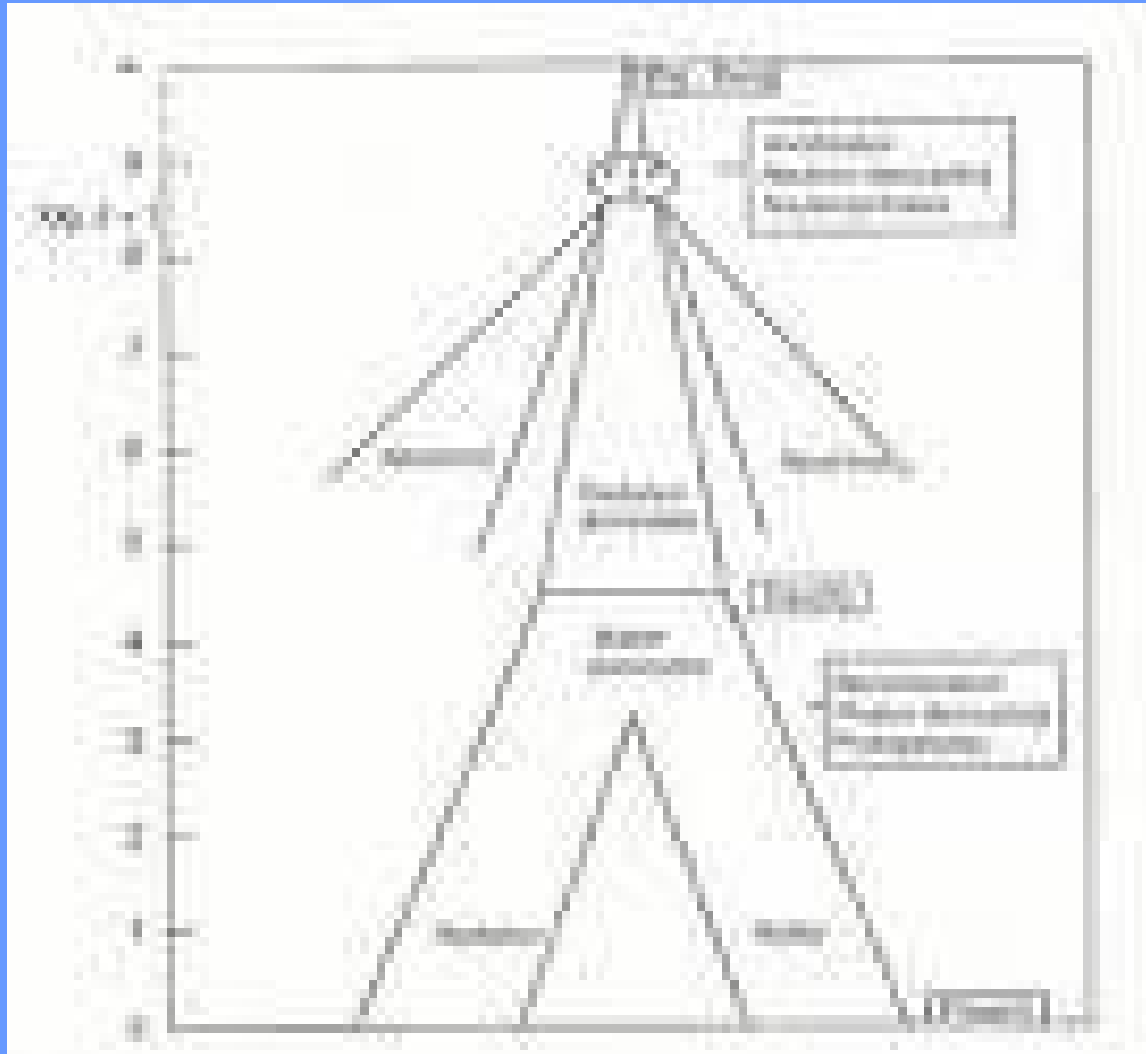
- El pasado que podemos ver
- Física de épocas primitivas que explican hechos presentes que vemos hoy
- Física de épocas primitivas que explican hechos pasados que vemos hoy



Museo Elder. 2009



# uniperverso



# Recombinación

- Recombinación
- Desacoplamiento de los fotones
- Se dispara la formación de estructuras

Antes: DM, neutrinos, fotones, núcleos de H y He, electrones.

Fotones y bariones en equilibrio.

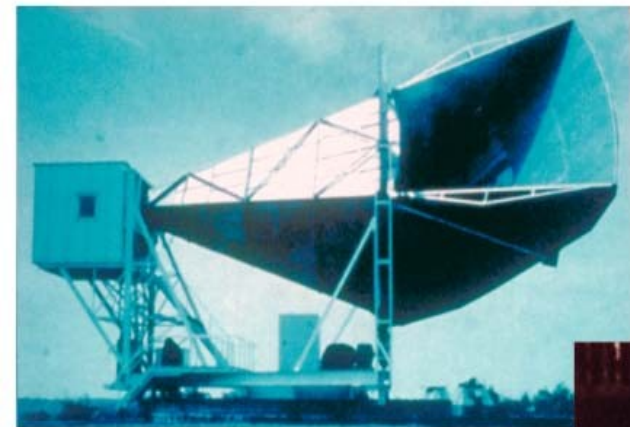
Después: DM, neutrinos, fotones, átomos de H y He  
Fotones y bariones desacoplados térmicamente

Acoplamiento Museo Elder. 2009





# DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



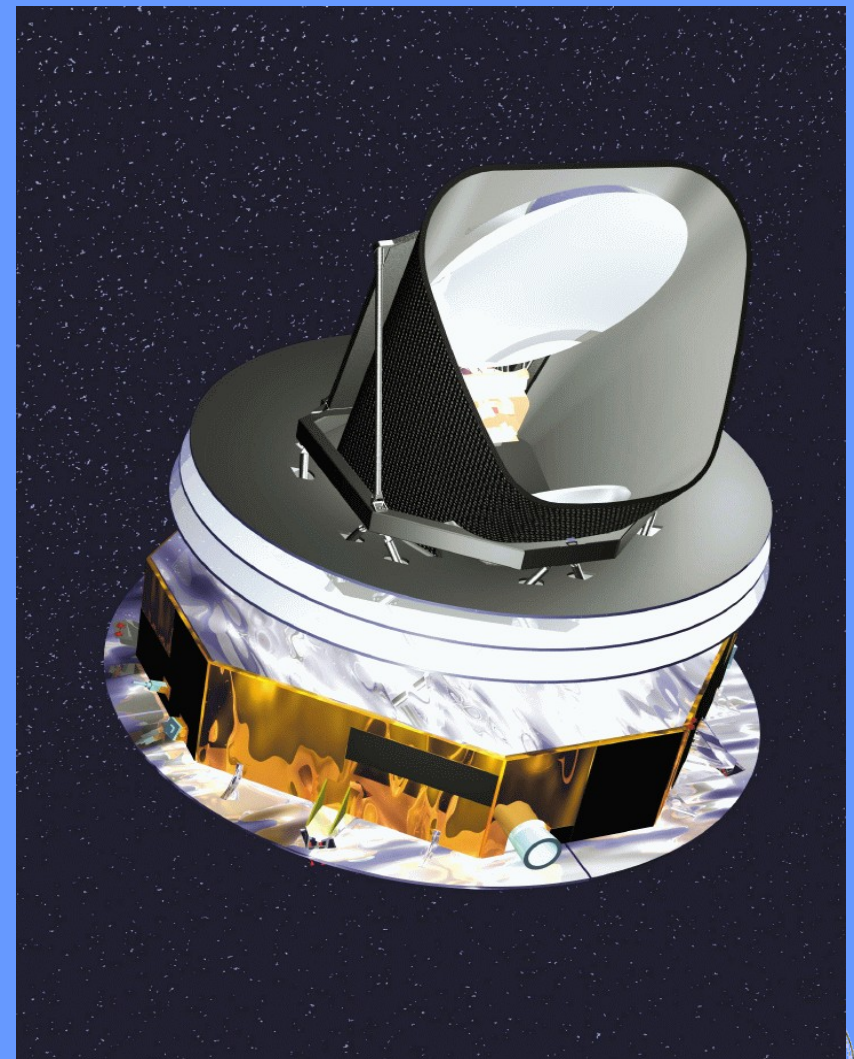
Microwave Receiver



Robert Wilson



Arno Penzias



MAP990045

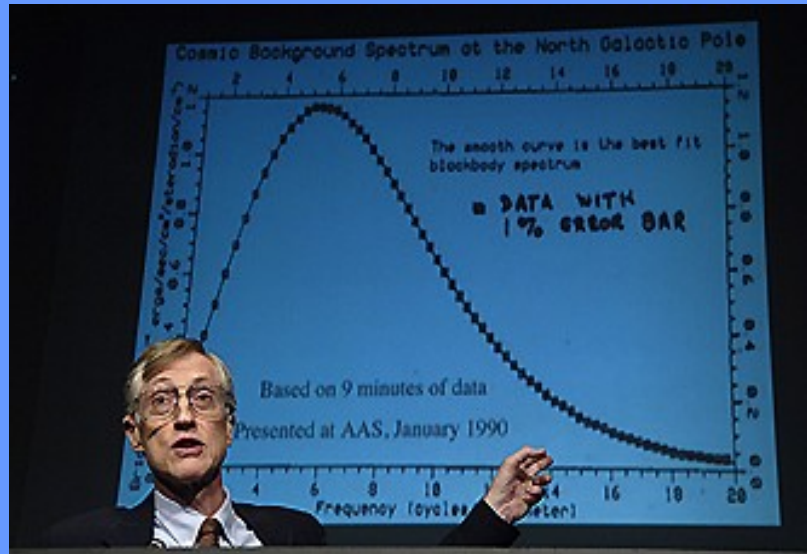


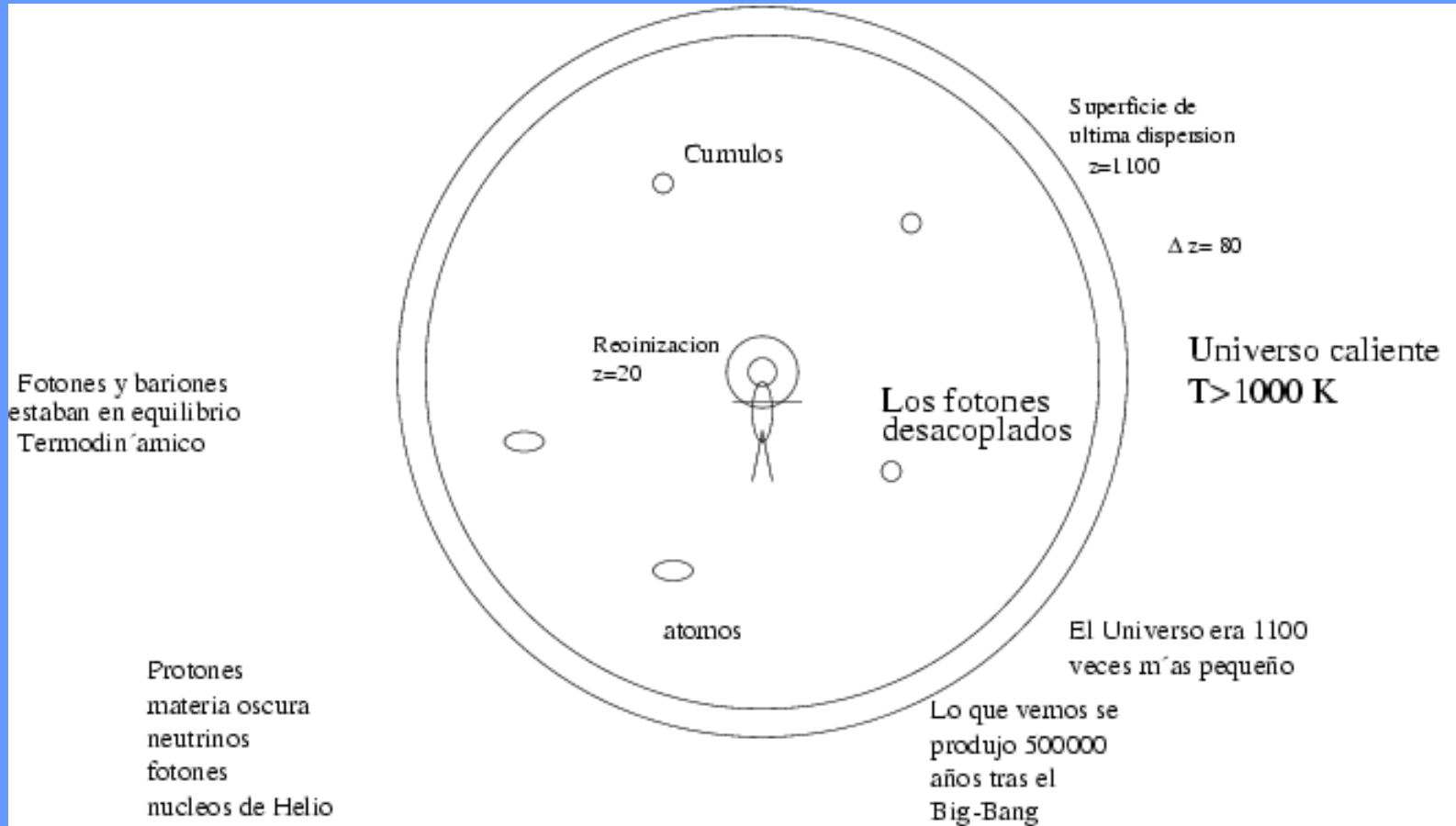
# ISOTROPY OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND

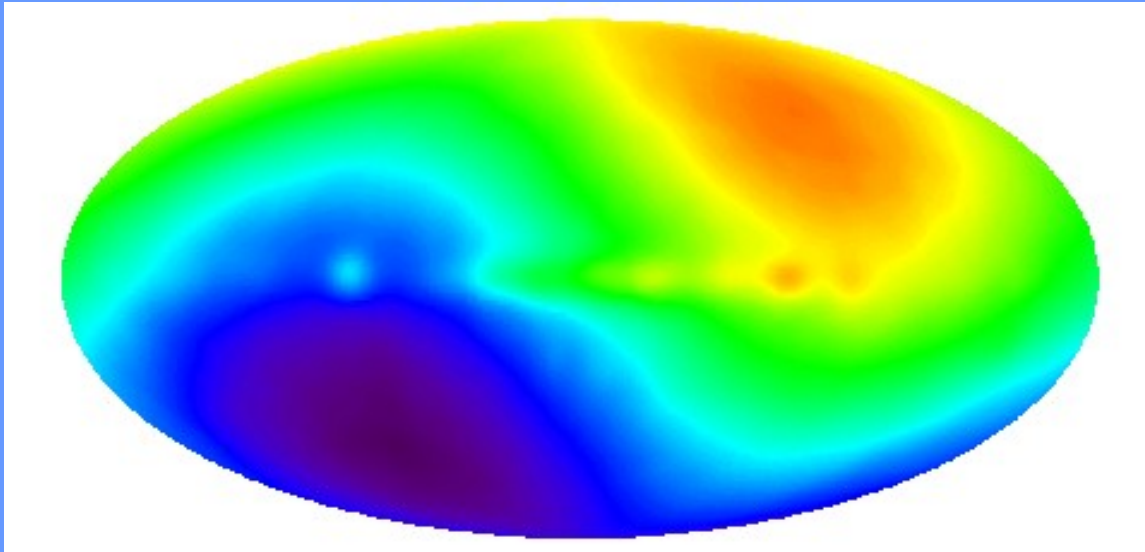


MAP990004









Museo Elder. 2009



# dipolo

$$T' = T \frac{1 - v \cos \vartheta}{\sqrt{1 - v^2}}$$

$$v = 620 \text{ km/s}, l = 227^\circ, b = 30^\circ$$



# Observamos

- Es pequeño pero no nulo.
- Anisotropía dipolar
- Anisotropías primarias.
  - Efecto Sachs-Wolfe
  - Efecto Doppler
- Anisotropías secundarias.

$$\frac{\Delta T}{T}(\vec{u})$$

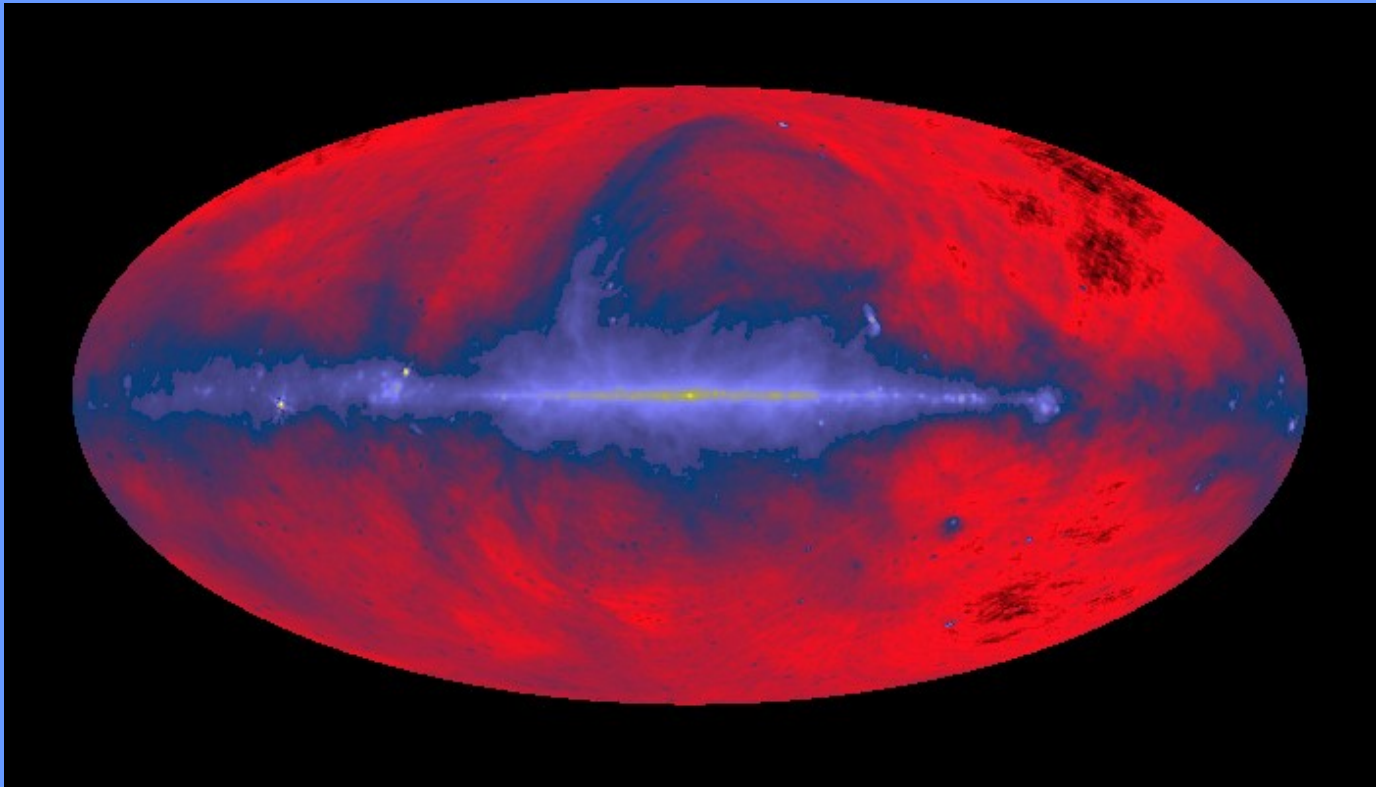


# Anisotropías secundarias

- Se producen durante el largo trayecto de los fotones hasta nosotros.
- La Vía Láctea (sincrotrón, libre-libre, térmico)
- Efecto Sunyaev-Zeldovich
- Efecto Sunyaev-Zeldovich cinético
- Fuentes puntuales
- ...

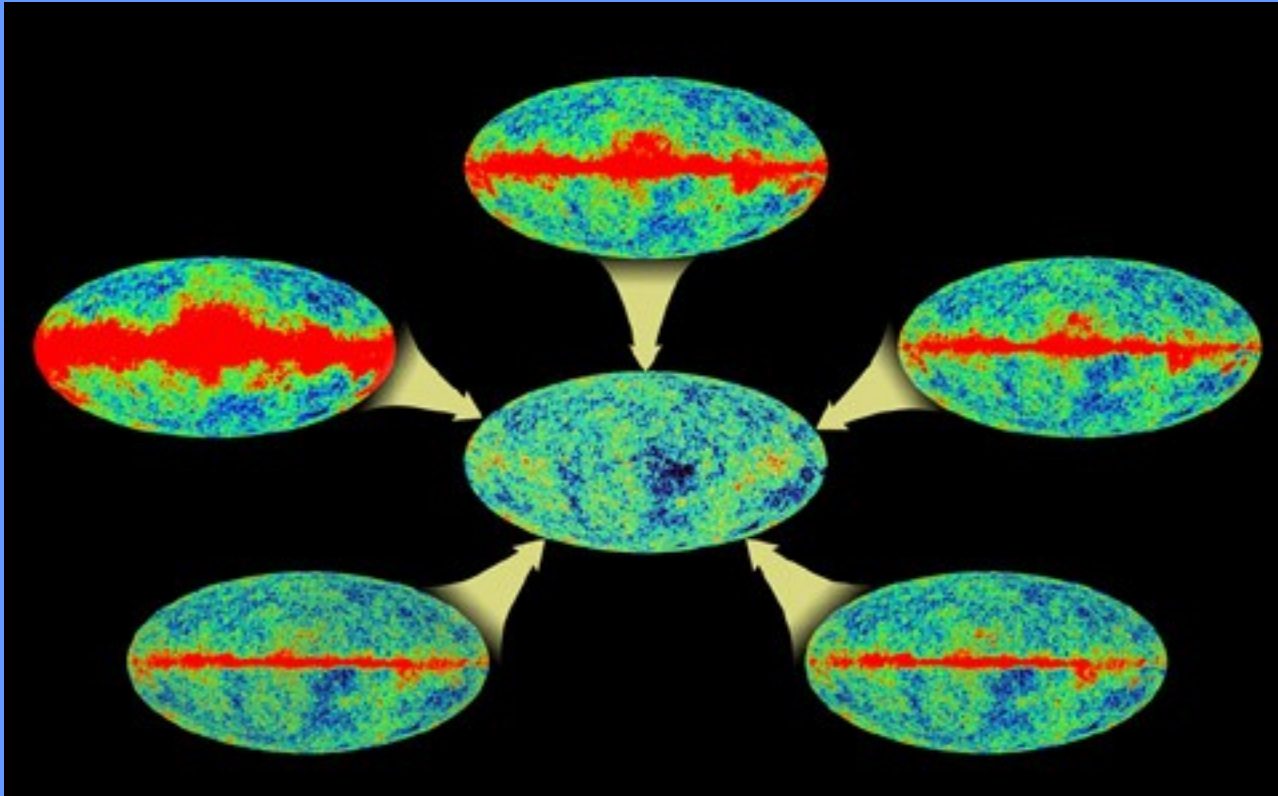






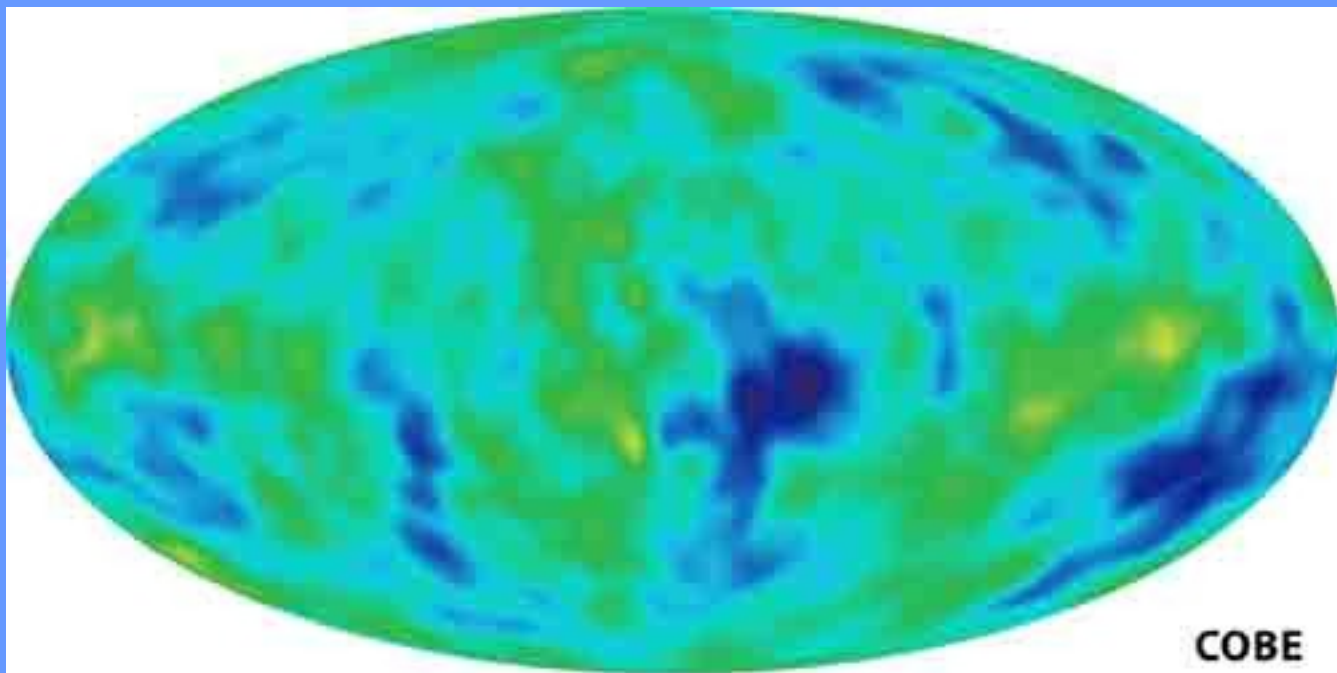
Museo Elder. 2009



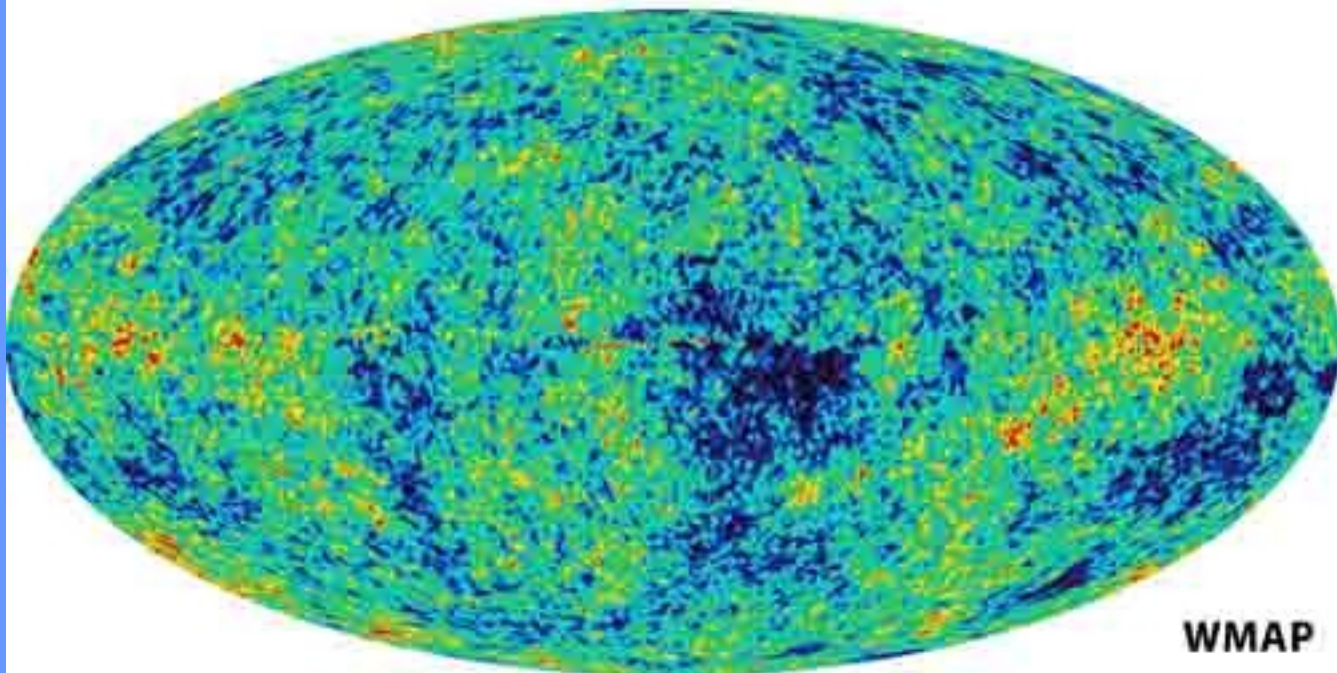


Museo Elder. 2009



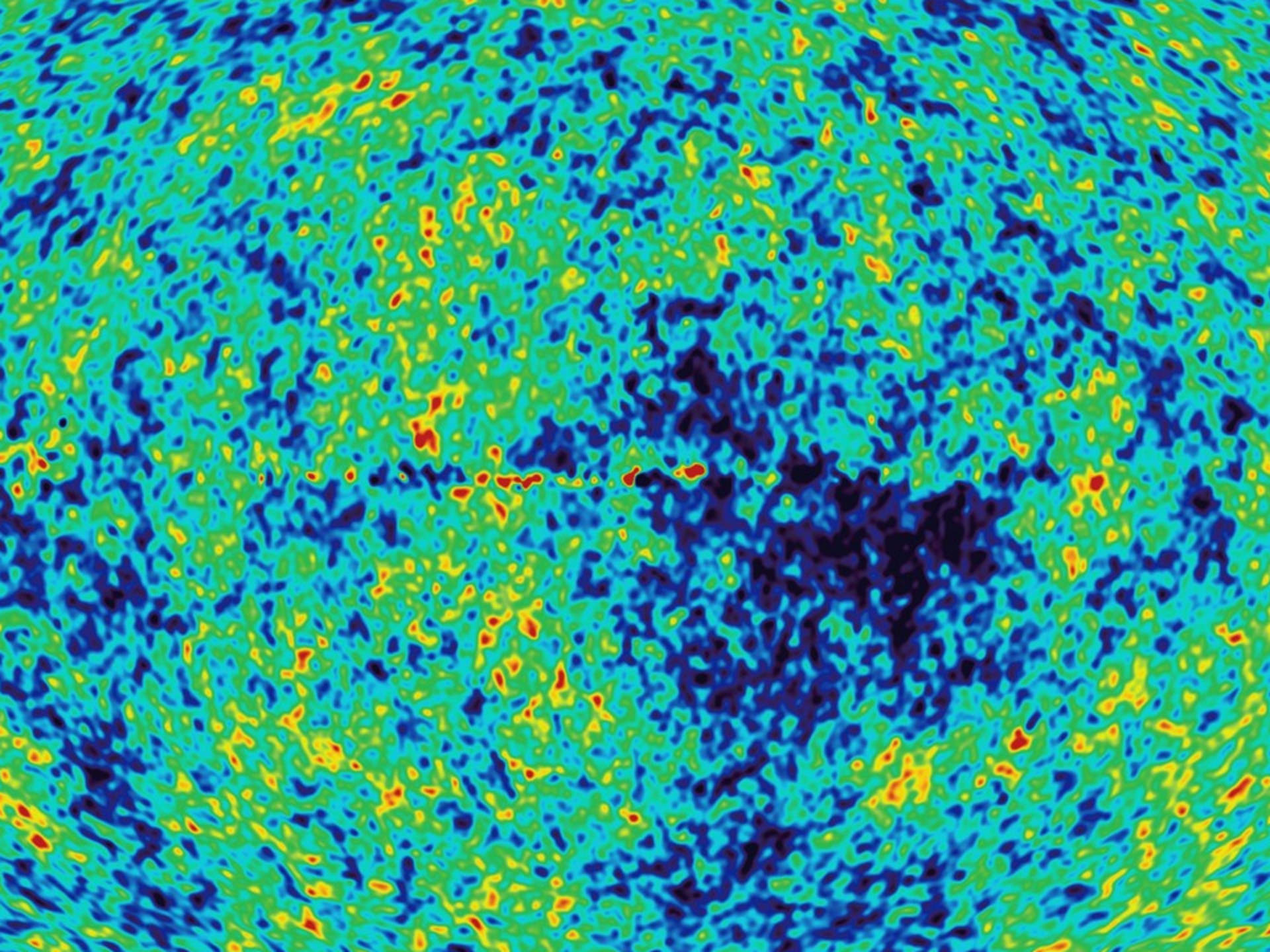


**COBE**



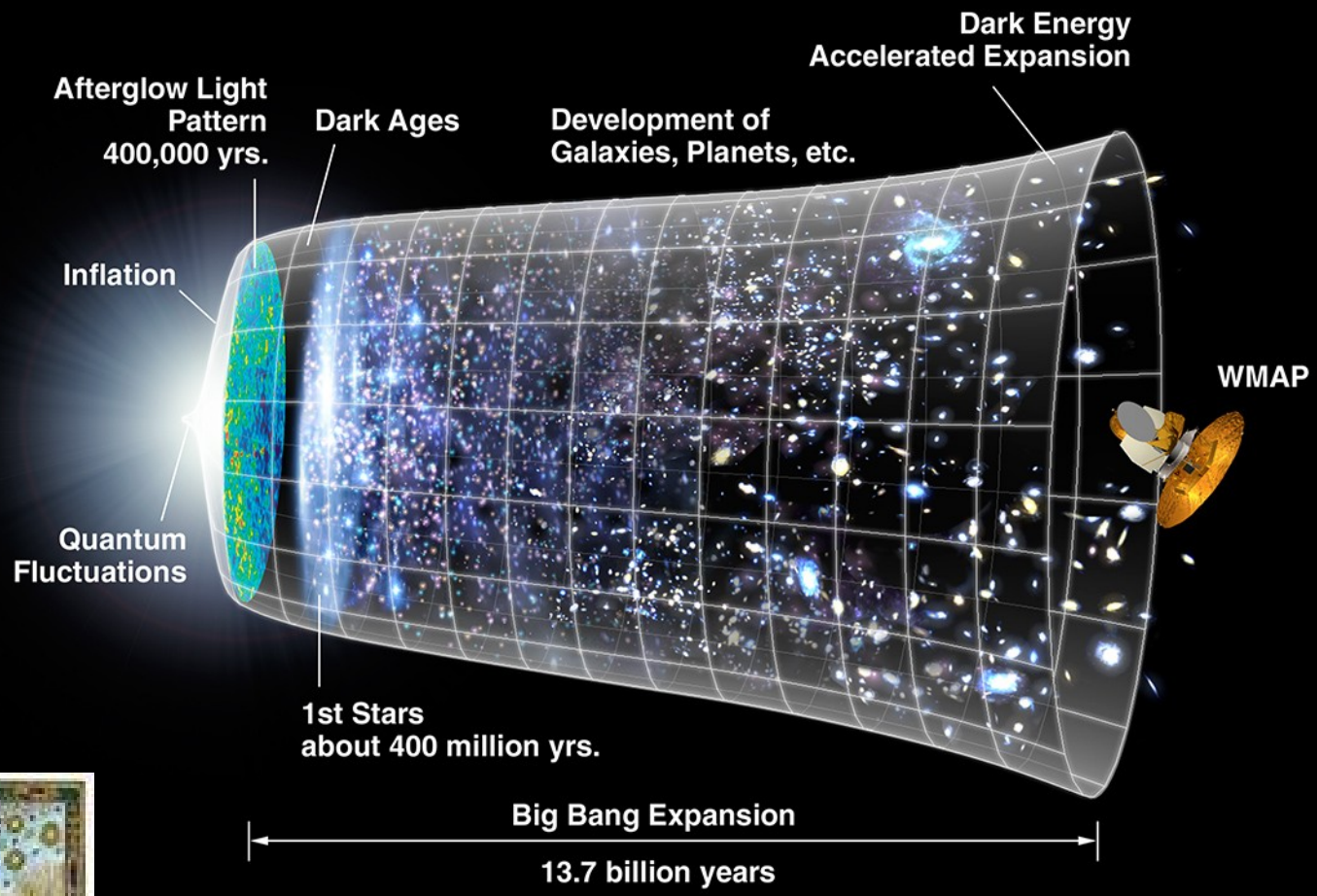
**WMAP**





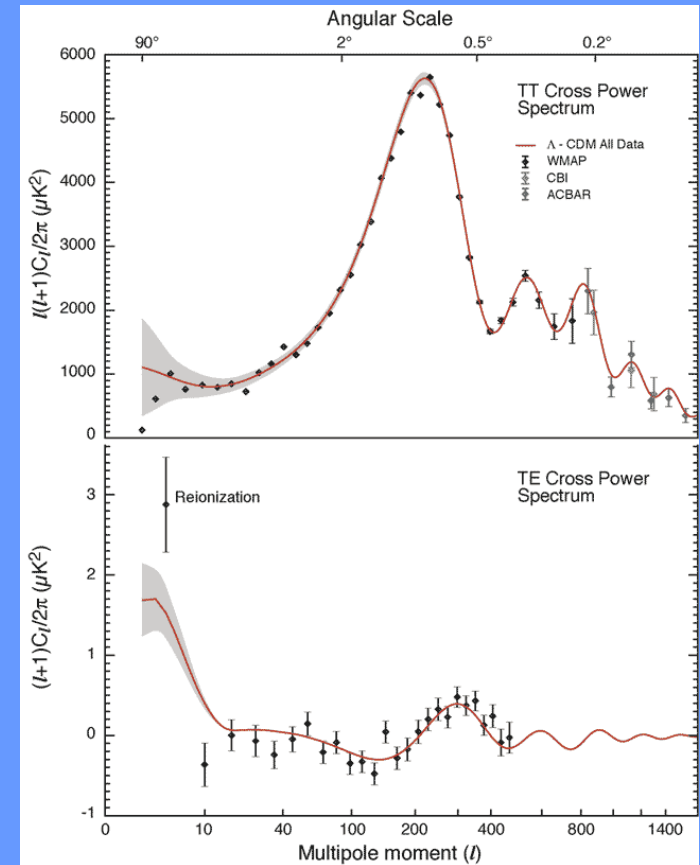
- Una galaxia tendría 10''  
(1' considerando halo oscuro frío)
- El horizonte correspondería a un  
“supercúmulo” de hoy)
- Hay anisotropías sub- y super-horizonte





# Armónicos esféricos

- Momento del dipolo “1”: Cuanto mayor menor es el ángulo de la anisotropía.
- Obsérvese el “pico Doppler”.
- CMB no es predecesor de “nuestro Universo”, pero su espectro tiene que ser el predecesor de nuestro espectro de inhomogeneidades.
- A partir del espectro hay que determinar cómo es el Universo.
- CMBFAST es un código popular: Es una tienda de universos.



# Efecto Sachs-Wolfe

Predomina a ángulos grandes, l pequeño

Estructuras super-horizonte

Si la densidad es mayor hay desplazamiento al rojo relativista





# Música primordial

El espectro de anisotropías con sus picos Doppler, recuerda más la música con una nota y sus armónicos que el ruido.

Las ondas de Jeans generadoras de estrellas y galaxias son ruido

Porque las ondas del CMB se crearon al mismo tiempo

Incluso, las anisotropías con un nivel de  $1/100000$  pudieran medirse en decibelios

Sería una música muy suave. Un coro a 4 voces, la más aguda de las notas se iría amortiguando

Pero: El concierto duraría 400 000 años, con una sola nota



densidad  
de entgía por  
frecuencia

El espectro del cuerpo negro se modifica  
por el efecto Sunyaev-Zeldovich

Rayleigh-  
Jeans

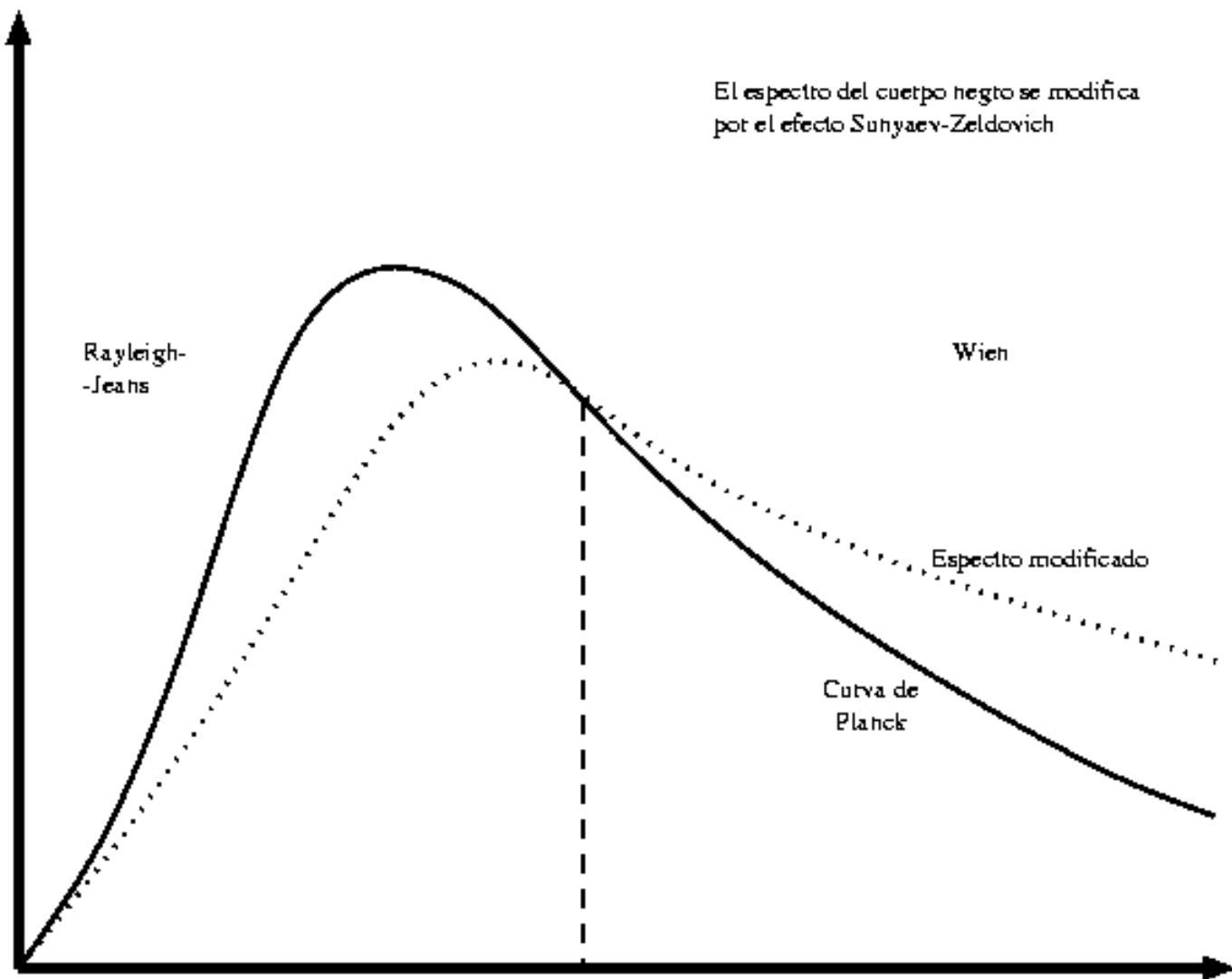
Wien

Espectro modificado

Curva de  
Planck

1.38 mm

Frecuencia



log	$N(\text{cm}^{-3})$	T (K)	B(gauss)
Ionosfera	3, 6	2, 3	-1, -3
Interplanet	1, 4	2, 3	-6, -5
Sol	8, 12	4, 7	-5, 1
Interior *	27	7	-
HII	2, 3	3, 4	-6
HI	-3	2	-6
Púlsares	12, 42	-	12
Interestelar	-3, 1	2	-6, -5
Intergaláctico	-4	5, 9	-6
CMB	4	3	-4, -2
Universo	-5	?	-8, -6

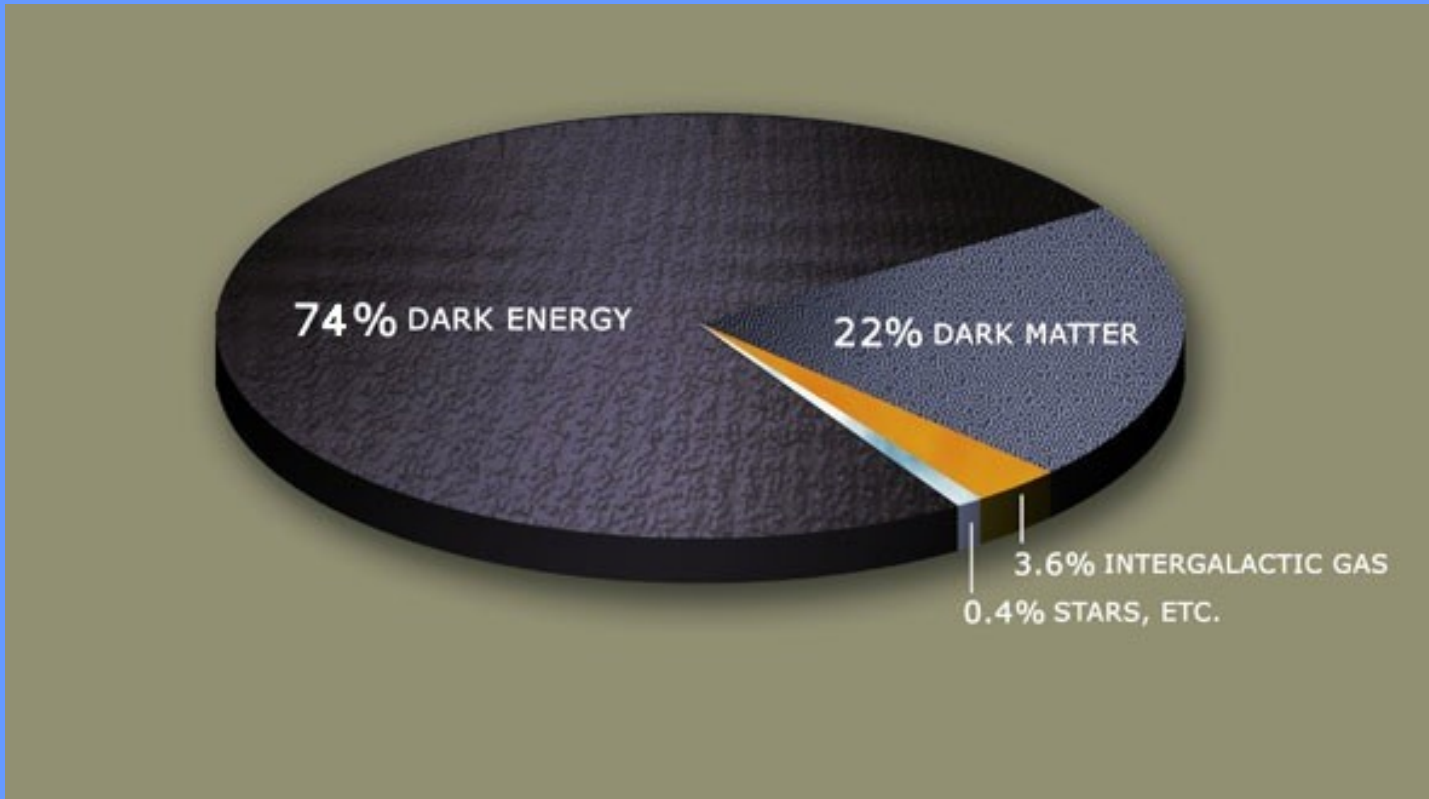
Museo Elder. 2009



# Pero hay diferencias...

- Expansión de Hubble
- Condiciones iniciales en la era dominada por la luz
- Influencia de la materia oscura y la energía oscura
- Colapso de inhomogeneidades
- ...
  
- La experiencia en la ionosfera no nos sirve de mucha ayuda





# Constantes del Universo

Antes



Ahora

$z = 1100$ , CDM, inflación

$(13.7 \pm 0.2) \times 10^9$  años

380000 tras Big - Bang

$H_0 = 71 \pm 4$  km/(s Mpc)

$\Omega_B = 0.044 \pm 0.04$

$\Omega_{\text{no bariónico}} = 0.23 \pm 0.04$

$\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$

Reioniza :  $100 - 400 \times 10^6$  años

$z_* = 30 - 11$



# Homogeneidad

- Principio Cosmológico:  
El Universo es homogéneo e isótropo
- Necesario, atractivo, confirmable
- ¿Por qué?



# homogeneidad

- La homogeneidad lleva a la homogeneidad
- Nació así...?
- El problema del horizonte
  - Lo que vemos desconectado causalmente estuvo conectado
  - Inflación: La expansión fue más rápida que el horizonte relativista
  - Vivimos en una burbuja de homogeneidad





# Planitud

- La inflación explica por qué el Universo es plano
- La rápida expansión “estiró” la curvatura



# El futuro

- ¿Muerte térmica del Universo?
- ¿Expansión indefinida o recolapso?
- El Universo se reacelera
- El término cosmológico de Einstein



# El gran desgarrón

- La energía oscura es energía del vacío
- Propiedad expansiva del Universo
- Energía oscura: la componente más importante
- En el futuro será la componente dominante
- Expansión exponencial
- Todo se aislará de todo



# Greguerías

- Podemos “ver” el pasado ( o más bien: sólo podemos ver el pasado).
- Podemos volver a ver lo que ya vimos y dejamos de ver y volveremos a dejar de ver.
- Podríamos “ver” algo aún más próximo al Big-Bang, pero hoy aún no lo vemos
- No vemos casi nada. Ni lo vemos ni lo podemos ver.



# Ideas por aclarar

- El Big-Bang no tuvo por qué ser puntual.
- No es localizable. En todos los puntos actuales se produjo.
- El Big-Bang se deduce por extrapolación. No sabemos si ocurrió.
- No hay tiempo antes del Big-Bang.
- El Universo puede ser finito y no tener bordes.
- El Universo es eviterno



# Muchas gracias

