



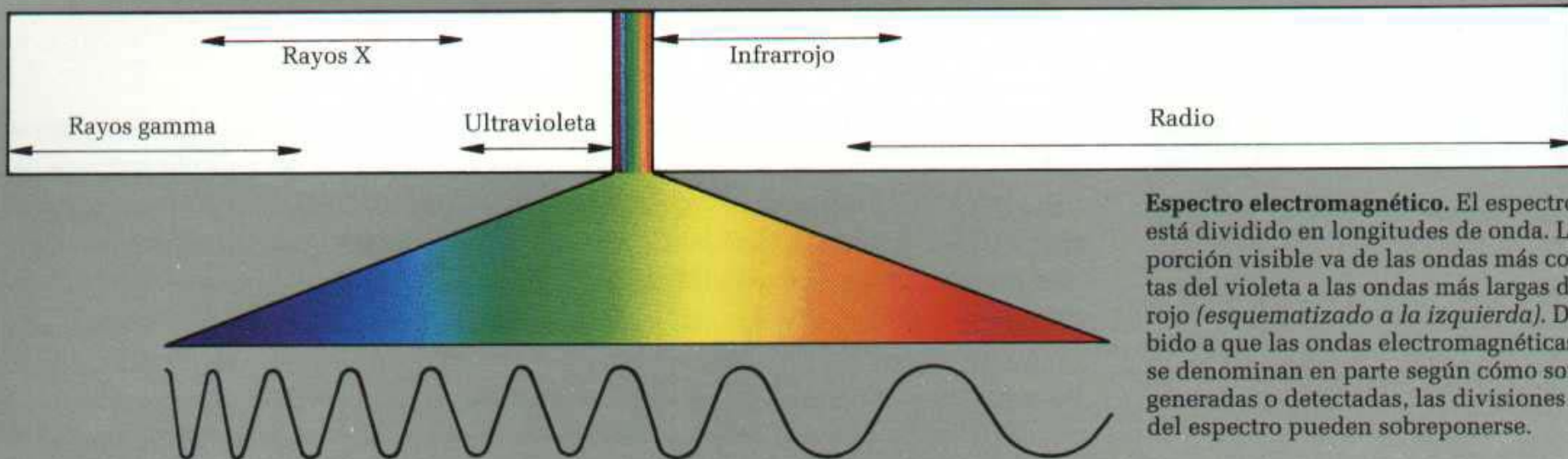
Aplicaciones de ondículas en Astrofísica

Enrique Martínez González
Instituto de Física de Cantabria

Ciclo de talleres divulgativos "Matemáticas en acción",
Santander, 27 de Octubre de 2004

INDICE

- Cosmología
- Tests fundamentales
- Radiación Cósmica del Fondo de Microondas: características
- Ondículas
- Análisis de la Radiación de Fondo con ondículas
 - Detección de fuentes extragalácticas
 - Detección del efecto SWI
- La misión WMAP
- Retos futuros: Misión Planck



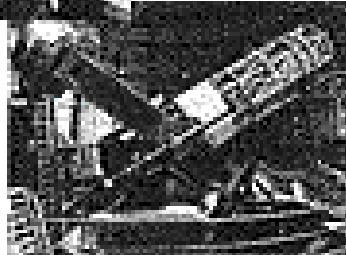
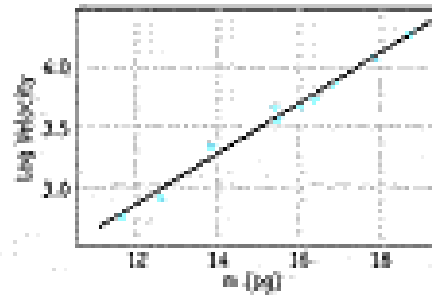
Espectro electromagnético. El espectro está dividido en longitudes de onda. La porción visible va de las ondas más cortas del violeta a las ondas más largas del rojo (*esquemático a la izquierda*). Debido a que las ondas electromagnéticas se denominan en parte según cómo son generadas o detectadas, las divisiones del espectro pueden sobreponerse.

Expansión del universo

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE

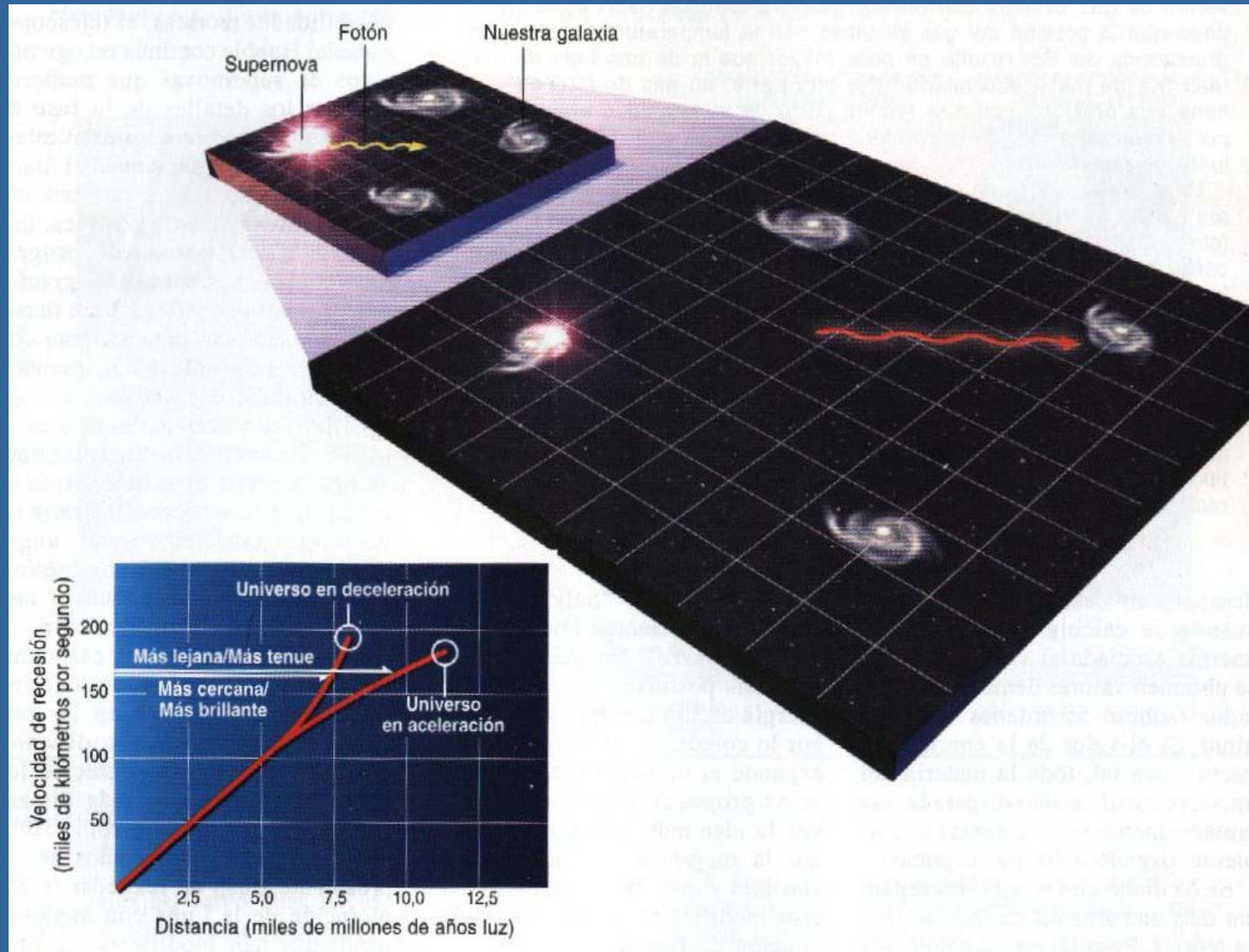


Edwin Hubble

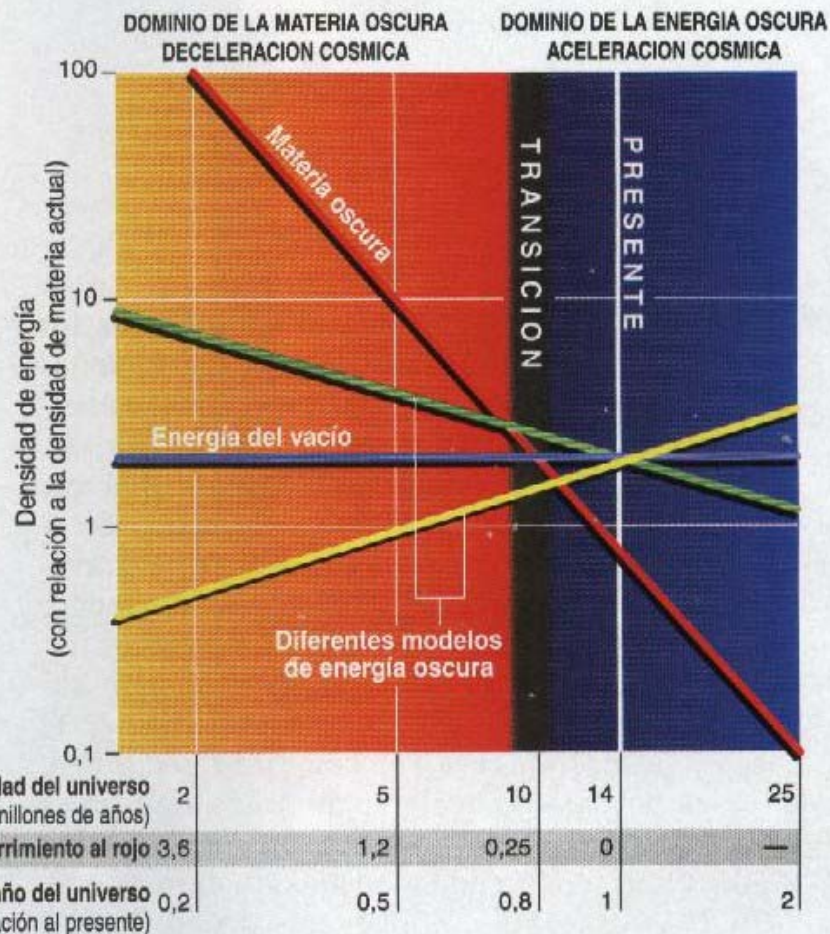
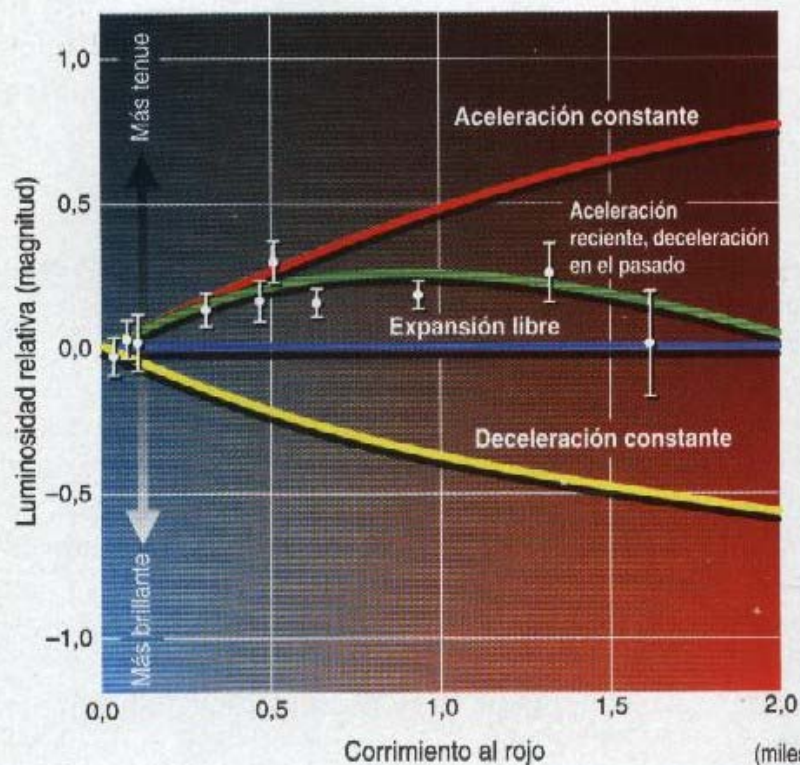


Hale Telescope
100 Inch
Telescope

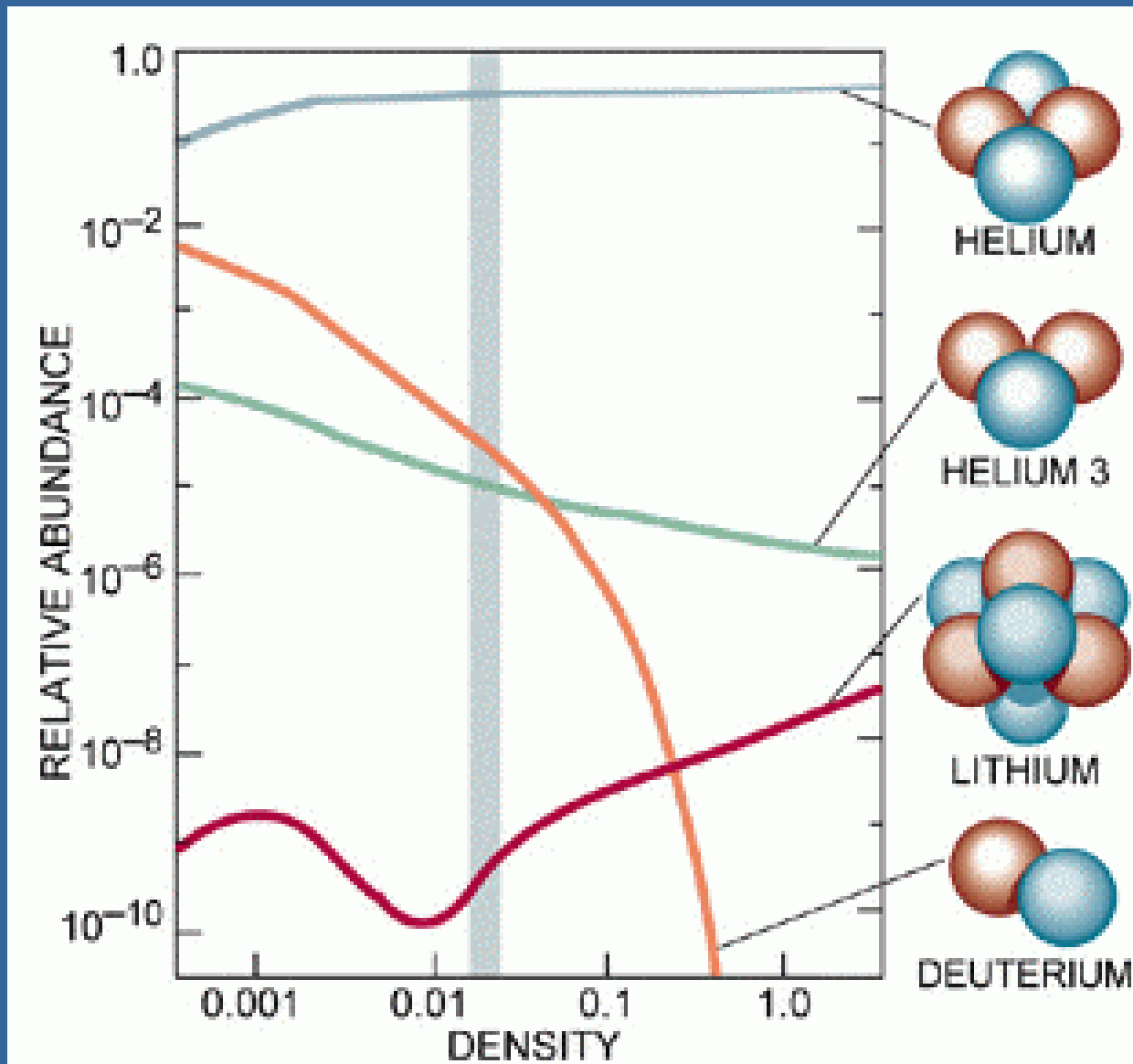
SUPERNOVAS



Aceleración versus deceleración



NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL



La Radiación Cósmica del Fondo de Microondas

Radiación electromagnética muy débil que llega a la Tierra desde todas las direcciones

- Caracterizada por un espectro de cuerpo negro perfecto



Origen de la RCFM



- Universo totalmente ionizado
- Materia y radiación en equilibrio termodinámico
- Universo opaco en expansión

$$T(z) \sim (1+z)$$

Cuando $z \sim 1000$ (unos 4×10^5 años)



$T \sim 3000 \text{ K}$

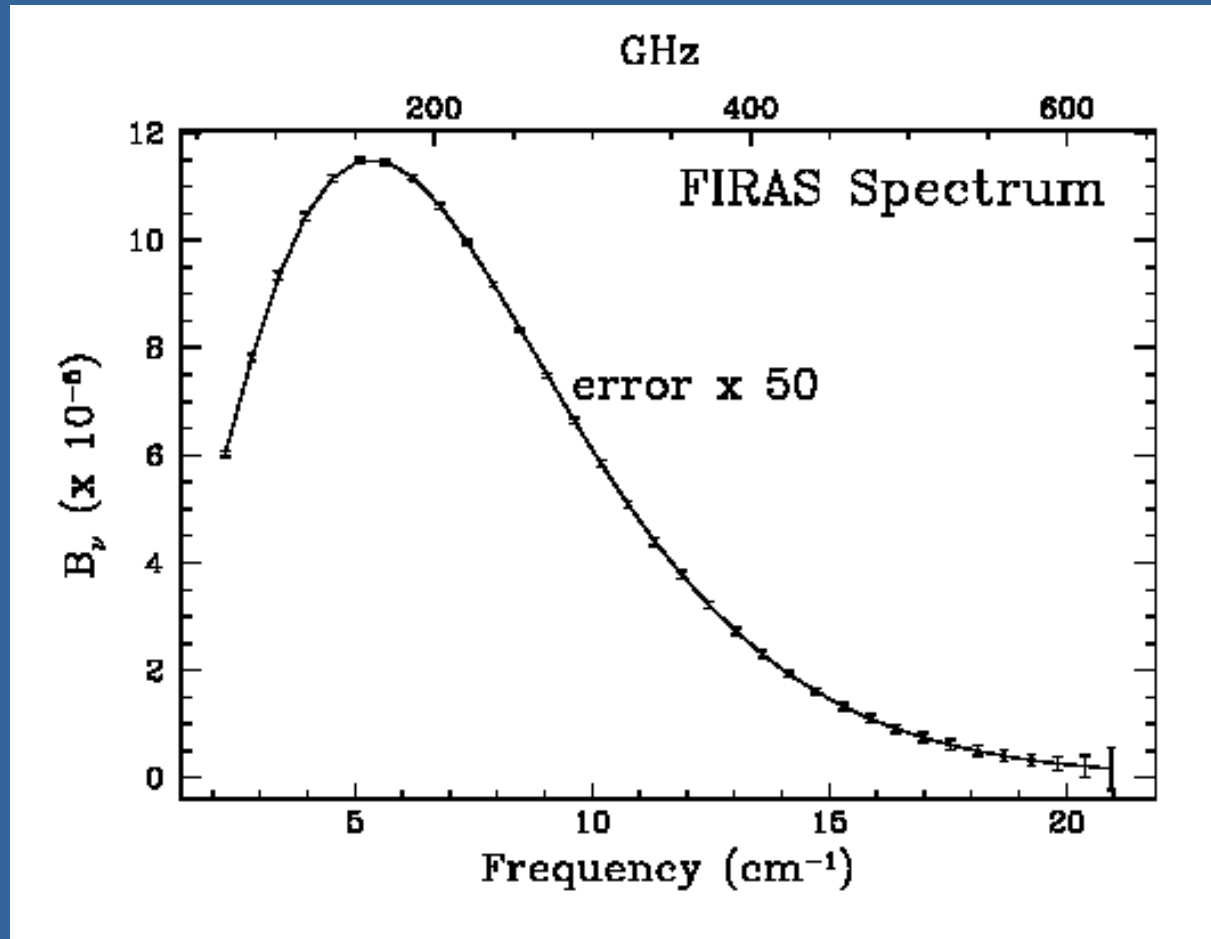
RECOMBINACIÓN

DESACOPLO

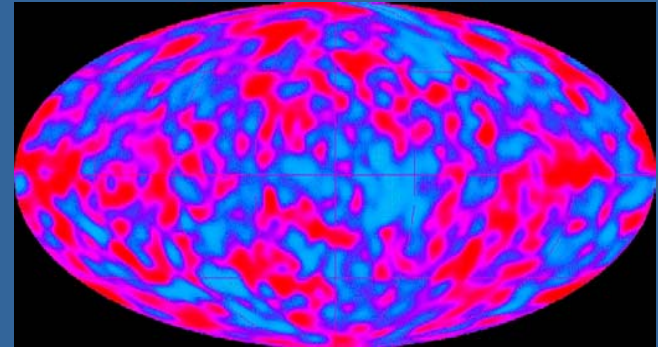
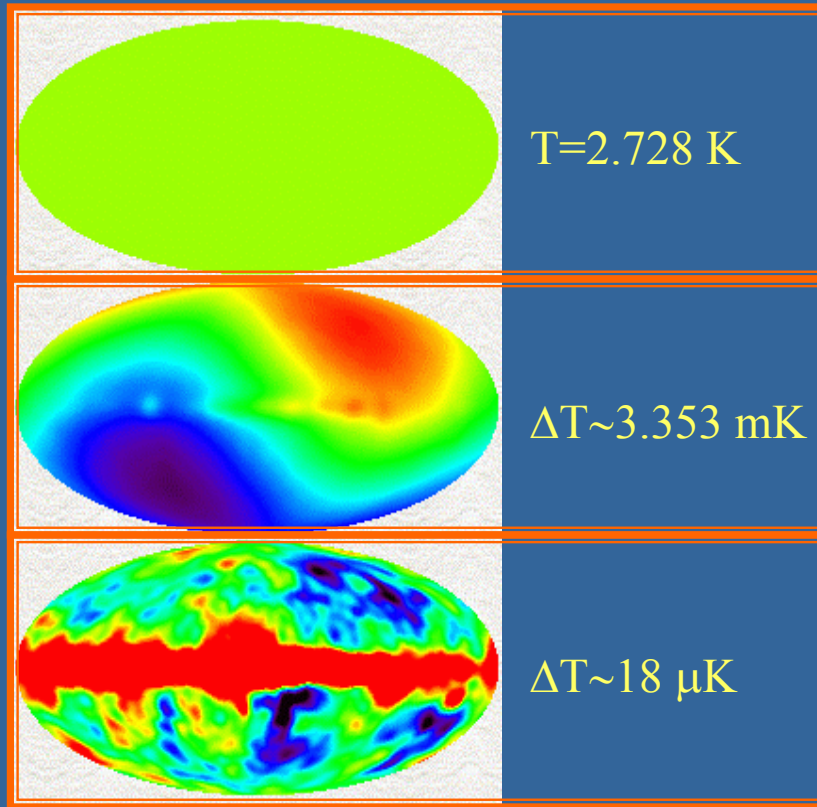
Los fotones quedan libres y forman la RCFM
“La imagen más antigua del Universo”

El Universo se vuelve
transparente

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO DE LA RCFM



Anisotropías de la RCFM

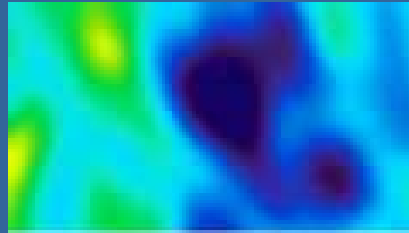


$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

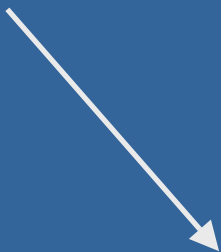
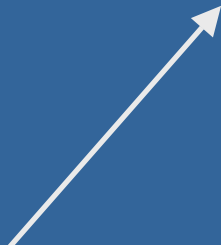
La huella de las fluctuaciones de densidad en el Universo primitivo

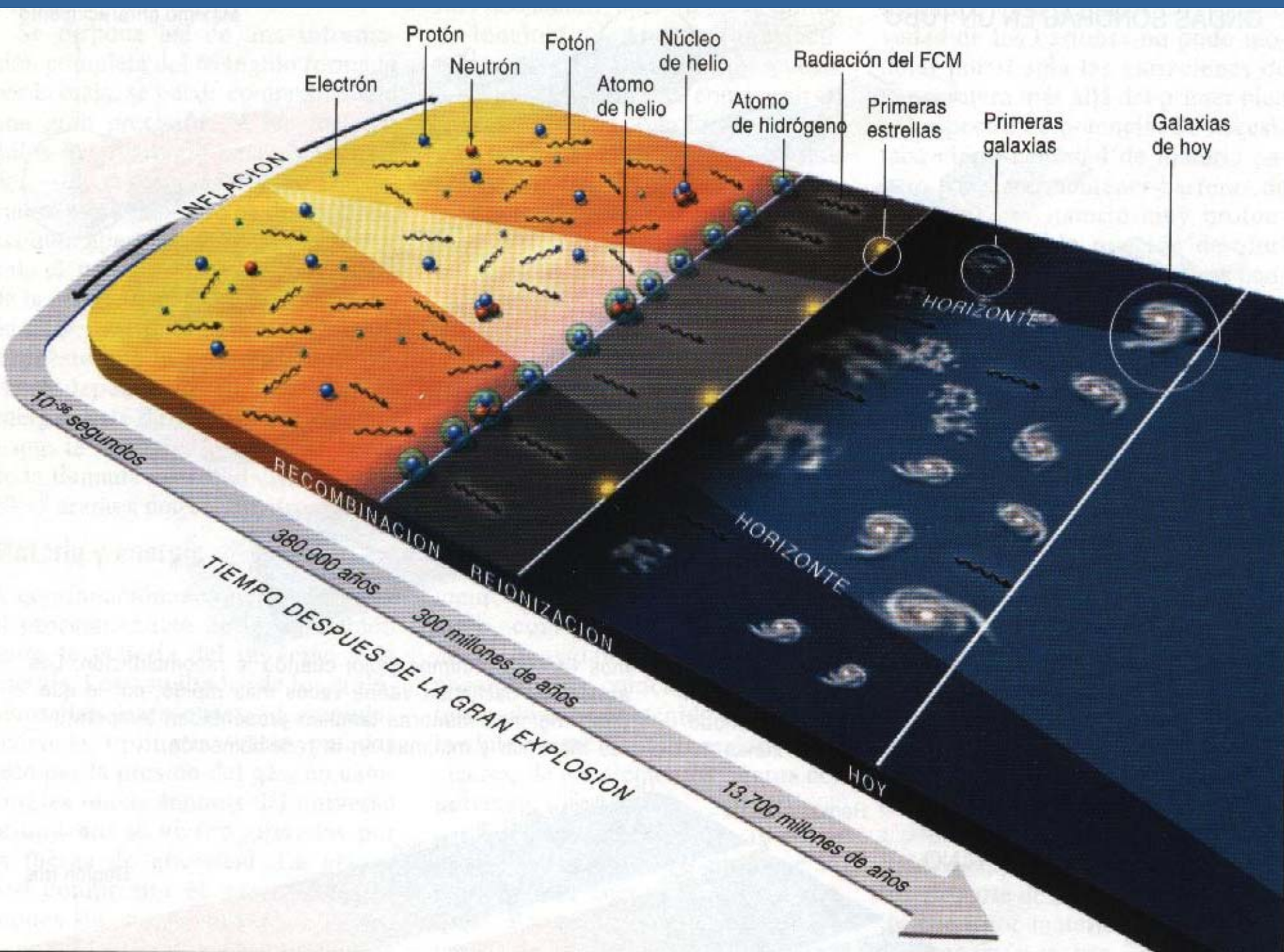
LA RCFM Y LA MACROESTRUCTURA DEL UNIVERSO

RCFM →



EVOLUCION





Anisotropías de la RCFM

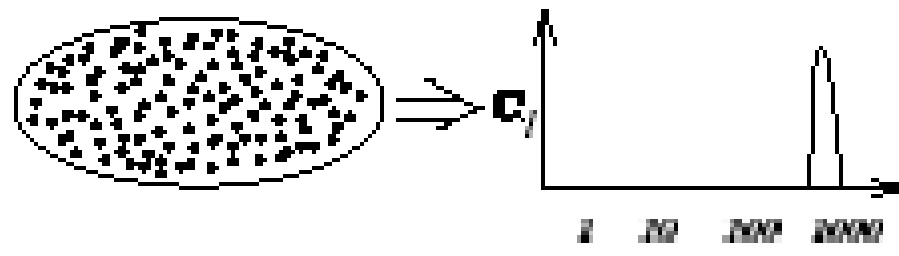
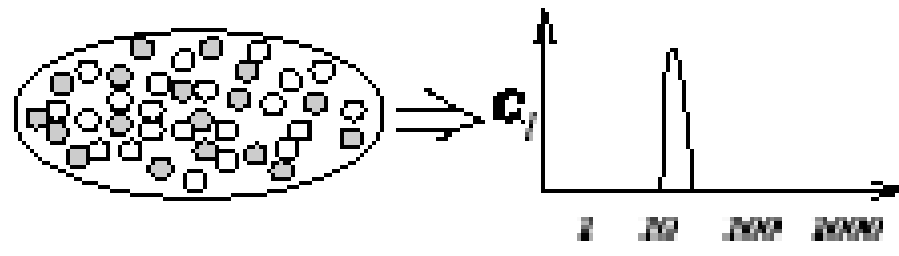
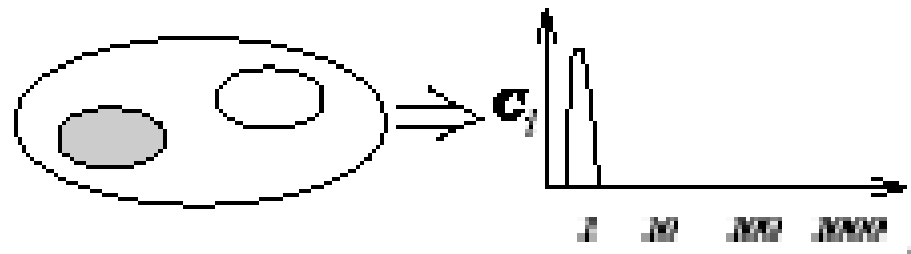
- Las propiedades estadísticas de las anisotropías están determinadas por el modelo cosmológico
- Las anisotropías pueden describirse en *armónicos esféricos*:

$$\frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\vec{n}) \quad \ell \approx \frac{1}{\theta}$$

- Si las fluctuaciones son gaussianas se caracterizan totalmente por su varianza a cada escala angular.

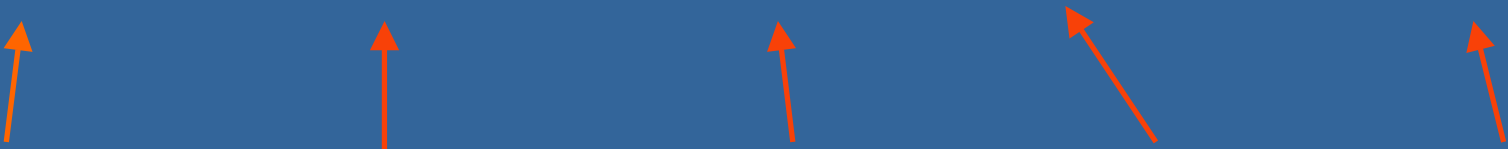
ESPECTRO ANGULAR DE POTENCIAS

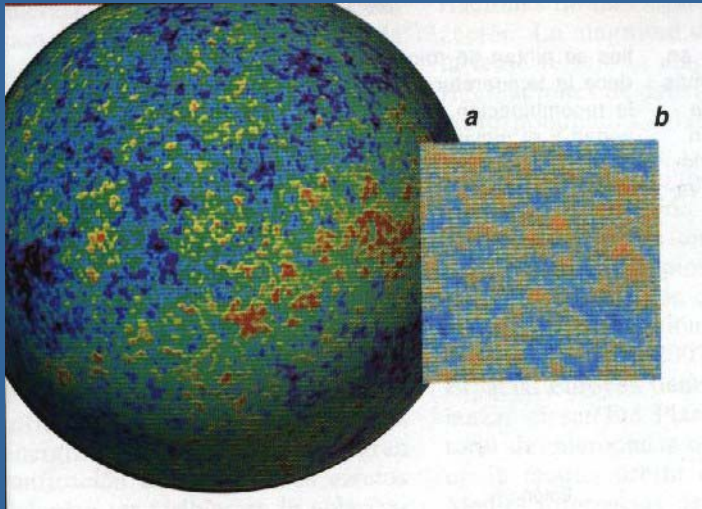
90° 1° 0.1°



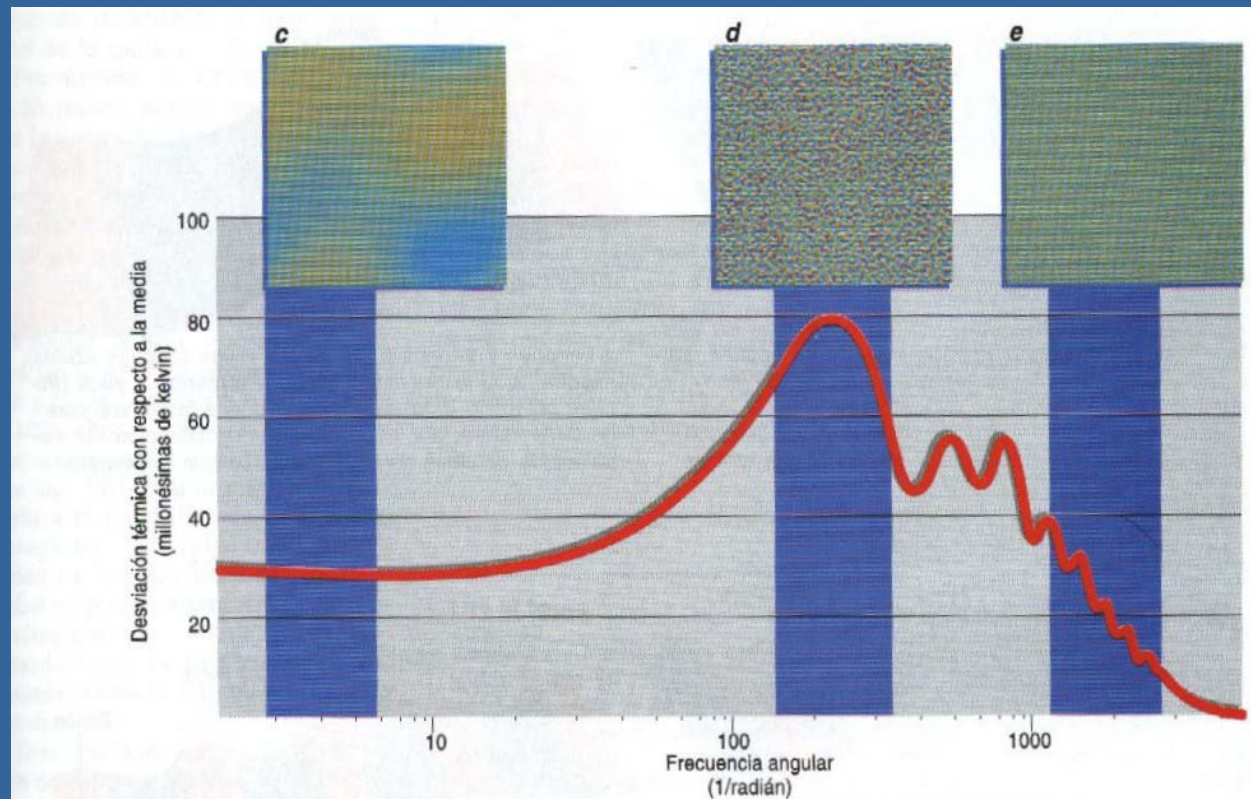
Mecanismos generadores de anisotropía

$$\frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) = \left(\frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) \right)_d + \frac{1}{3}\phi_d + \int \frac{\partial \phi}{\partial t} dt + \vec{n} \cdot (\vec{V}_0 - \vec{V}_d)$$

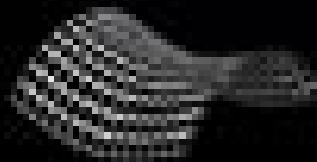
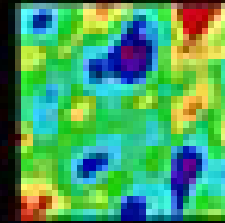
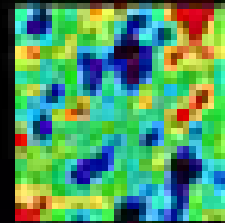
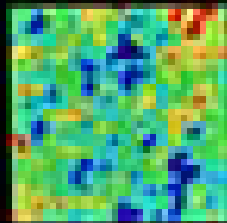

Temperatura = Temperatura desacoplo + Gravedad + Variación de Gravedad + Velocidad



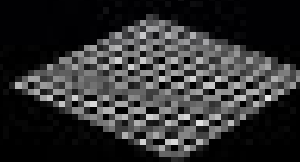
ESPECTRO DE POTENCIAS



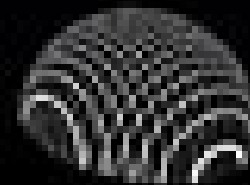
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN



FLAT



CLOSED

PARÁMETROS COSMOLÓGICOS

- Universo uniforme

- H_0 : razón de expansión
- Ω : parámetro de densidad =

$$\Omega_R + \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_{DE}$$

- Fluctuaciones de la densidad

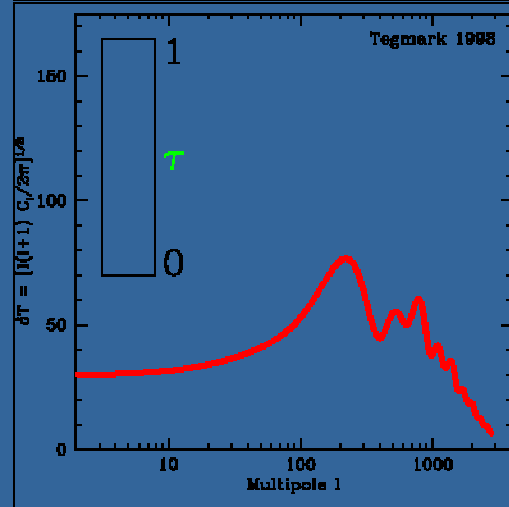
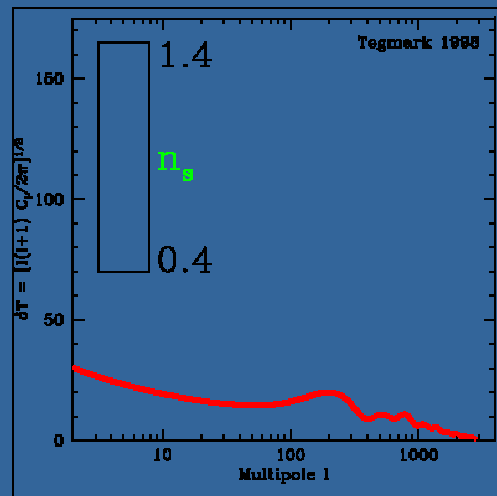
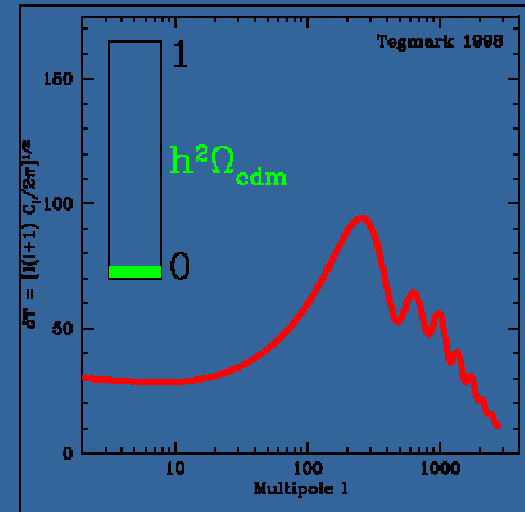
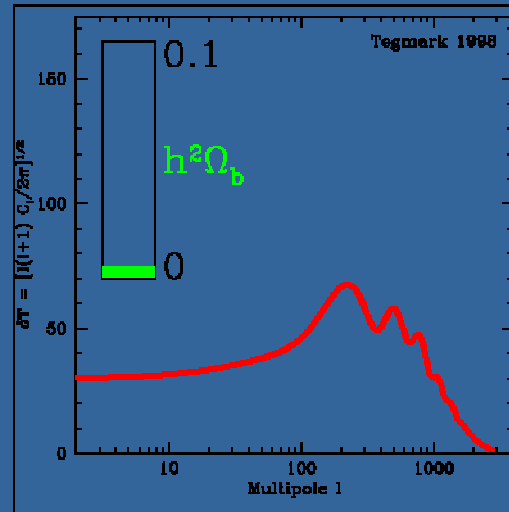
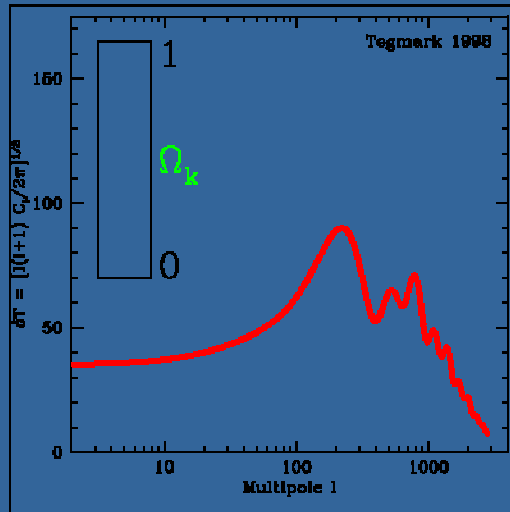
- A: amplitud de las fluctuaciones iniciales en la densidad
- n: índice que caracteriza el tipo de las fluctuaciones

Medida de los parámetros cosmológicos con el FCM

El espectro de potencias varía con:

$$\Omega_{\text{tot}}, \Omega_b, \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_{\text{DE}}, \tau, n_s, h, A_s, r,$$

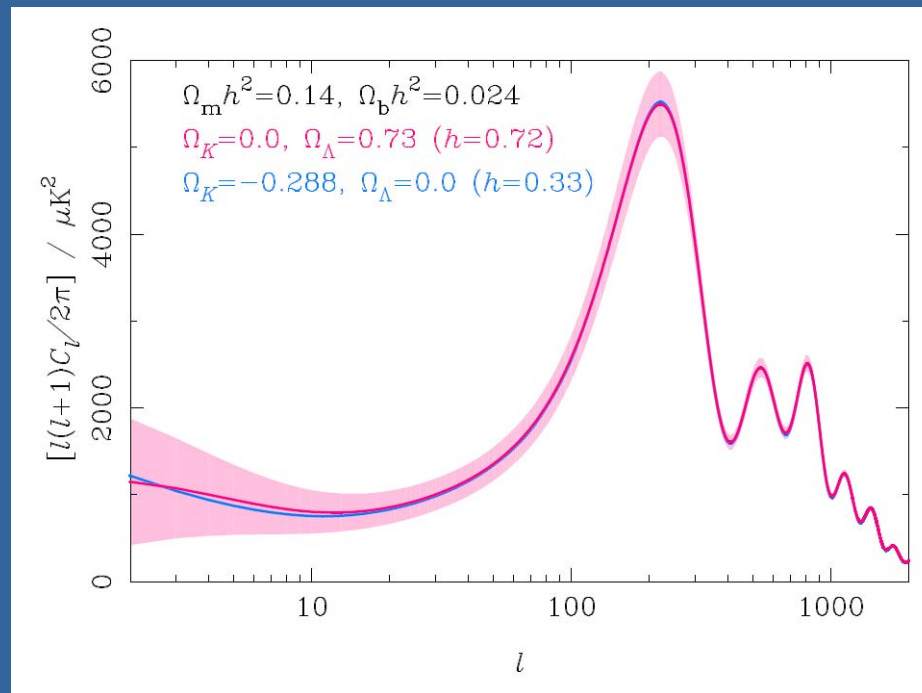
(CMBFAST, CAMB)



etc, etc, etc

GEOMETRIC DEGENERACY

- The curvature and dark energy properties affect the CMB mainly through the angular-diameter distance D_A (**geometric degeneracy**).
- In general, **degeneracies in the cosmic parameters** can be broken by including LSS data (e.g. Geometric one), SNIa (e.g. Ω versus Λ), polarization (e.g. n versus τ), ...

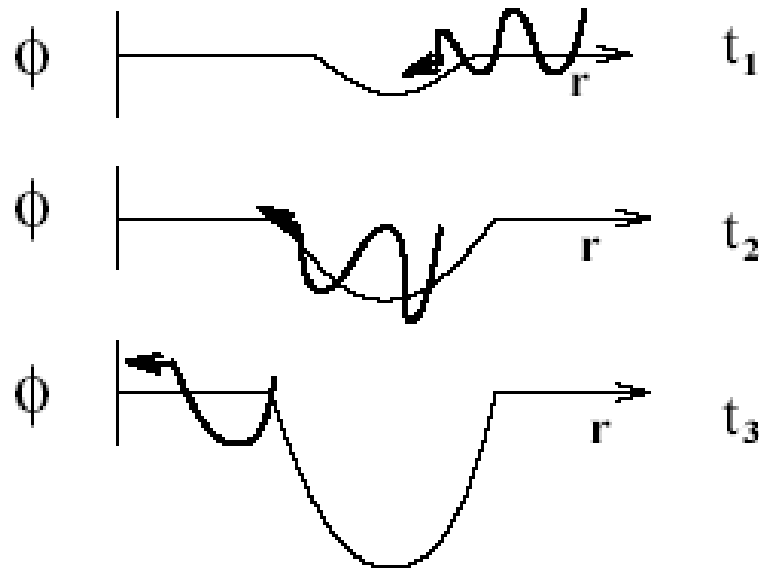


(Challinor 2004)

Efecto Sachs-Wolfe Integrado

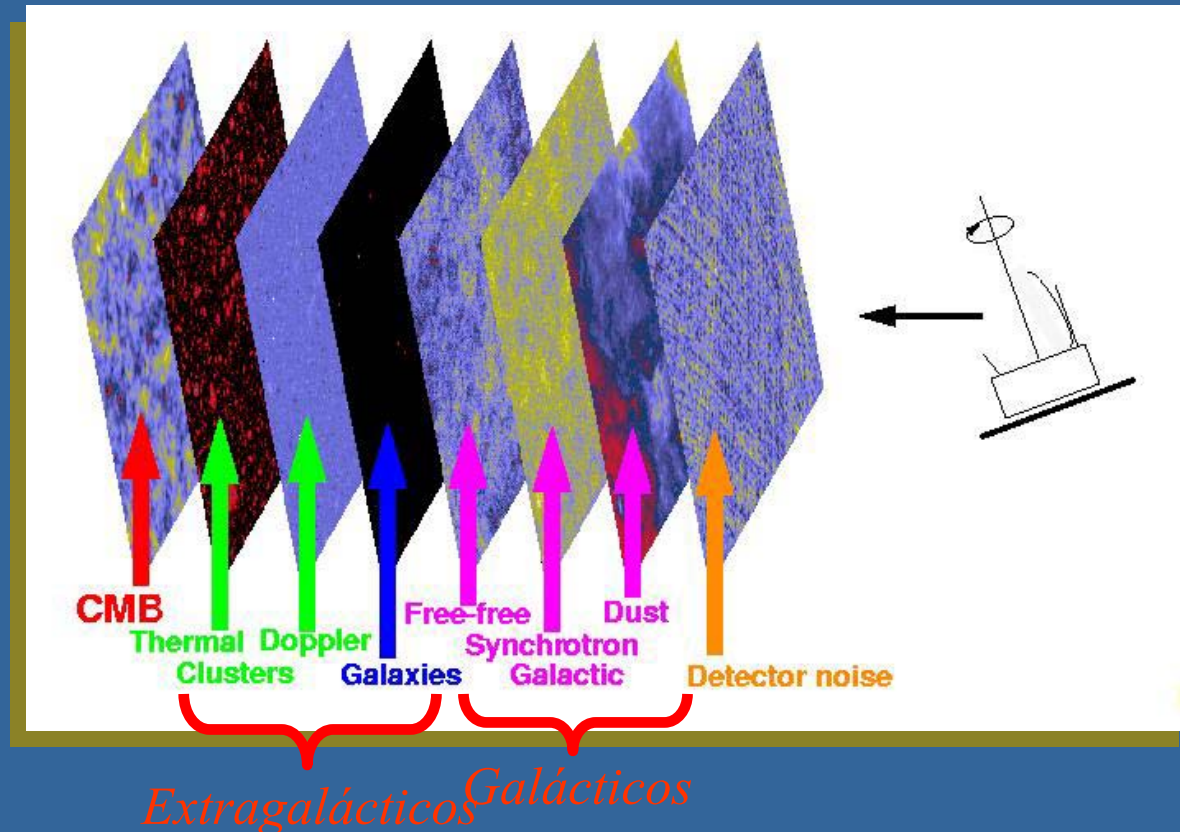
$$\text{SWI: } \int_{t_{\text{dec}}}^{t_0} \dot{\phi}(r,t) dt$$

Efecto Sachs-Wolfe integrado



Componentes

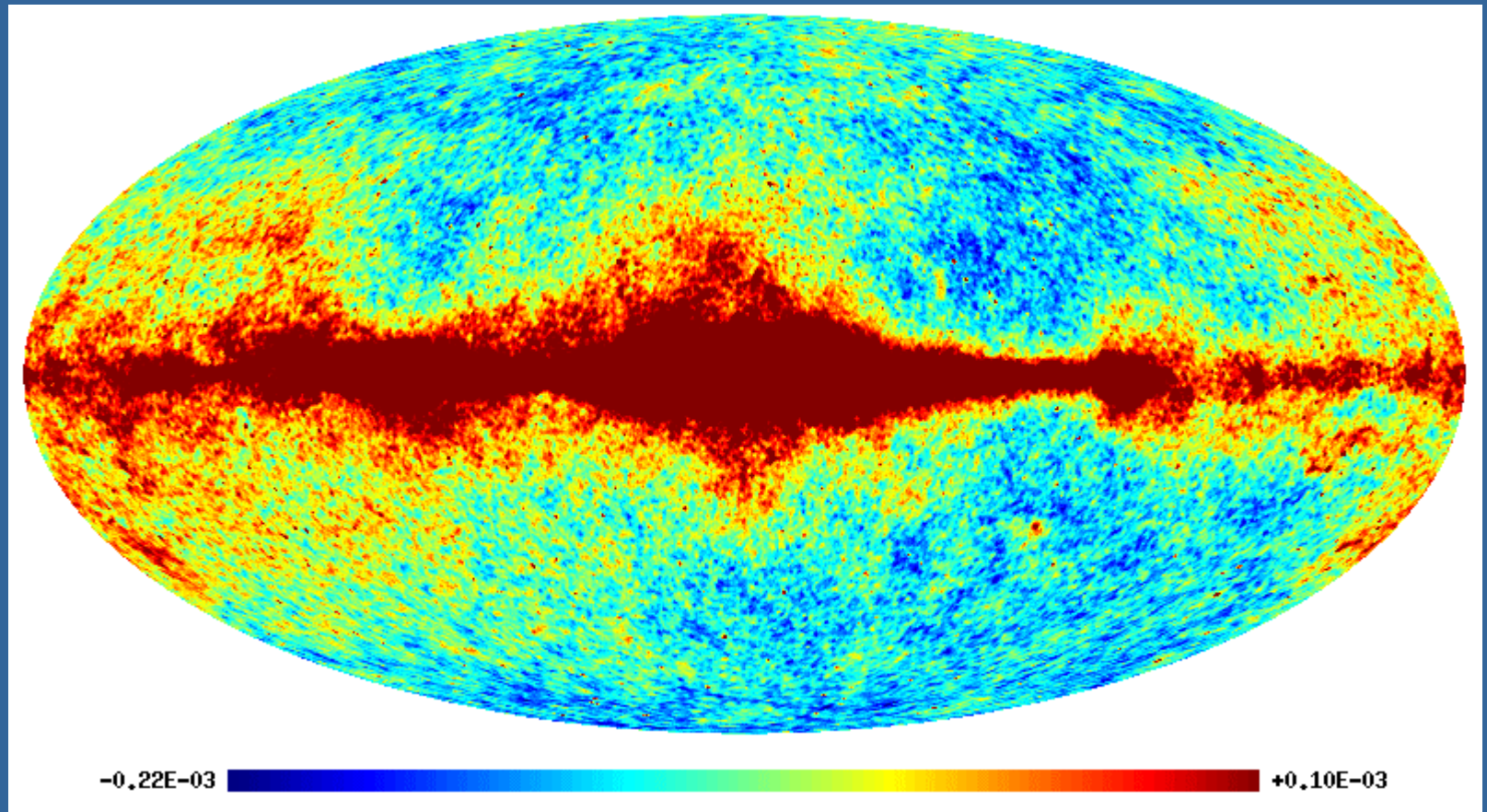
Emisiones superpuestas a la RFCM



Es necesario separar los componentes de los mapas de RFCM, en particular **las galaxias**.

COMPONENTES

FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS
MAPA DEL CIELO





La Ondícula Sombrero Mexicano (Marr)

La *transformada de ondícula* nos da información acerca de:

- La escala de las estructuras presentes en la señal
- La posición en el que estas estructuras se localizan

Se puede entender como una generalización de la *transformada de Fourier*.

$$w(R, \vec{b}) = \int d\vec{x} s(\vec{x}) \Psi(\vec{x}; R, \vec{b})$$

Transformada de ondícula continua e invariante con la rotación de una señal 2D.



La Ondícula Sombrero Mexicano

$$\Psi(\vec{x}; R, \vec{b}) = \frac{1}{R^2} \psi\left(\frac{|\vec{x} - \vec{b}|}{R}\right)$$

Ondícula a escala R y posición $\vec{b}$

Escala

Ondícula Madre



La Ondícula Sombrero Mejicano

La *ondícula madre* satisface:

Filtro efectivo

$$\int d\vec{x} \psi = 0,$$

compensación

$$\int d\vec{x} \psi^2 = 1,$$

normalización

$$C_\psi = (2\pi)^2 \int dk k^{-1} \hat{\psi}^2(k) < \infty,$$

admisibilidad



La Ondícula Sombrero Mejicano

La ondícula isótropa más simple es la Ondícula Sombrero Mejicano (OSM). Es el Laplaciano de una función gaussiana.:

$$\psi(x) \propto -\Delta e^{-(x^2/2R^2)} \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[2 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right] e^{-\frac{x^2}{2R^2}}$$

$$\hat{\psi}(k) \propto (kR)^2 e^{-\frac{1}{2}(kR)^2}$$



La Ondícula Sombrero Mejicano

$$s(\vec{x}) \equiv s(x) = \frac{I}{2\pi\sigma_a^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_a^2}}$$

Fuente puntual

El coeficiente (o la transformada) de la OSM en la posición del máximo viene dado por:

$$w(R) = 2\sqrt{2\pi}IR \frac{(R/\sigma_a)^2}{\left(1 + (R/\sigma_a)^2\right)^2}$$



La Ondícula Sombrero Mejicano

Las Fuentes Puntuales se amplifican en el espacio de ondículas:

$$A(R) = \frac{w(R)/\sigma_w(R)}{I/\sigma_m}$$

Dispersión del Mapa

$$\sigma_w^2(R) \propto \int dk k P(k) |\hat{\Psi}(k)|^2$$



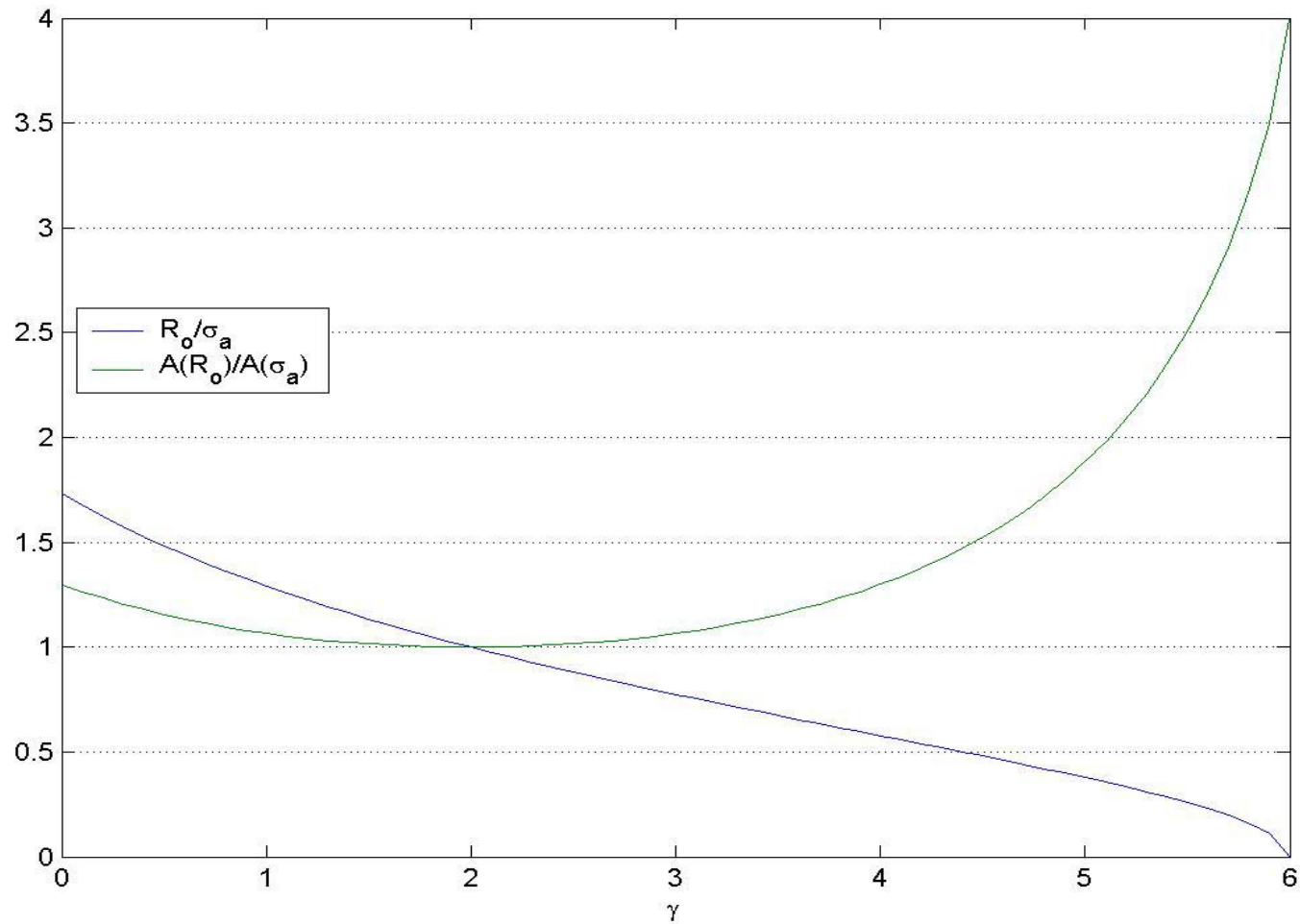
La Ondícula Sombrero Mexicano

Se puede encontrar una *escala óptima* que viene dada por los propios datos

$$R_o = f(P(k), \sigma_a)$$



La Ondícula Sombrero Mejicano





La Ondícula Sombrero Mejicano

Estimación de la amplitud mediante un ajuste multi-escala
(la escala óptima + 3 adyacentes).

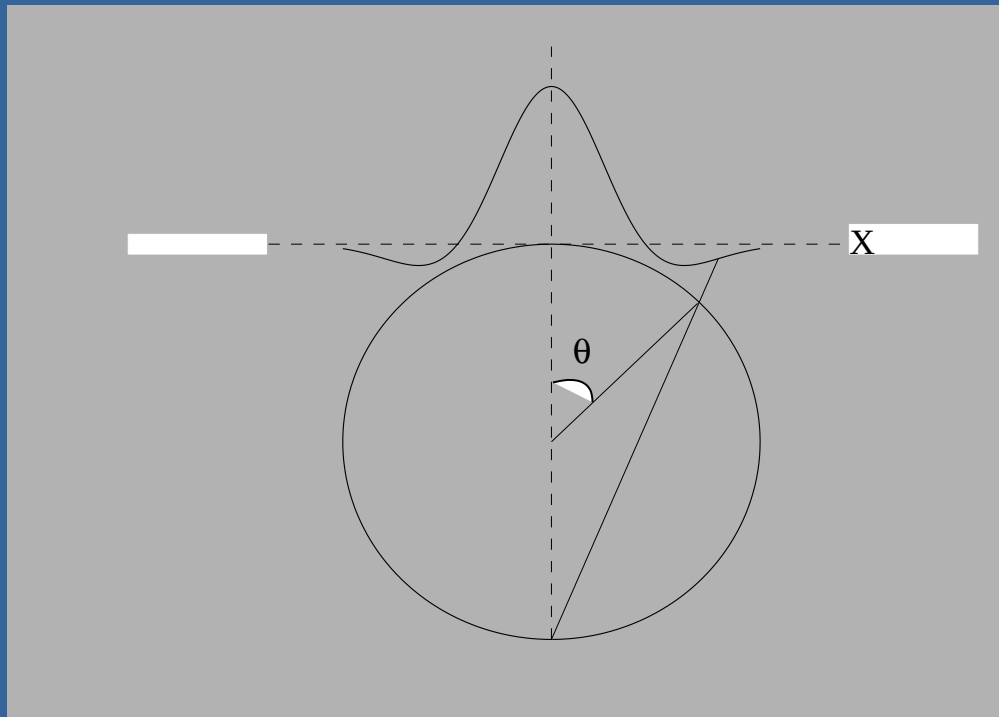
$$\chi_l^2 = \sum_{i,j} \left(w(R_i, \vec{b}_l)^t - w(R_i, \vec{b}_l)^e \right) V_{ij}^{-1} \left(w(R_j, \vec{b}_l)^t - w(R_j, \vec{b}_l)^e \right)$$

$$V_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{N_{pix}} w(R_i, \vec{b}_l)^e w(R_j, \vec{b}_l)^e$$



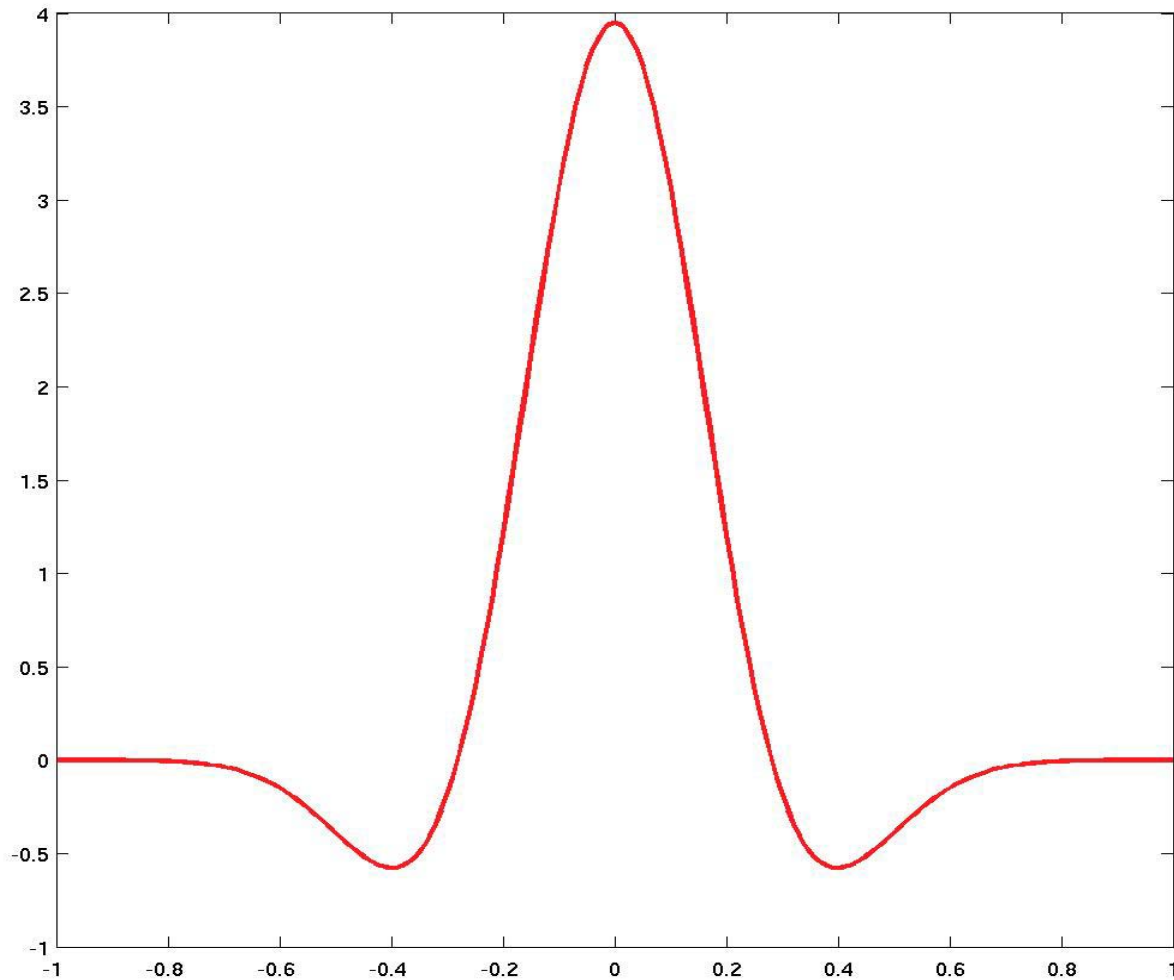
La Ondícula Sombrero Mexicano

La extensión a la esfera de la OSM euclídea se realiza mediante una proyección estereográfica de la OSM al plano tangencial.

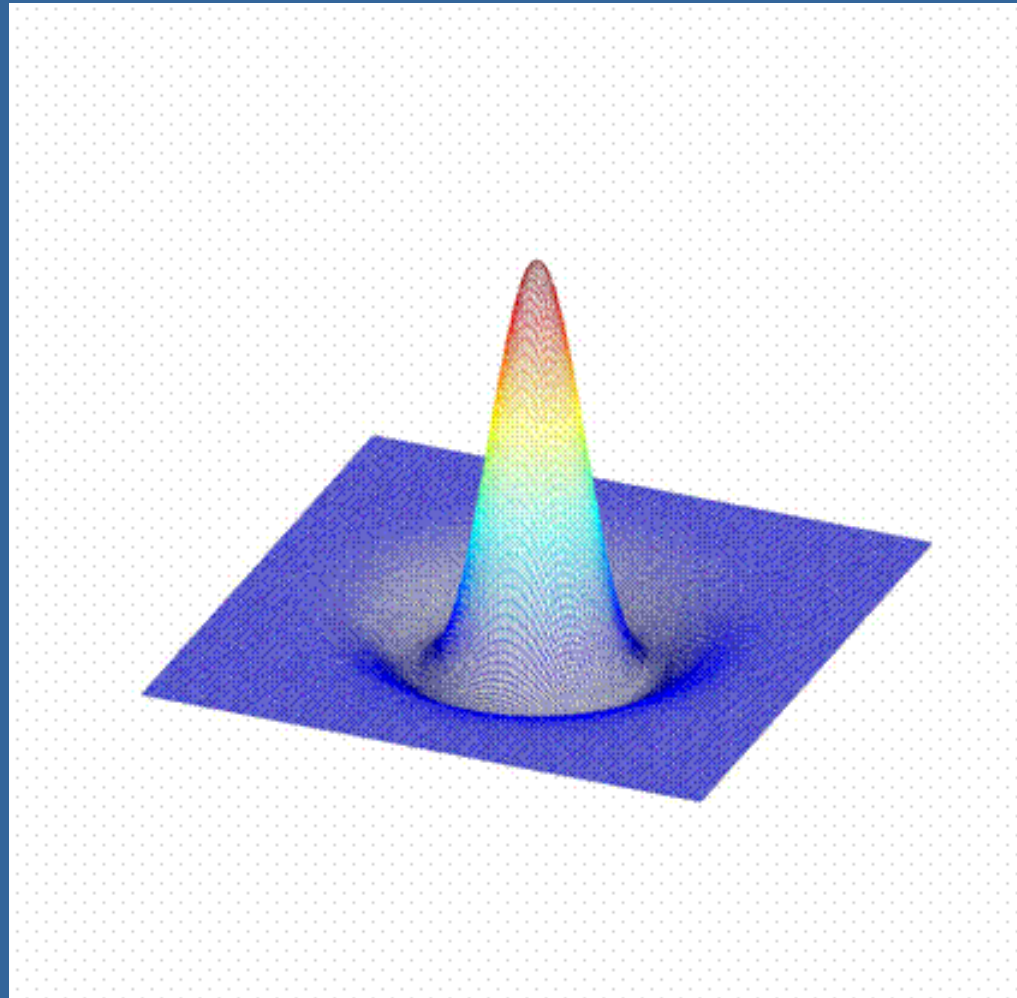




La Ondícula Sombrero Mexicano Esférica (OSME)



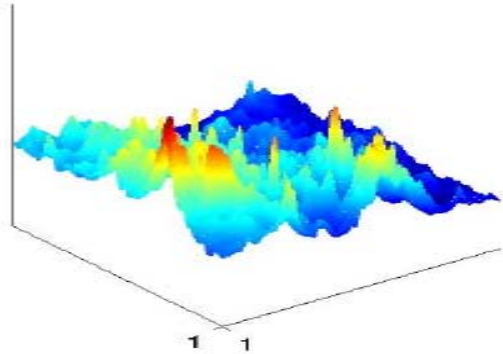
Ondícula Sombrero Mexicano en 3D



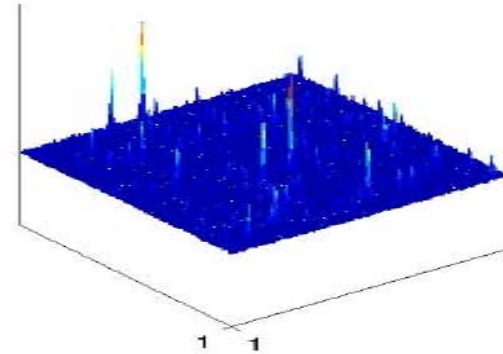


La OSM: aplicación euclídea

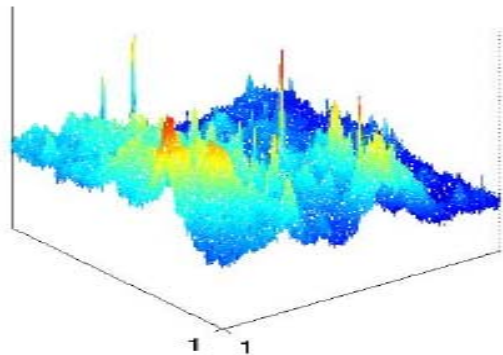
Dust emission



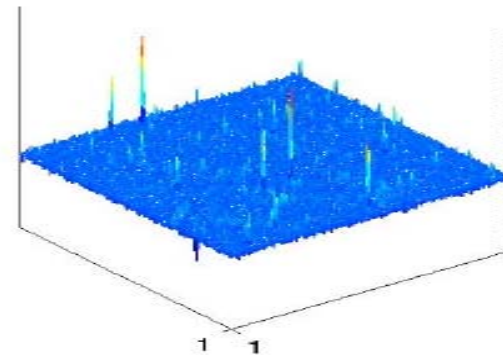
Point Sources emission



Total emission

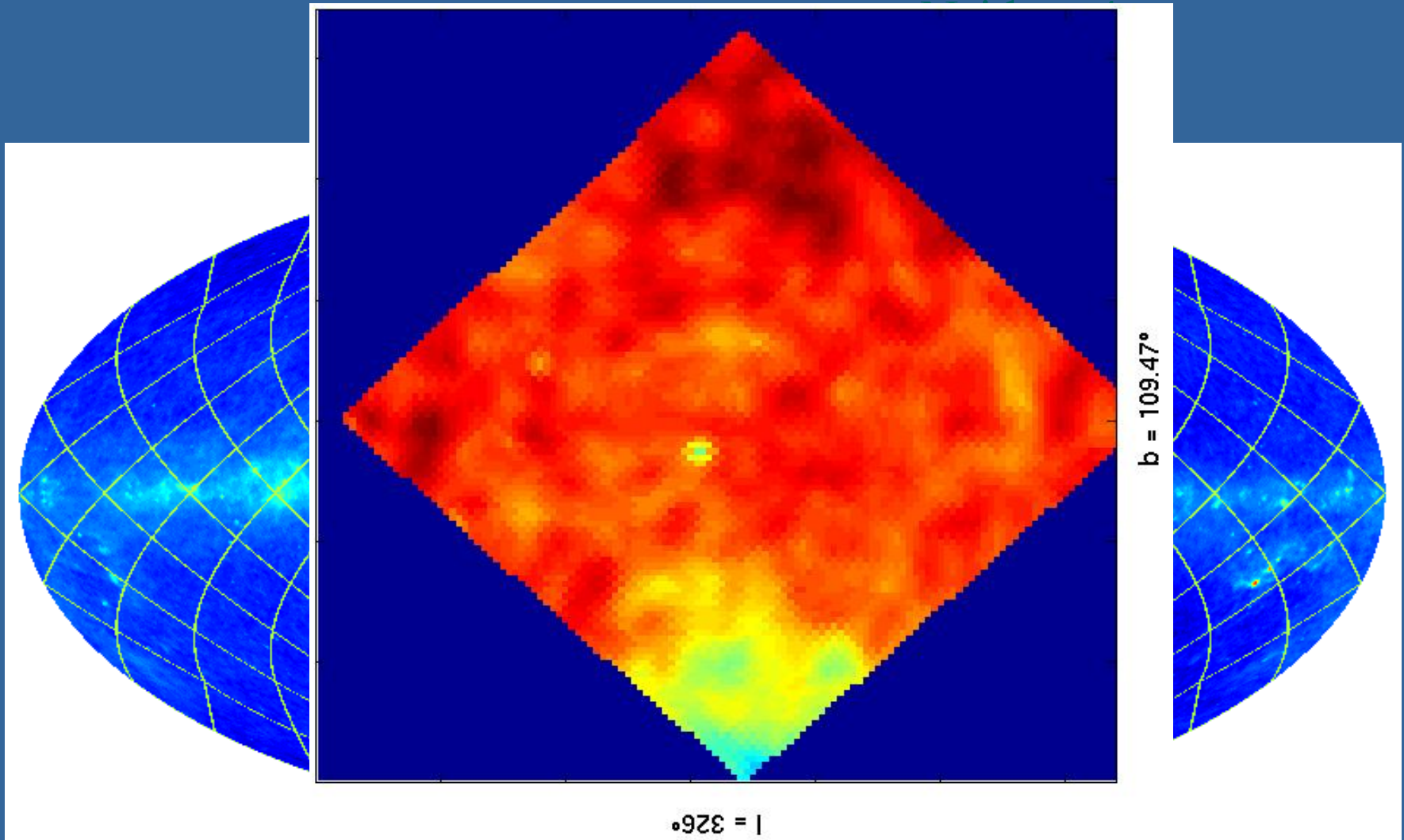


Wavelet Coefficients Map



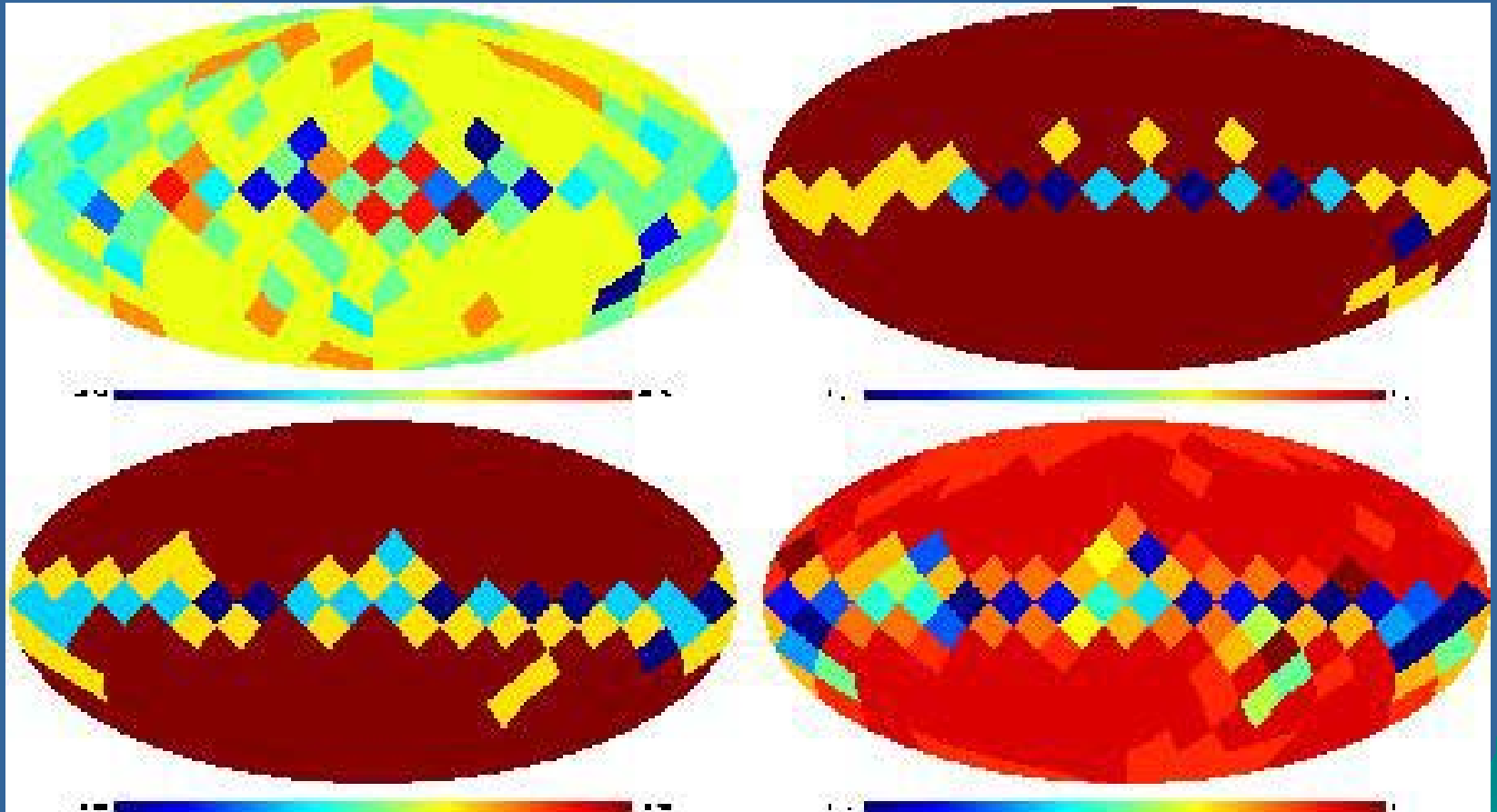


The MHW: Spherical application





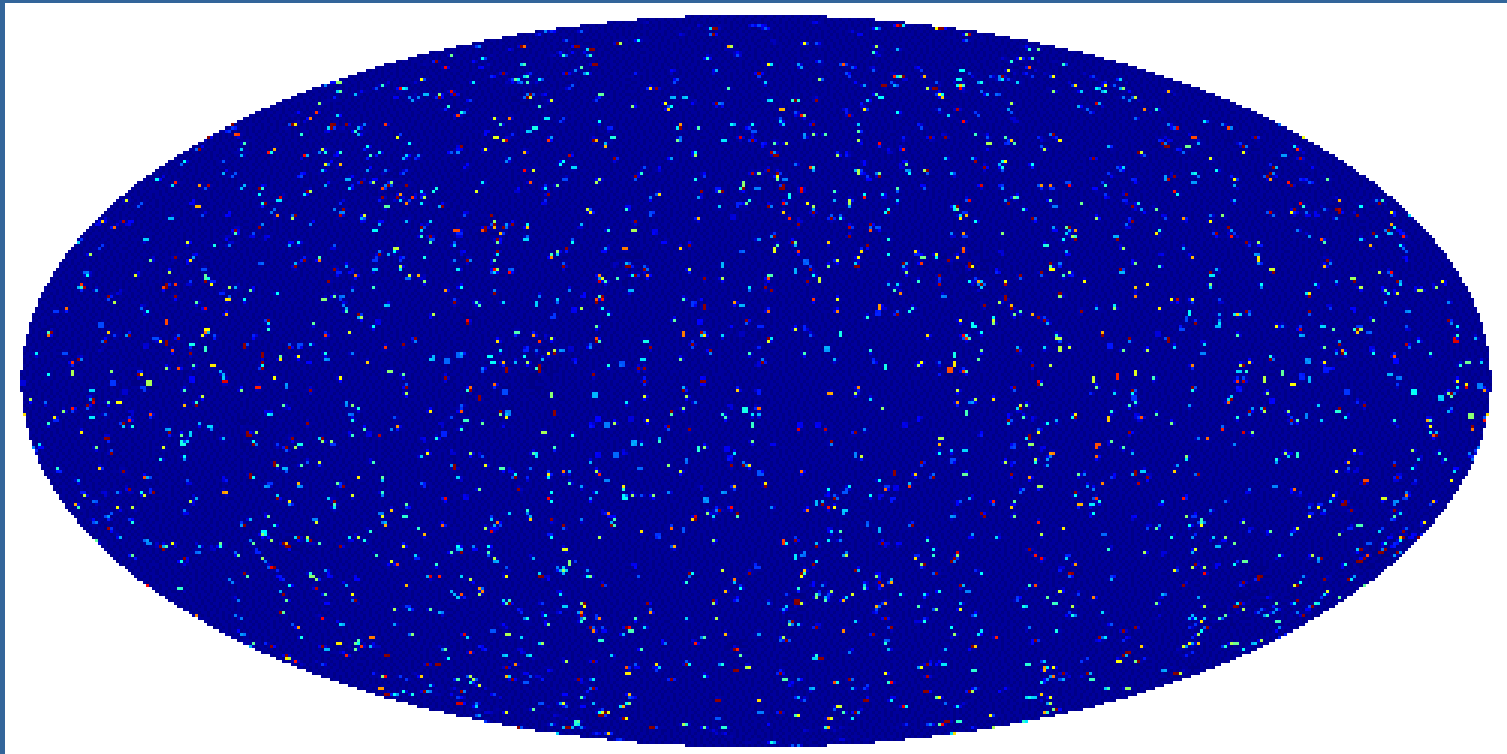
The MHW: Spherical application





La OSME: aplicación esférica

Fuentes puntuales detectadas a 30 GHz



CATÁLOGO DE FUENTES – MISIÓN PLANCK

Frec.	#	Jy	Error (%)	Sesgo (%)	Corte (°)	N _{op}	Comp(%)
857	27257	0.48	17.7	-4.4	25	17	70
545	5201	0.49	18.7	4.0	15	15	75
353	4195	0.18	17.7	1.4	10	10	70
217	2935	0.12	17.0	-2.5	7.5	4	80
143	3444	0.13	17.5	-4.3	2.5	2	90
100	3342	0.16	16.3	-7.0	0	4	85
70	2172	0.24	17.1	-6.7	0	6	80
44	1987	0.25	16.4	-6.4	0	9	85
30	2907	0.21	18.7	1.2	0	7	85

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

*A partnership between
NASA/GSFC and Princeton*

Science Team:

NASA/GSFC

Chuck Bennett (PI)

Michael Greason

Bob Hill

Gary Hinshaw

Al Kogut

Michele Limon

Nils Odegard

Janet Weiland

Ed Wollack

Brown

Greg Tucker

UCLA

Ned Wright

UBC

Mark Halpern

Chicago

Stephan Meyer

Princeton

Chris Barnes

Norm Jarosik

Eiichiro Komatsu

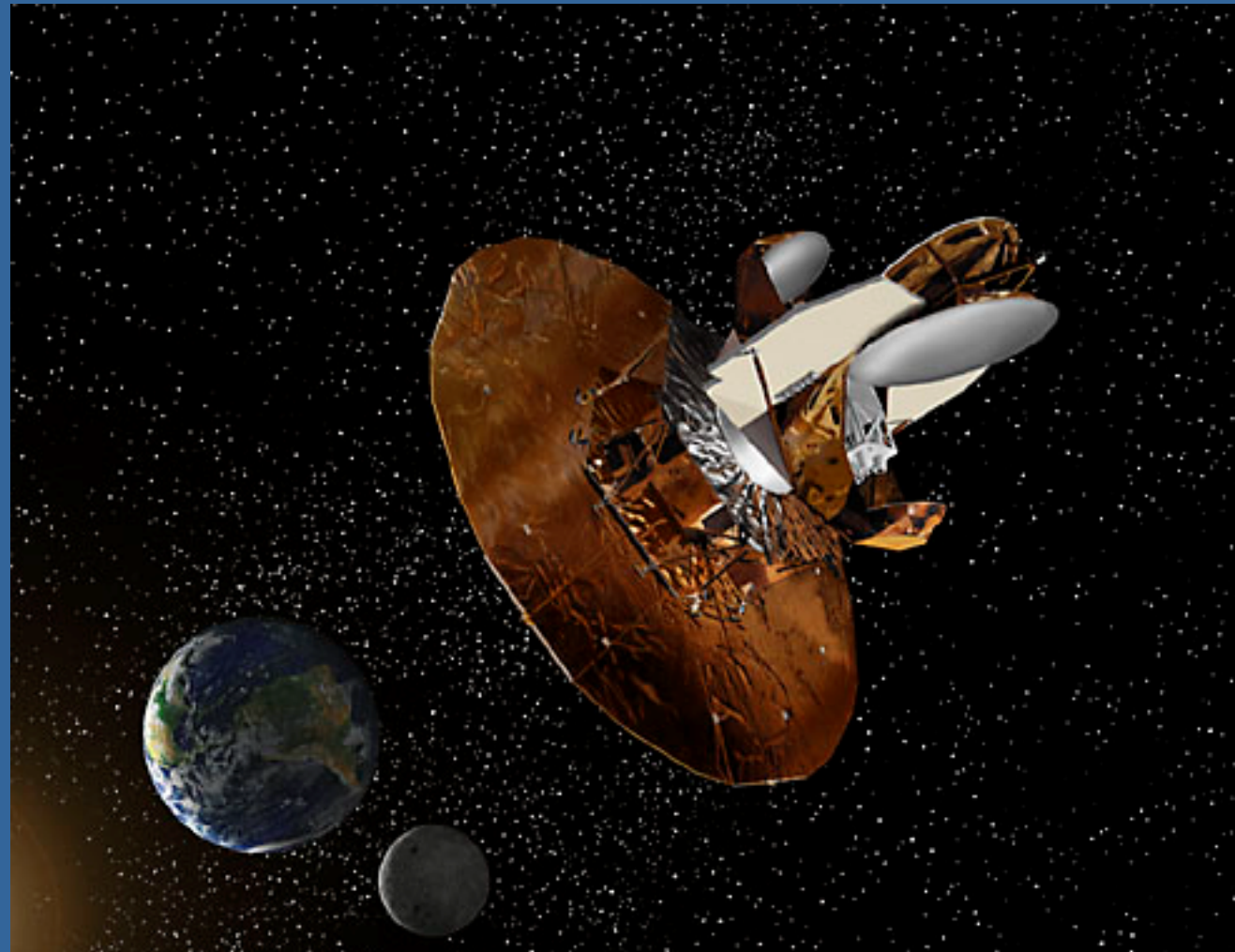
Michael Nolte

Lyman Page

Hiranya Peiris

David Spergel

Licia Verde



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Lanzado el 30 de Junio de 2001

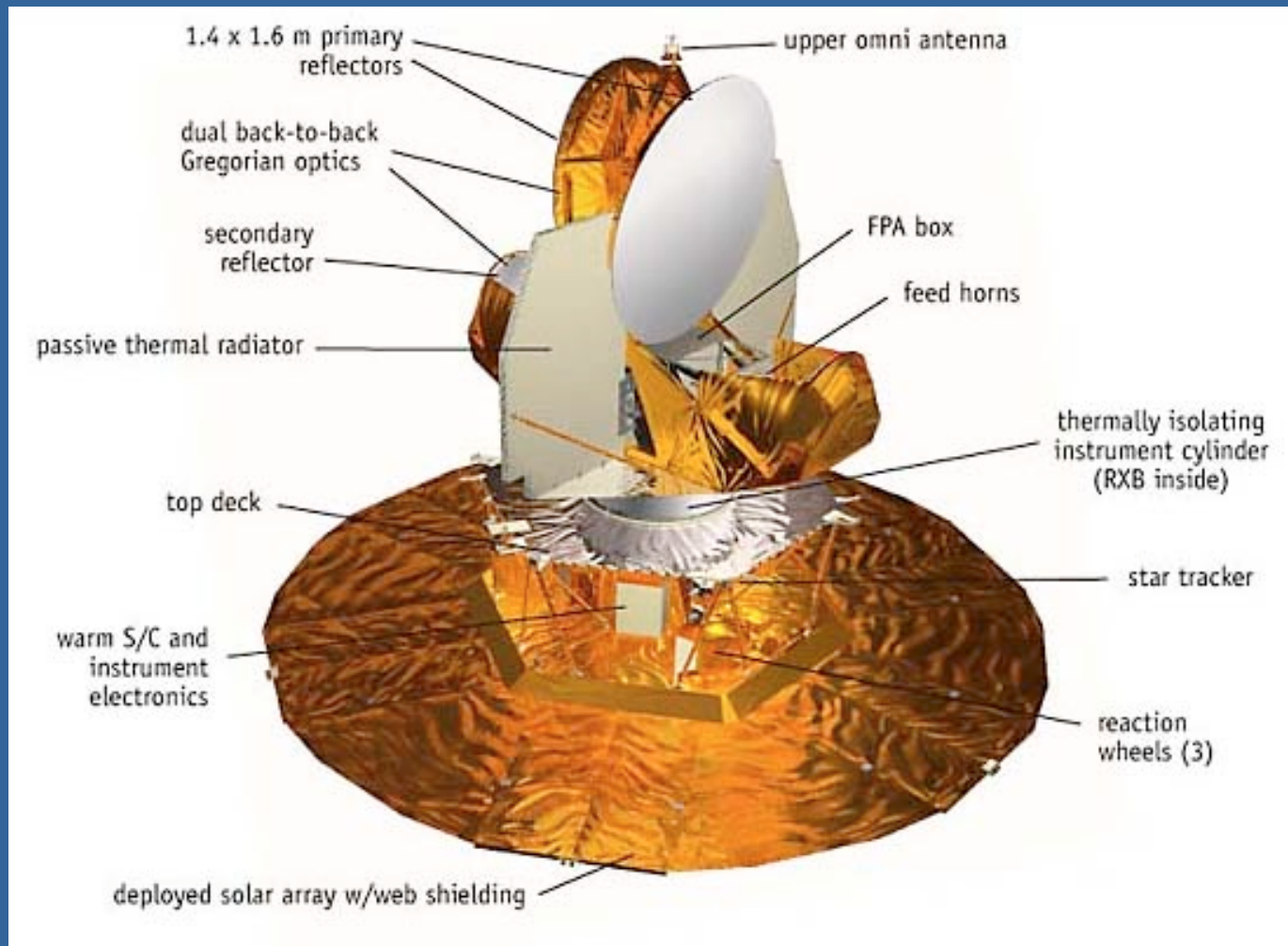


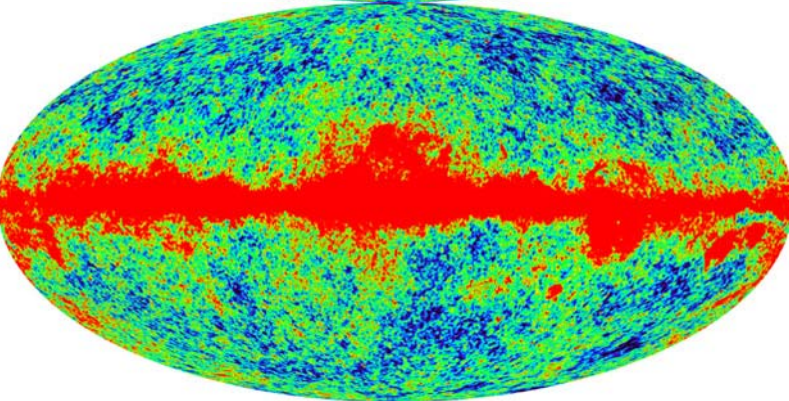
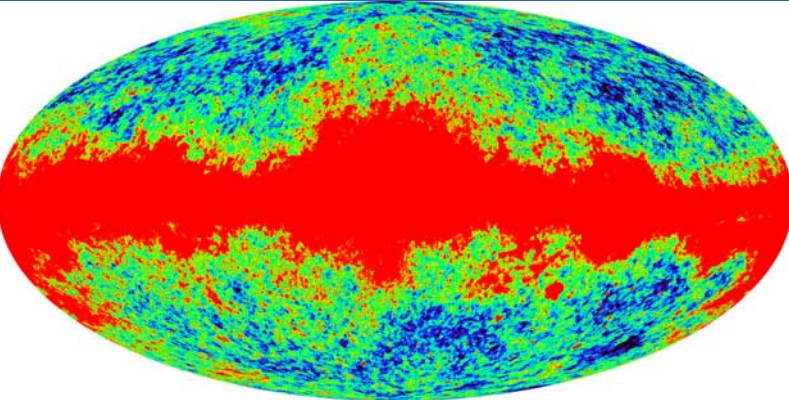
Table 1. Approximate Observational Properties by Band

Item	K-Band	Ka-Band	Q-Band	V-Band	W-Band
Wavelength, λ (mm)	13	9.1	7.3	4.9	3.2
Frequency, ν (GHz)	22.8	33.0	40.7	60.8	93.5
Ant./therm. conversion factor, $\Delta T/\Delta T_A$	1.014	1.029	1.044	1.100	1.251
Noise, σ_0 (mK) $\sigma = \sigma_0 N_{obs}^{-1/2}$	1.424	1.449	2.211	3.112	6.498
Beam width θ (°FWHM)	0.82	0.62	0.49	0.33	0.21
No. of Differencing Assemblies	1	1	2	2	4
No. of Radiometers	2	2	4	4	8
No. of Channels	4	4	8	8	16

WMAP (mapas del 1^{er} año)

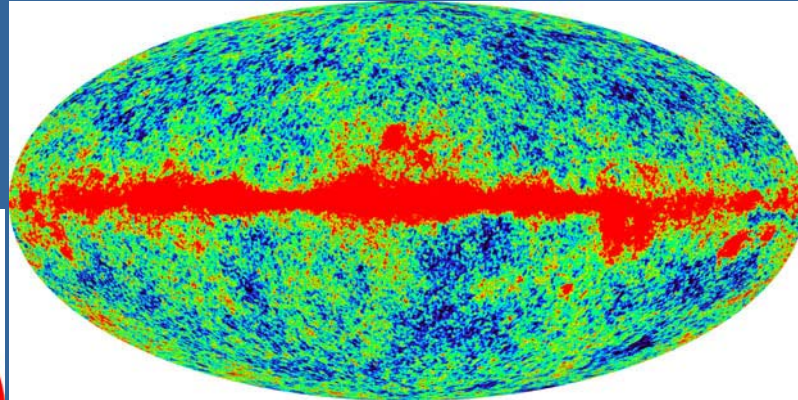
Monitores de la
Emisión Galáctica

Banda-K (23 GHz)

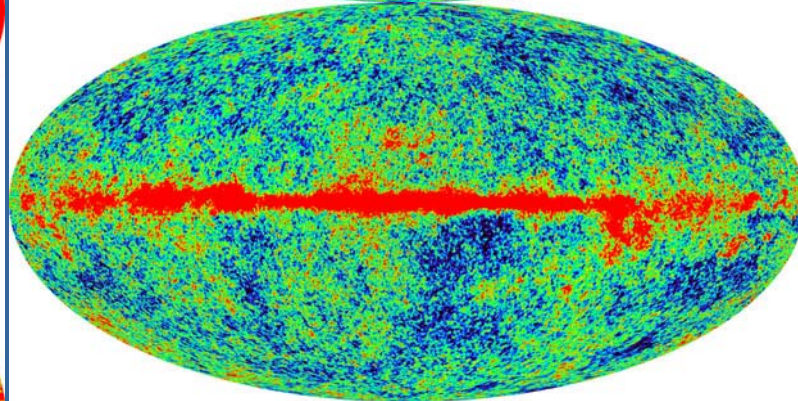


Banda-Ka (33 GHz)

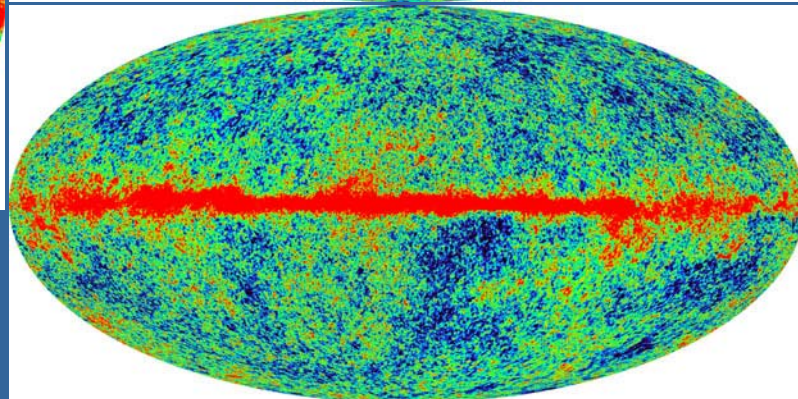
CMB bands



Banda-Q (41 GHz)
2 canales

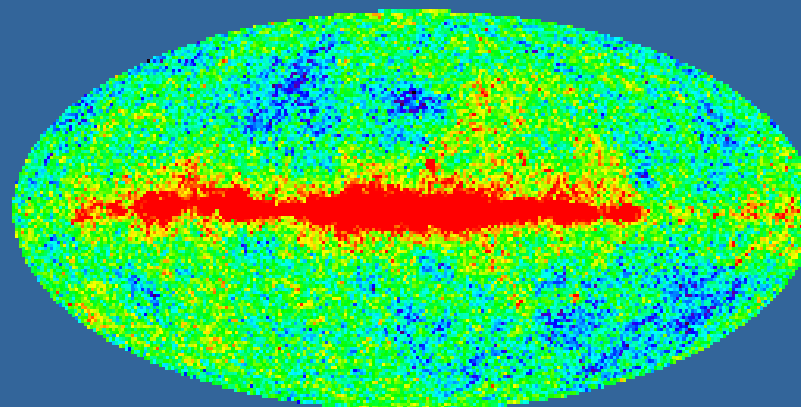


Banda-V (61 GHz)
2 canales



Banda-W (93 GHz)
4 canales

Mapa final de WMAP



Evolución en las medidas de anisotropía

1965



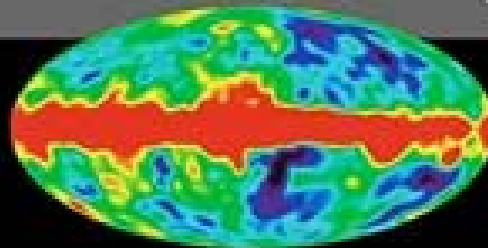
Penzias and
Wilson



← DETECCIÓN DEL FCM

1992

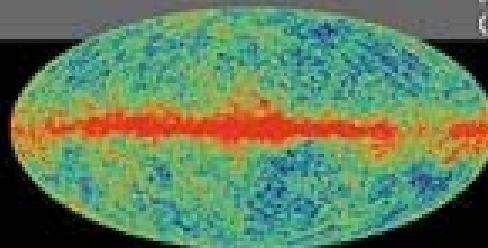
COBE



← DETECCIÓN DE ANISOTROPÍA

2001

MAP
(Simulated)



← PRECISIÓN EN LA ANISOTROPÍA

- Sensitivity $\approx$ 45 times COBE
- Resolution $\approx$ 33 " "

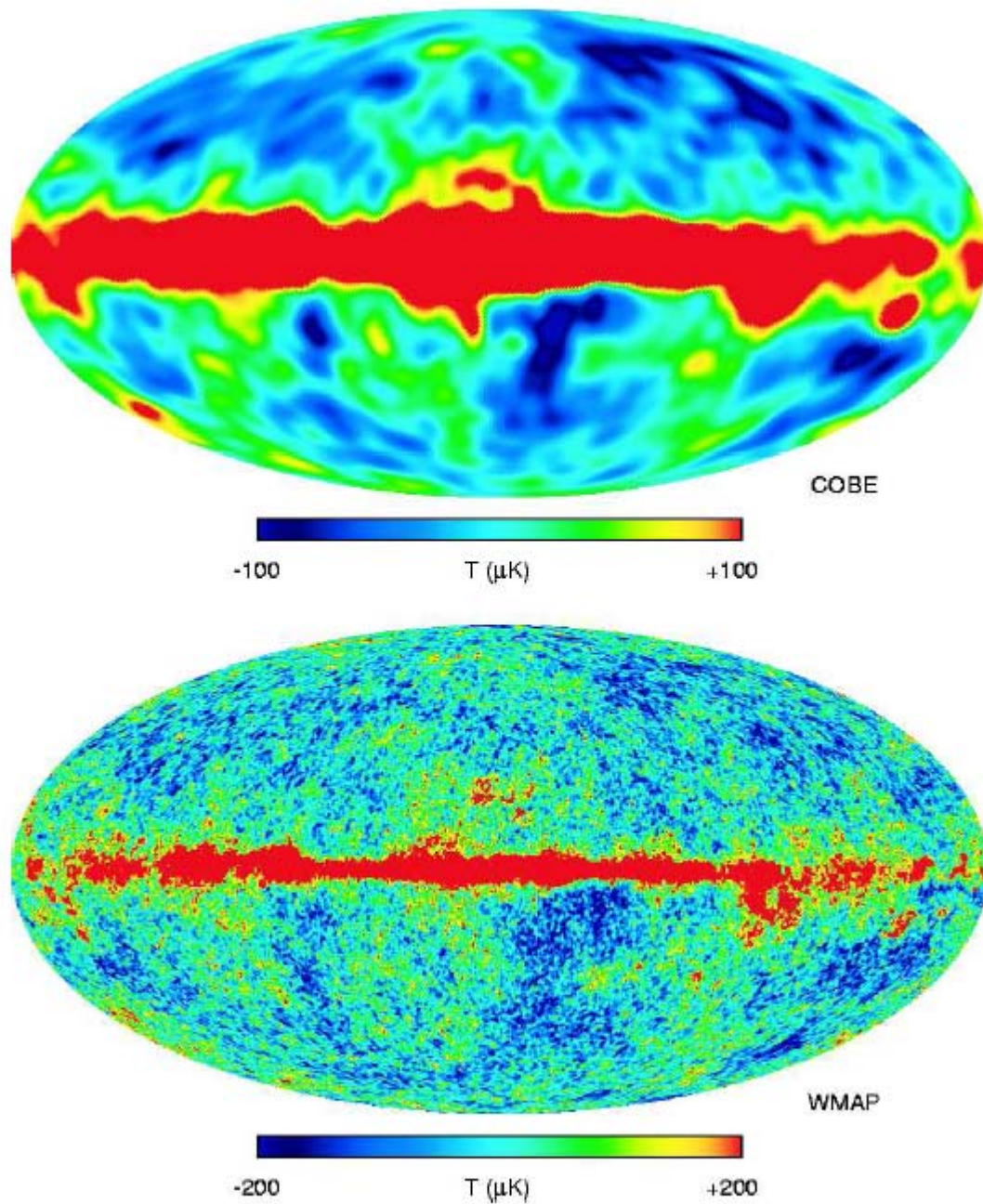
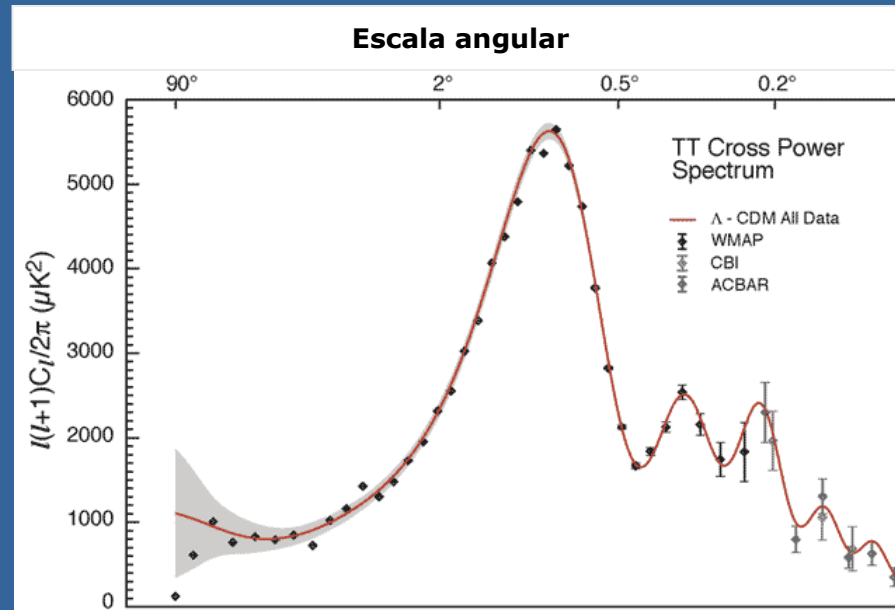


Fig. 7.— A comparison of the *COBE* 53 GHz map (Bennett et al. 1996) with the W-band *WMAP* map. The *WMAP* map has 30 times finer resolution than the *COBE* map.

WMAP C_l (TT, TE)



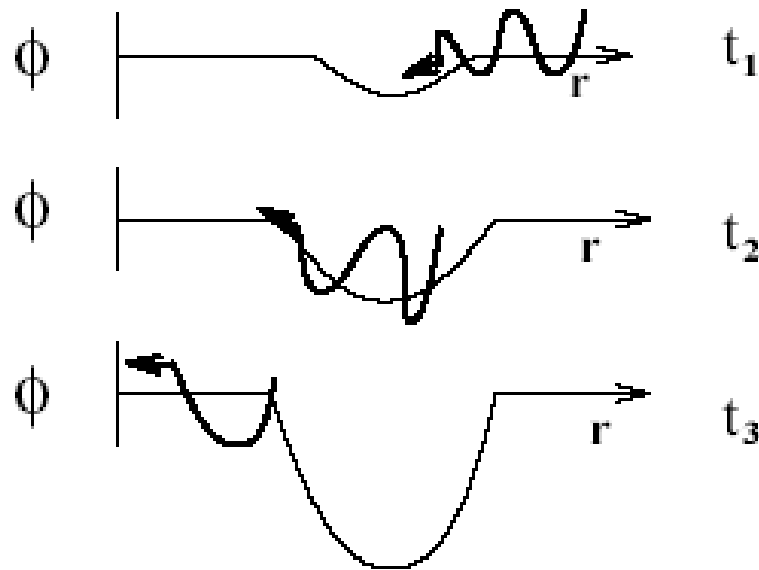
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA



Efecto Sachs-Wolfe Integrado

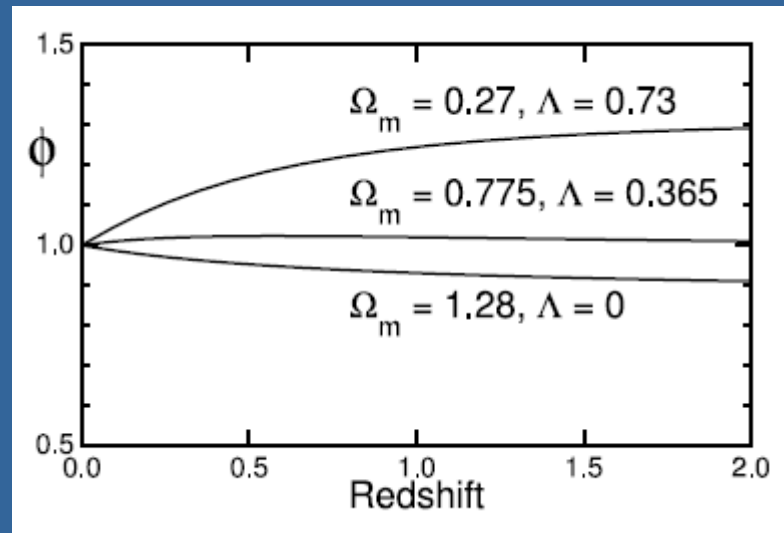
$$\text{SWI: } \int_{t_{\text{dec}}}^{t_0} \dot{\phi}(r, t) dt$$

Efecto Sachs-Wolfe integrado



EL EFECTO SACHS-WOLFE INTEGRADO

- El efecto *Sachs-Wolfe Integrado* (SWI) (Sachs-Wolfe 1967) es debido al redshift gravitatorio que sufren los fotones del FCM cuando cruzan los potenciales gravitatorios que varían con el tiempo debidos a la Estructura a Gran Escala.
- En el modelo Einstein-de Sitter el efecto SWI es cero. Por tanto la detección del efecto implica la existencia de bien *energía oscura* en el caso de un universo plano o bien la existencia de *curvatura espacial*.



(Nolta et al. 2004)

DETECCIONES RECIENTES DEL EFECTO SWI

- El potencial gravitatorio influencia tanto las anisotropías del FCM (efecto SWI) como la distribución de la estructura a gran escala, implicando una cross-correlación no nula entre el FCM y la estructura a gran escala.
- Varios grupos han anunciado detecciones del efecto SWI con diferentes niveles de significación mediante la cross-correlación de **WMAP** con diferentes catálogos de la estructura a gran escala:
 - Boughn & Crittenden (2004): **HEAO-1**, **NVSS** (detección 2-3 σ)
 - Nolta et al. (2004): **NVSS**, detección 3 σ , $\Omega_\Lambda > 0$ (95%)
 - Fosalba and Gaztañaga (2004): **APM**, detección 98.8%
 - Fosalba, Gaztañaga & Castander (2004): **SDSS**, detección 3 σ , $0.69 < \Omega_\Lambda < 0.86$ (2 σ)
 - Afshordi et al. (2004): **2MASS**, detección 2.5 σ
 - Vielva, M-G, Tucci (2004): **NVSS** usando SMHW, detección **>3.7 σ**

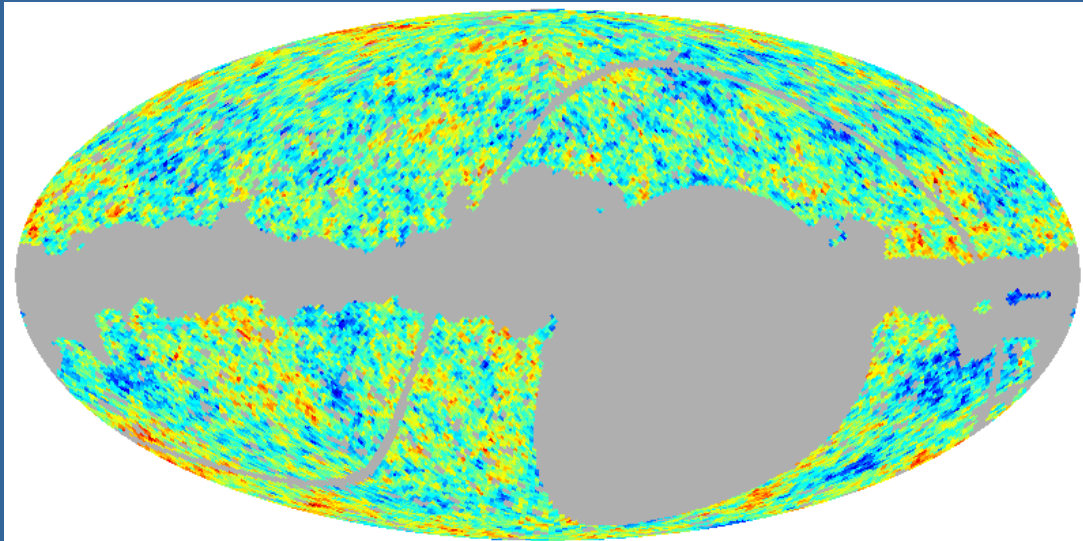
$$C_{ov}^{theo}_{W-N}(R) = \sum_{\ell} \frac{2\ell + 1}{4\pi} C_{\ell M}(R)$$

$$C_{\ell M}(R) = (p_{\ell})^2 (s_{\ell}(R))^2 b_{W\ell} b_{N\ell} C_{\ell W-N}$$

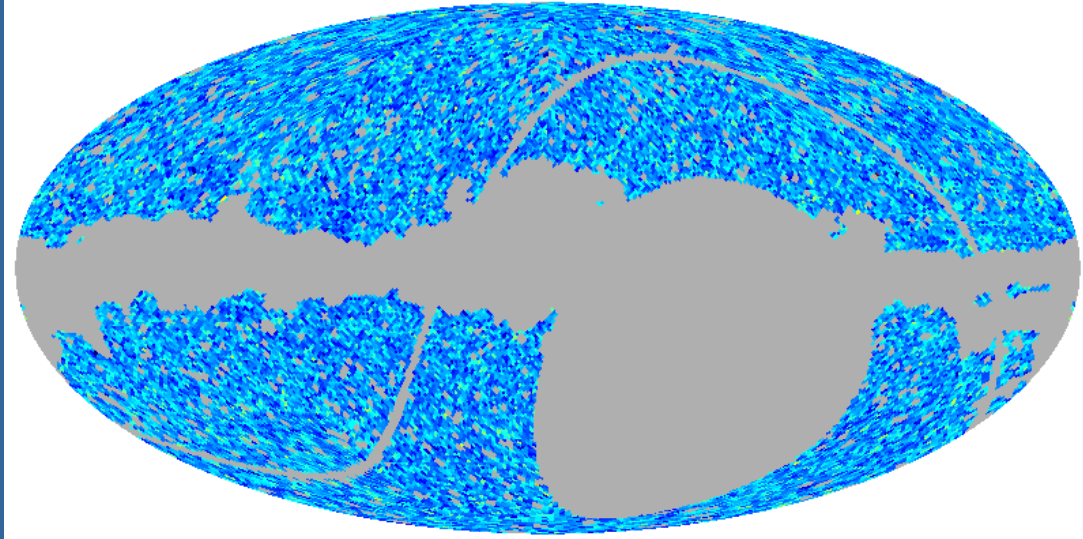
$$C_{\ell W-N} = 12\pi\Omega_m H_o^2 \int \frac{dk}{k^3} \Delta_{\delta}^2(k) F_{\ell}^W(k) F_{\ell}^N(k),$$

$$\begin{aligned} F_{\ell}^W(k) &= \int dz \frac{dg}{dz} j_{\ell}(k\eta(z)) \\ F_{\ell}^N(k) &= b \int dz \frac{dN}{dz} D(z) j_{\ell}(k\eta(z)) \end{aligned}$$

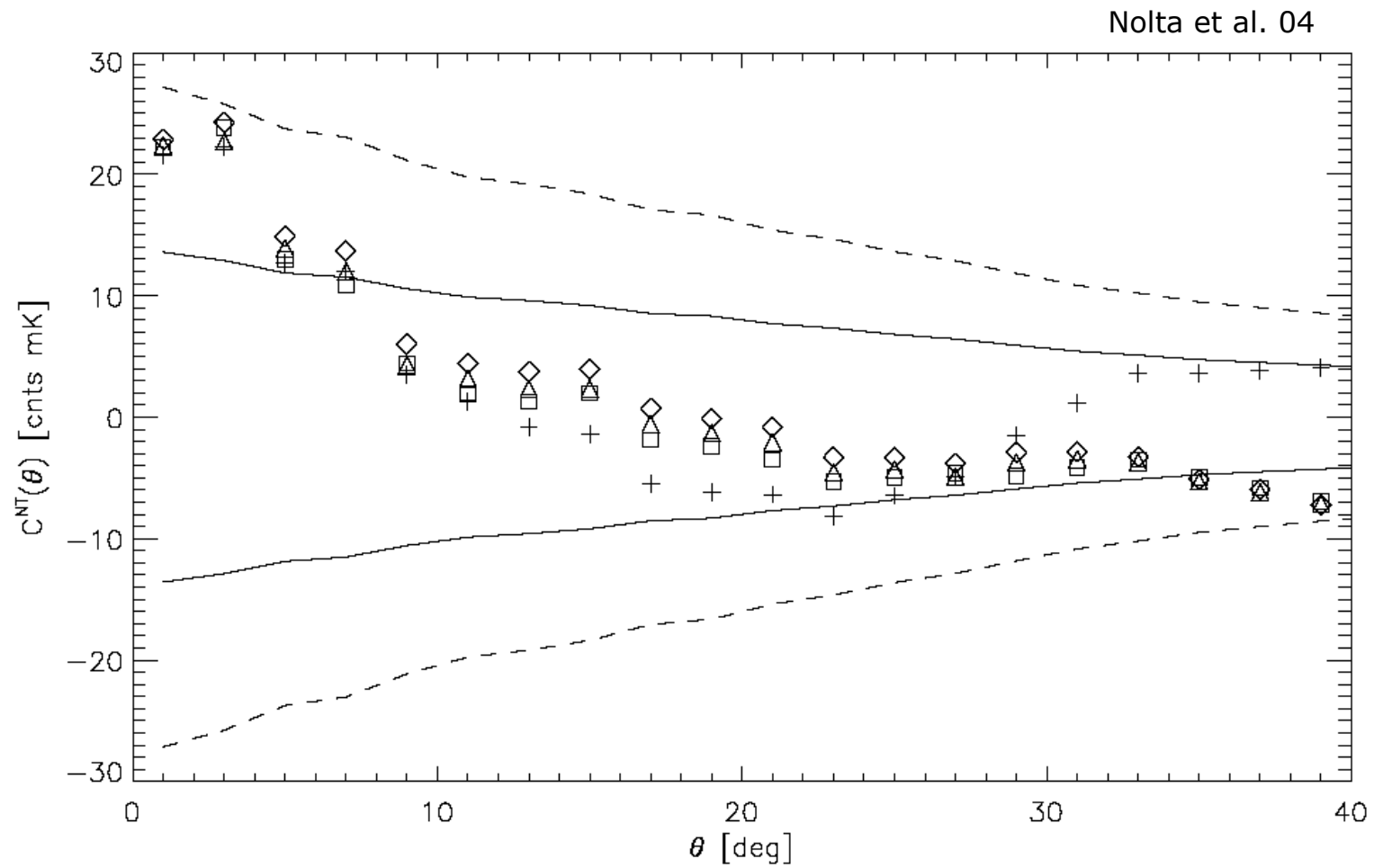
WMAP

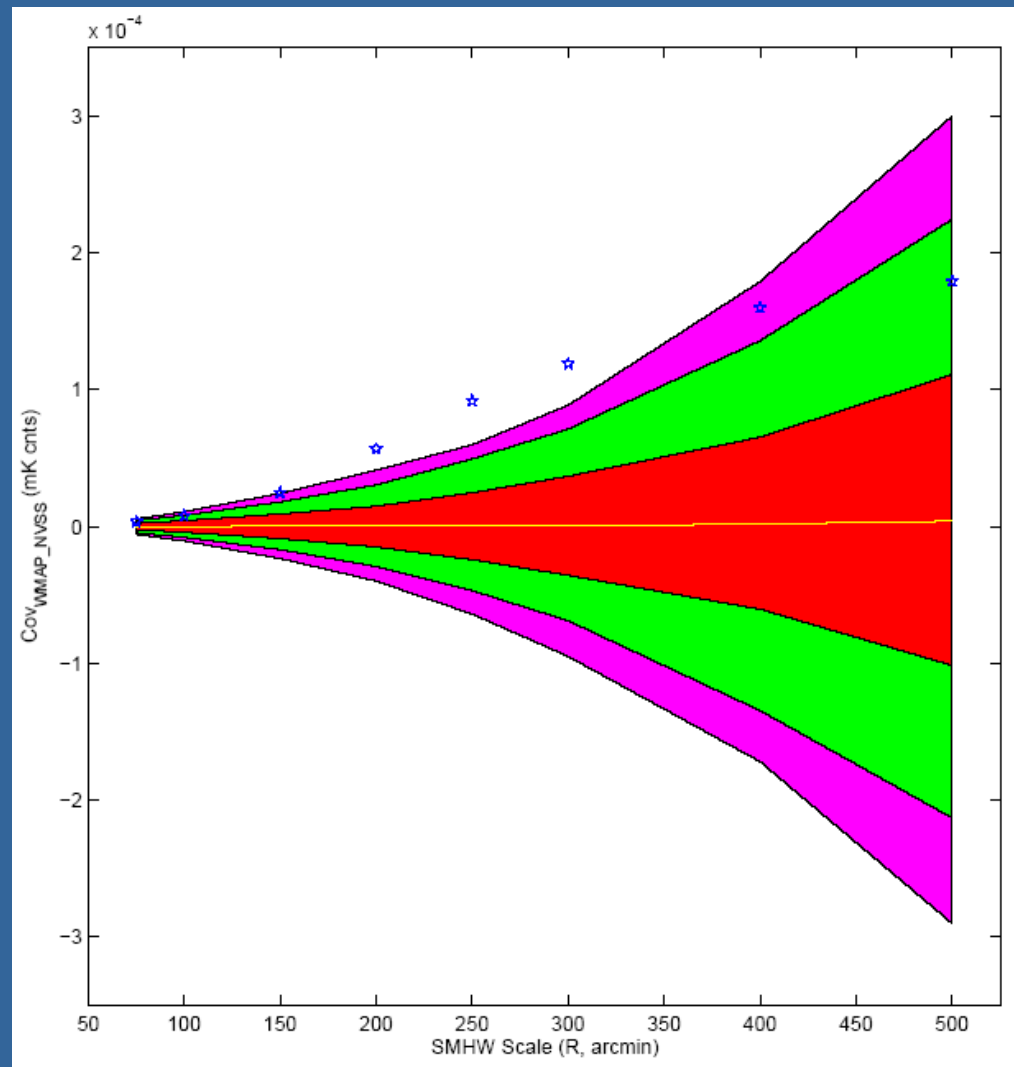


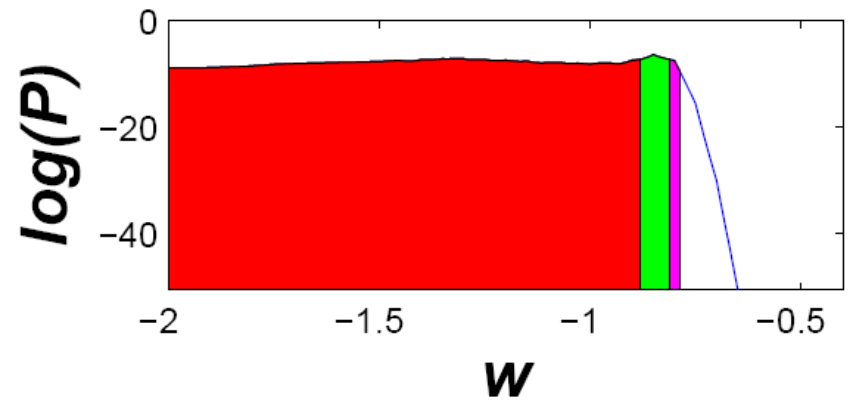
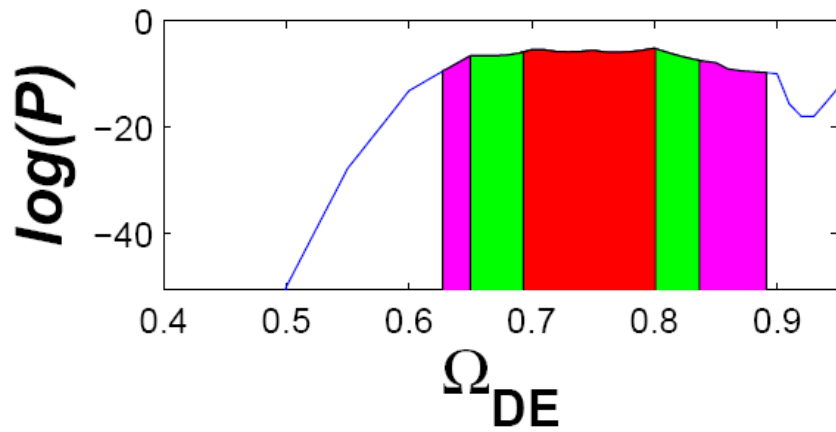
NVSS



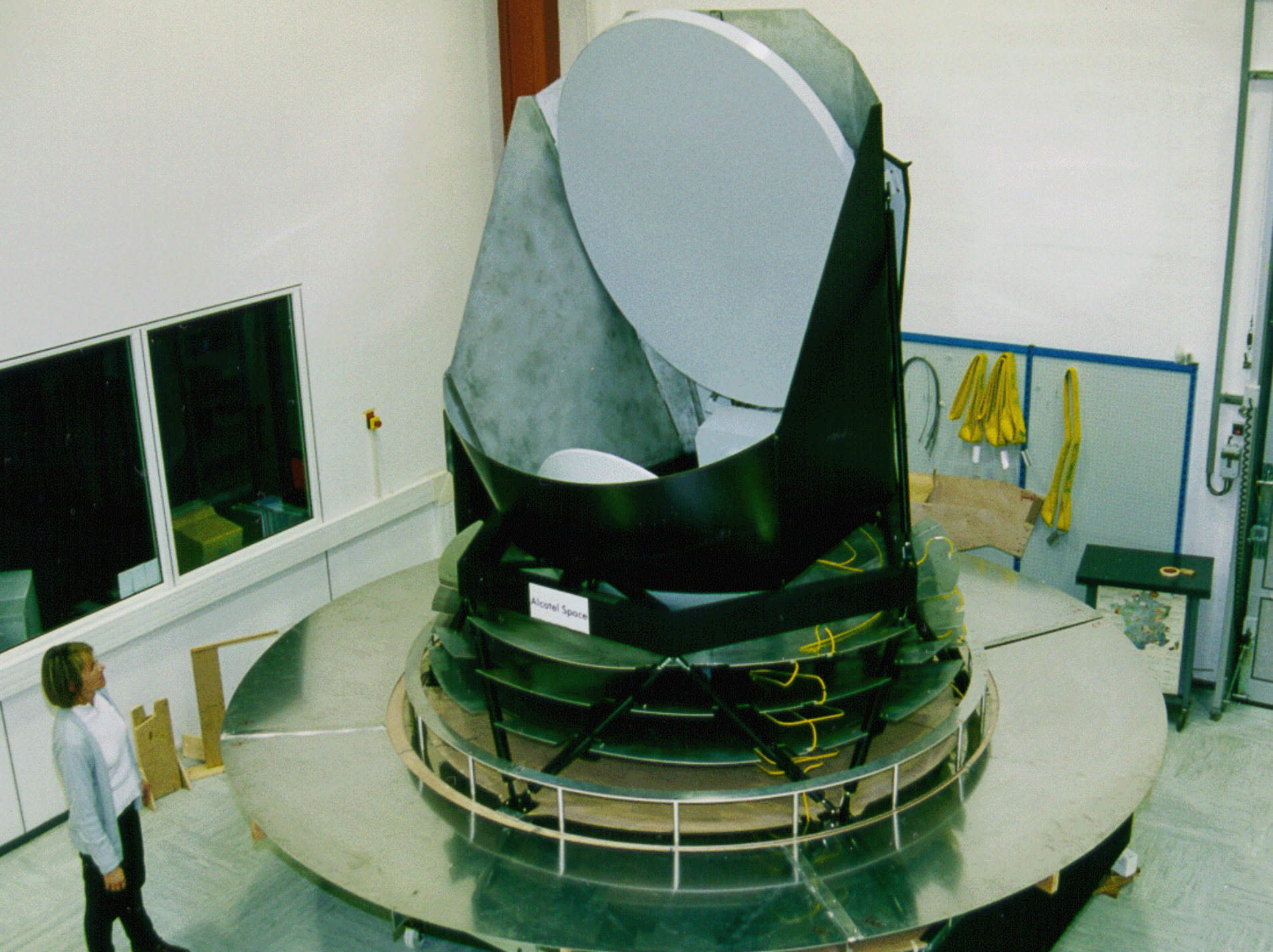
CORRELACIÓN WMAP-NVSS







$$0.69 < \Omega_{DE} < 0.86, w < -0.81 \ (2\sigma)$$



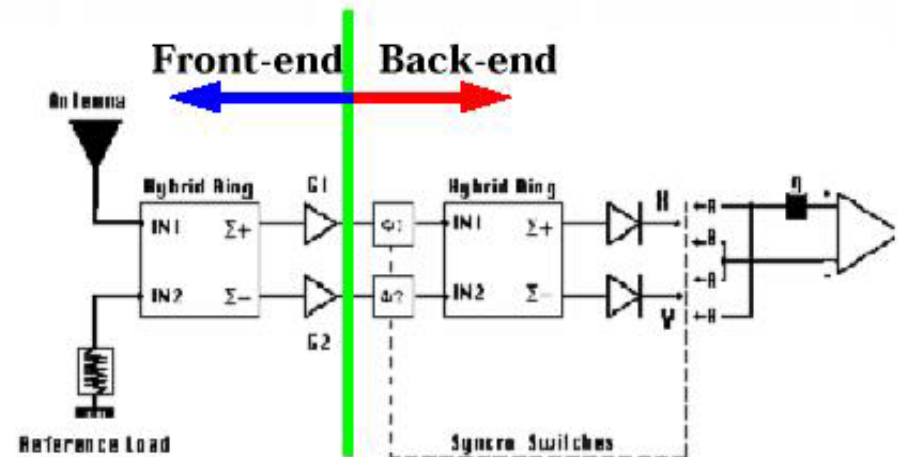
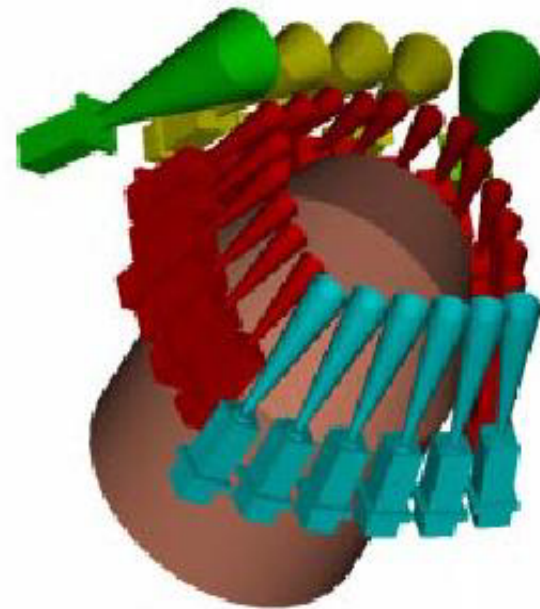
Alcatel Space

La misión Planck

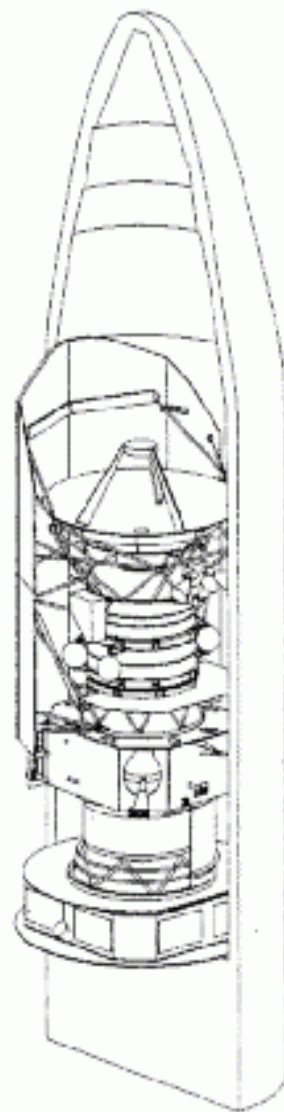
- Misión de tipo medio del programa científico de la ESA
- Su objetivo es medir la intensidad de la radiación cósmica en todo el cielo con una alta resolución y sensibilidad
- Fecha prevista de lanzamiento: 2007
- Carga útil: 2 instrumentos y telescopio
- Un consorcio internacional es responsable de cada instrumento:
 - Instrumento de Baja Frecuencia (LFI)
 - Instrumento de Alta Frecuencia (HFI)
- La participación española se centra en el LFI

Low Frequency Instrument

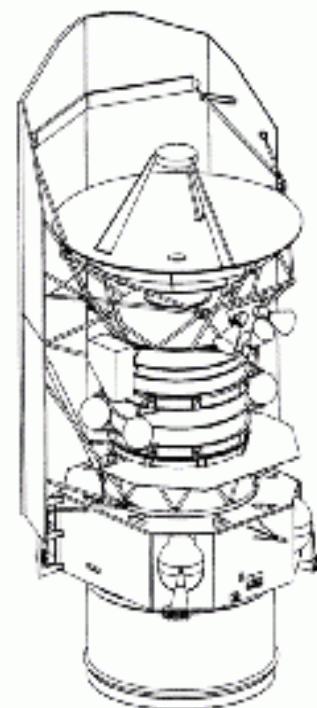
- Freq.: 30 -100 GHz
- Techn.: HEMT correlation receivers (56)
- Temp.: 20 K (Front-end), 300 K (Back-end)
- Ang. res.: 10' (100 GHz) to 33' (30 GHz)
- Best Temp. sens.: 12 μ K (100 GHz)
- PI: N. Mandolesi (CNR - Bologna)



**Launch
configuration**



FIRST



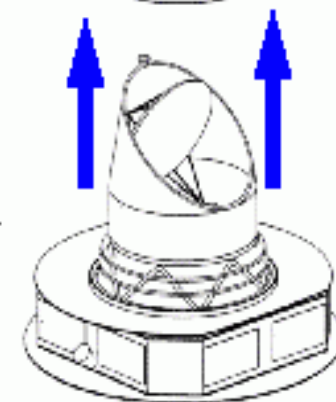
Telescope

Cryostat

SVM

Adapter

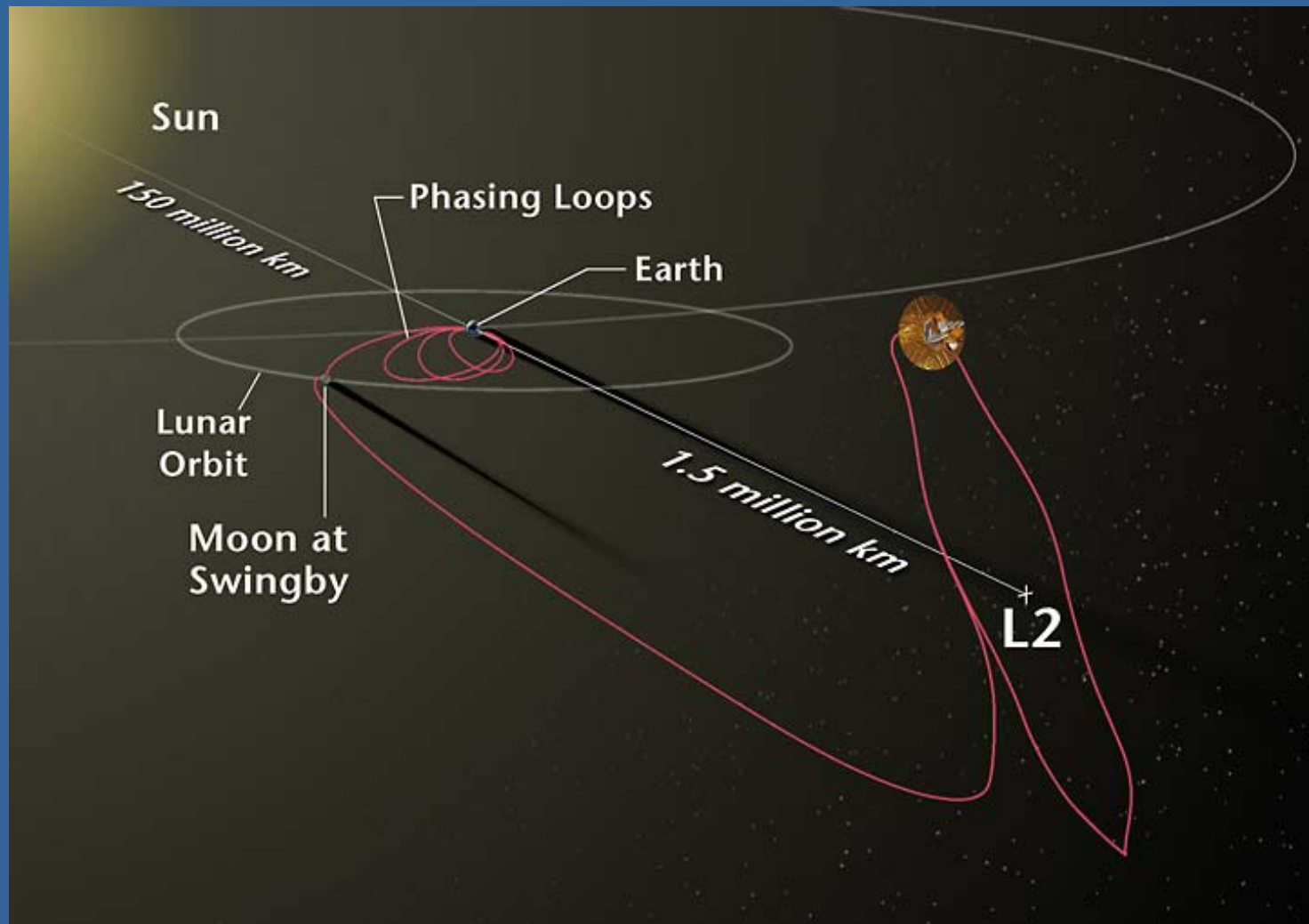
Planck



Payload
Module

SVM

Punto Lagrangiano L2



PROBLEMAS PENDIENTES

- Naturaleza de la materia oscura
- Origen de la energía de vacío
- ¿Por qué las densidades de energía de bariones, materia oscura fría y energía de vacío son tan parecidas en el presente?
- Falta una teoría de partículas que de cuenta de los procesos físicos en el universo temprano