

Lezione Fermi 28

Luciano Maiani, AA 14-15

Le fluttuazioni del Fondo Cosmico di Microonde

Italo Calvino. *Tutto in un punto*. Le Cosmicomiche. Einaudi (1965).

Attraverso i calcoli iniziati da Edwin P. Hubble sulla velocità d'allontanamento delle galassie, si può stabilire il momento in cui tutta la materia dell'universo era concentrata in un punto solo, prima di cominciare a espandersi nello spazio.

Si capisce che si stava tutti lì, - fece il vecchio *Qfwfq*, - e dove, altrimenti? Che ci potesse essere lo spazio, nessuno ancora lo sapeva. E il tempo, idem: cosa volete che ce ne facessimo, del tempo, stando lì pigiati come acciughe?

Sommario

1. Creazione spontanea e Big-Bang
2. Le anisotropie del CMB
3. COsmic Background Observer (COBE): misure di precisione da satellite
4. Lo spettro di potenza delle anisotropie
5. BOOMERANG: l'Universo e' piatto
6. L'era dei satelliti: WMAP-NASA
7. PLANCK-ESA

1. Creazione spontanea e Big-Bang

- Fino agli anni sessanta, la teoria piu' accreditata sull'Universo era quella della “creazione continua”
- Mentre le galassie si allontanano, nuova materia viene “creata” nello spazio, che riempie i vuoti, in modo che, in media, l'Universo sia sempre uguale (H. Alfven, Fred Hoyle, Dennis Sciama e altri).
- La scoperta (Penzias e Wilson, 1974) del fondo cosmico di microonde e la sua interpretazione come residuo del “fuoco iniziale” ipotizzato molto prima da Alpher e Gamow, insieme al dato sull'abbondanza di ^4He primordiale intorno al 25%, altra previsione delle nucleosintesi primordiale, riportò il Big Bang al centro dell'attenzione.
- La creazione spontanea, e con essa l'idea di un Universo “stazionario”, resto' comunque presente in qualche forma, vista anche le difficoltà concettuali della singolarita' iniziale (cosa c'era “prima” del Big-Bang ?)
- Da un punto di vista piu' pragmatico, inizio' negli anni settanta la ricerca delle “fluttuazioni” del CMB, deviazioni dalla perfetta isotropia, con una dipendenza dalla direzione della temperatura del CMB. Nome generico: anisotropie del CMB.

2. Le anisotropie del CMB

- I fotoni del CMB provengono da tutte le direzioni
- sono stati emessi da una superficie posta a circa 14 Miliardi di anni luce, circa 400.000 anni dopo il Big Bang: la superficie dell'ultima diffusione (Last Scattering Surface, LSS), quando, dopo la ricombinazione di elettroni e nuclei (protoni, Elio, etc.) a formare atomi neutri, l'Universo è diventato trasparente alla luce.
- [si dovrebbe dire “combinazione” perché elettroni e protoni non si erano mai parlati prima, ma il termine è ormai in uso. La superficie dell'ultima diffusione ha in realtà uno spessore (misurato in circa 150.000 anni): la ricombinazione prende un certo tempo durante il quale i fotoni hanno probabilità non nulla di interagire di nuovo e l'Universo è trasparente solo in parte.]
- la LSS presenta variazioni di temperatura tra differenti direzioni di osservazione, dovute ad effetti contrastanti:
 - fluttuazioni di densità causano addensamenti gravitazionali (cfr. Lez. 15, Massa di Jeans), contrastati dalla pressione della radiazione che tende a cancellarli
 - la radiazione dalle zone a maggiore densità è spostata verso il rosso (effetto Einstein) e la CMB ha temperatura inferiore, la radiazione dalle zone a densità minore è spostata verso il blu, la CMB temperatura superiore
 - la dinamica delle fluttuazioni è quella delle onde acustiche
 - i barioni “seguono” la luce: se solo materia barionica, $\Delta T/T \approx 10^{-3} - 10^{-4}$, la DM non segue la luce e dà un fondo costante, $\Delta T/T \approx 10^{-5} - 10^{-6}$

anisotropie (continua)

- Le anisotropie del CMB sono i semi delle strutture che vediamo nell'Universo: galassie, ammassi di galassie, superammassi di galassie
- per osservare le anisotropie occorre andare fuori dell'atmosfera (eliminando segnali spuri dovuti alle fluttuazioni dell'atmosfera stessa): primi tentativi con esperimenti su palloni
- ed occorre eliminare
 - la anisotropia di dipolo, dovuta allo spostamento Doppler causato dal moto della Terra e del Sistema Solare rispetto al substrato degli osservatori tipici in quiete rispetto al CMB (cfr. Lez. 20);
 - le anisotropie dovute all'emissione di microonde da Terra, Sole e dalla Galassia.
- Fino a tutti gli anni ottanta non si sono osservate evidenze di anisotropia, solo limiti superiori: $\Delta T/T < 10^{-4}$ (in Italia, esperimenti de gruppo di Francesco Melchiorri, a Firenze e poi a Roma, e a seguire di Paolo de Bernardis a Roma).
- Il primo esperimento che e' riuscito a rivelare le anisotropie, a livello di $\Delta T \approx 10 \mu\text{K}$, $\Delta T/T \approx 10^{-5}$, e' stato l'esperimento da satellite COBE (COsmic Background Explorer) guidato da George Smoot e John Mather (Premi Nobel 2006), che ha aperto la strada alla Cosmologia di Precisione.

3. COBE: misure di precisione da satellite

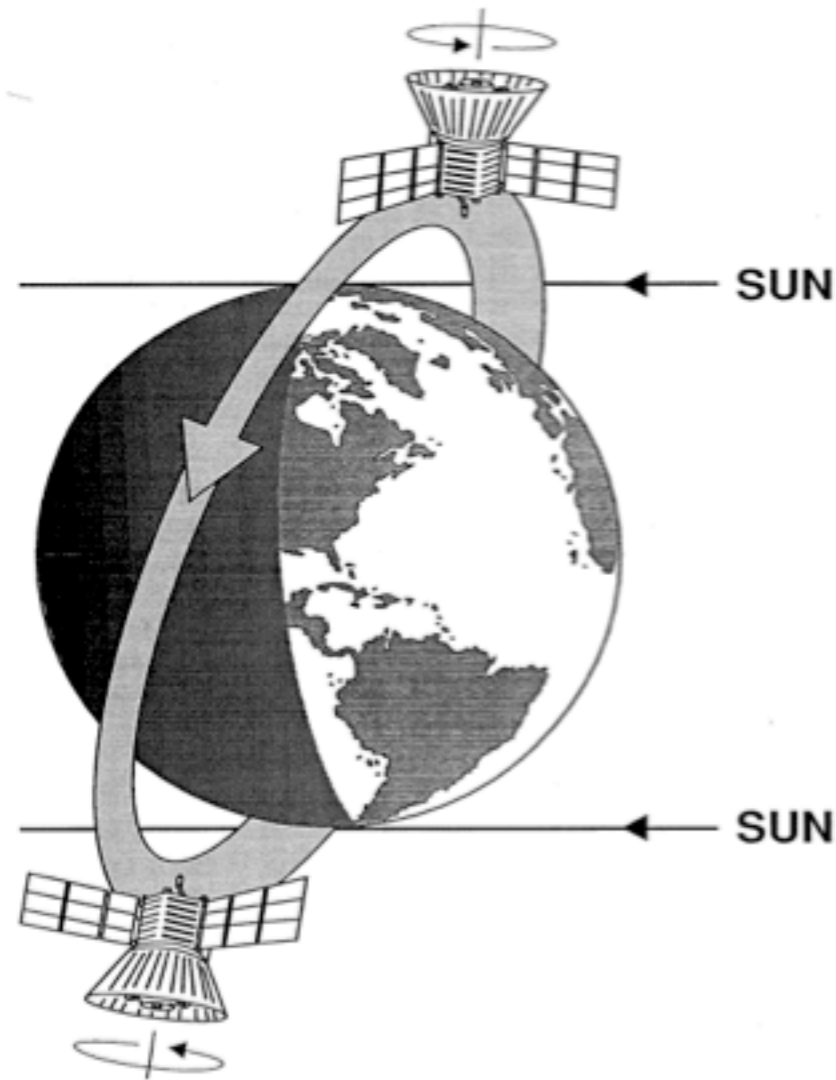
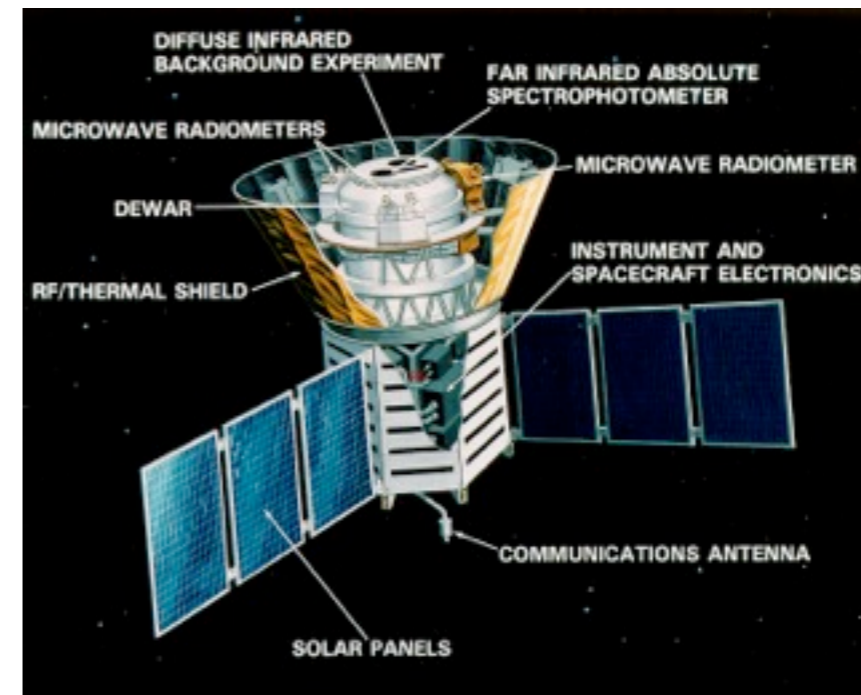


Fig. 1. Schematic view of COBE in orbit around the earth. The altitude at insertion was 900 km. The axis of rotation is at approximately 90° with respect to the direction to the sun. From Bogges et al. 1992.



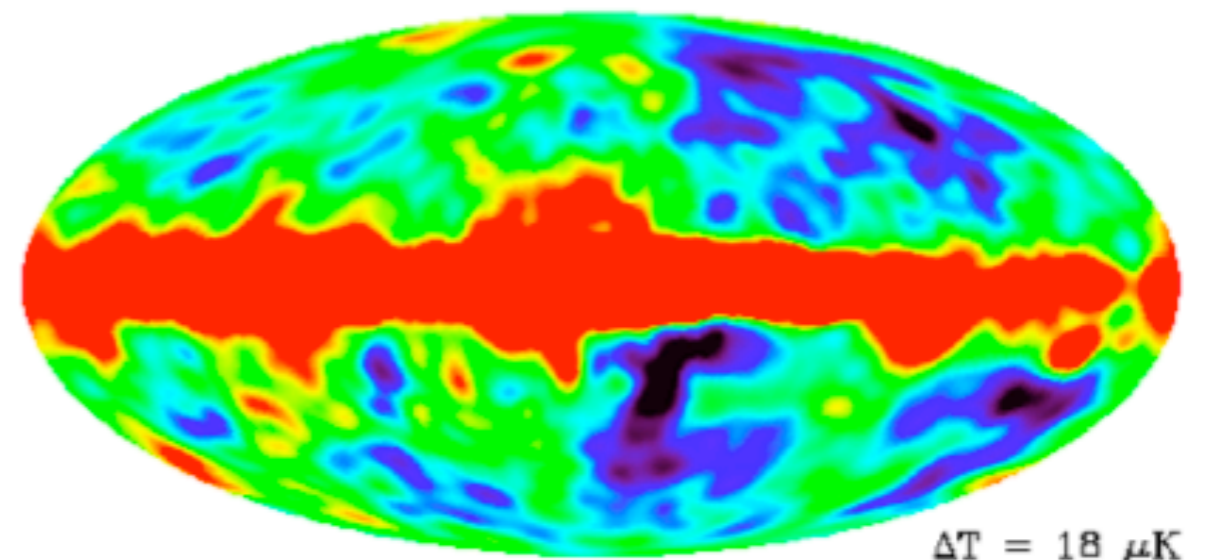
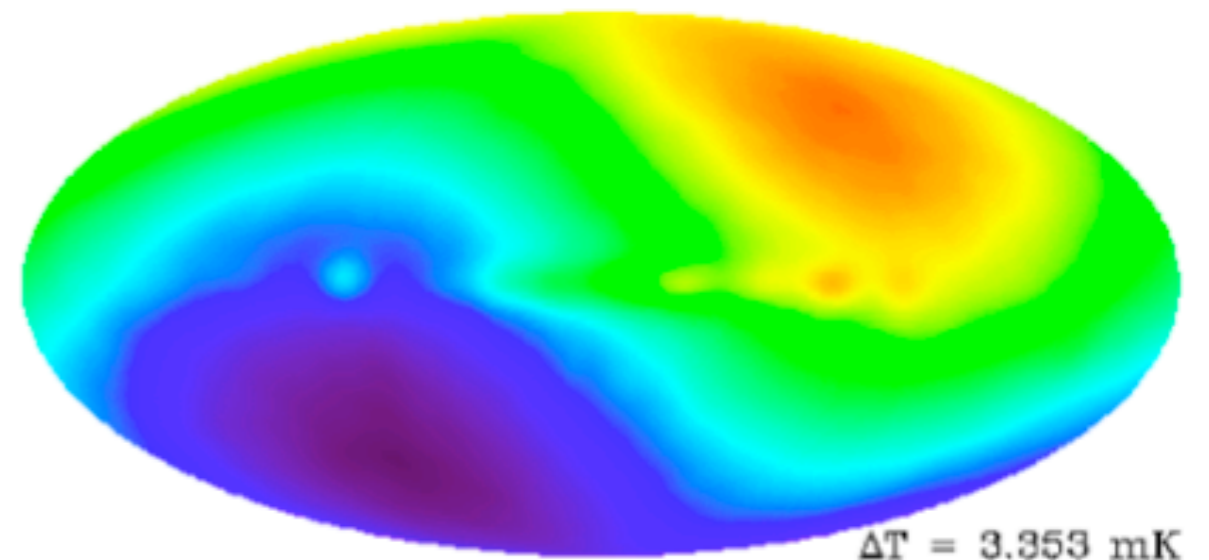
DMR results (Smoot et al. 1992) in galactic coordinates (horizontally longitude from $+180^\circ$ to -180° , vertically latitude from $+90^\circ$ to -90° , centre approximately on the Milky Way centre.

1. the data from the 53 GHz band (6 mm wavelength) showing the near uniformity of the CMB (top), $T=2.728$ K

2. the dipole (middle), $\Delta T=3.4$ mK

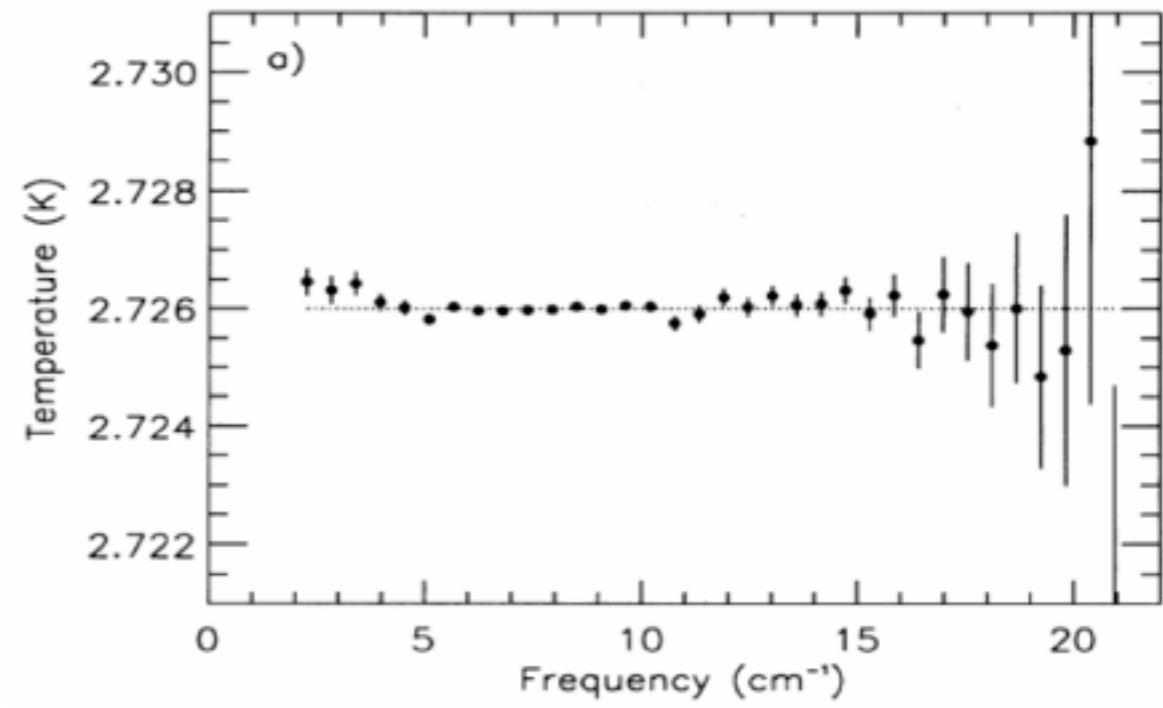
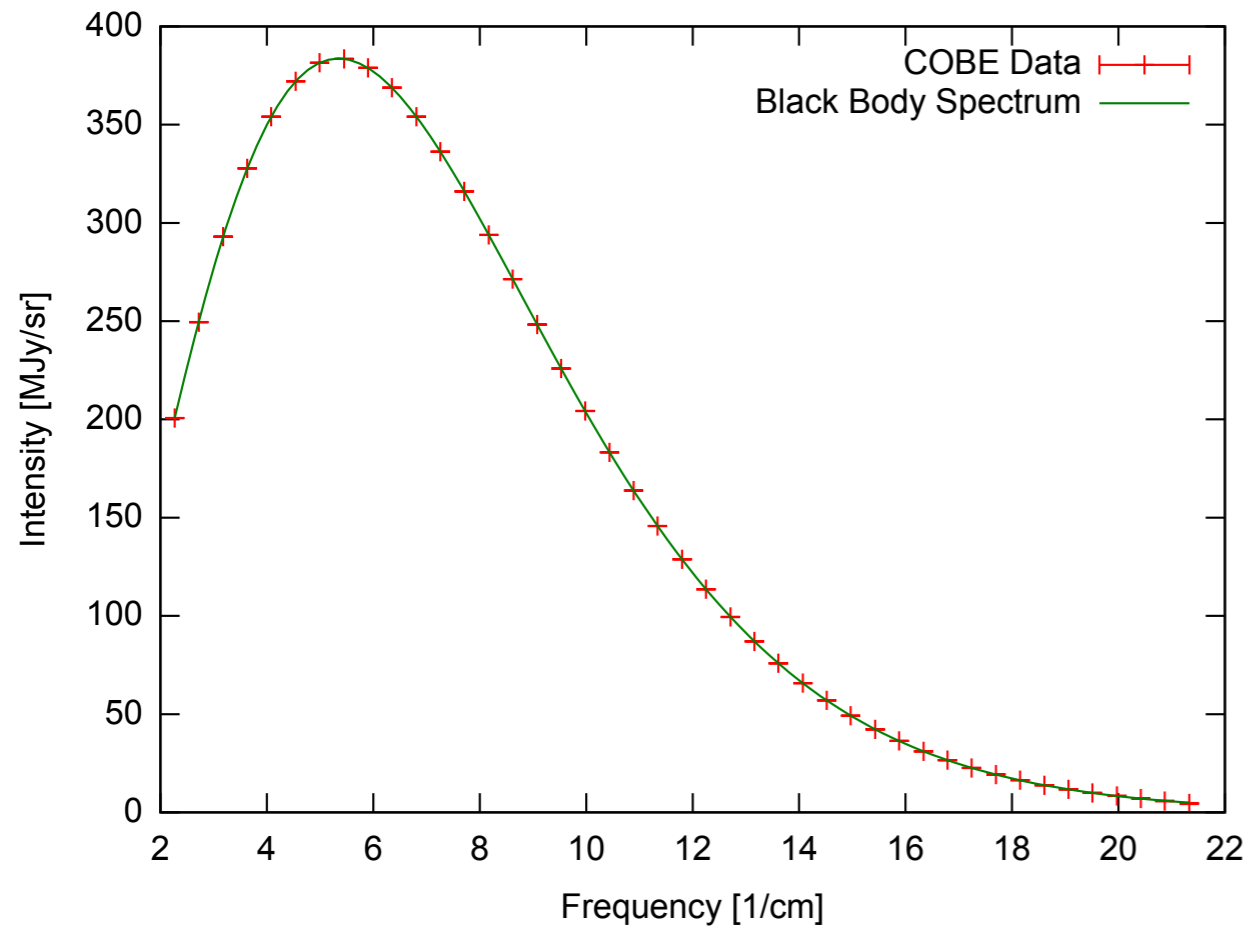
3. the quadrupole and higher anisotropies with the dipole subtracted (bottom), $\Delta T=18$ μ K.

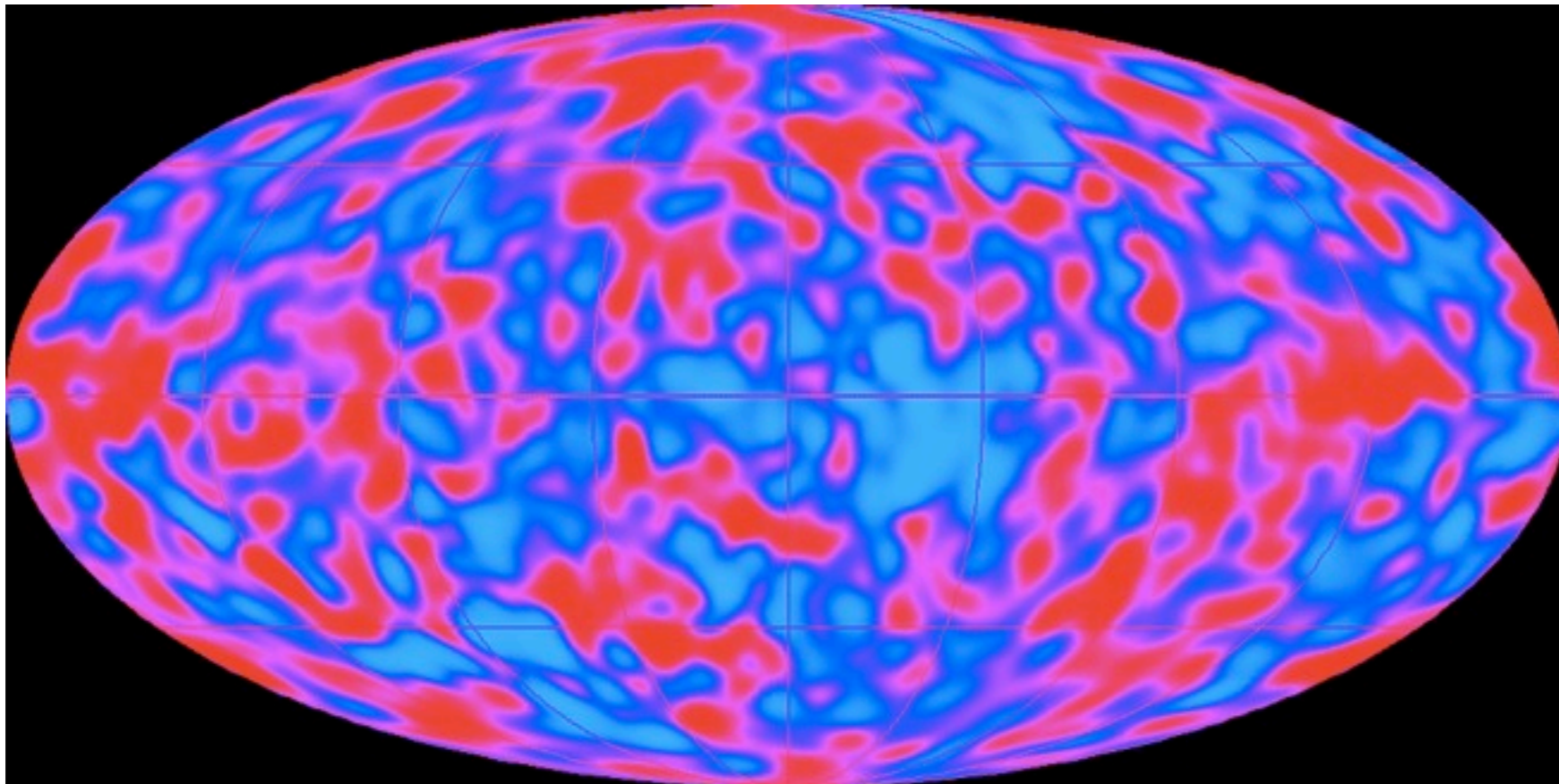
The relative sensitivities from top to bottom are 1, 100 and 100,000. The background from the Milky Way, not following a blackbody spectrum (visible as a horizontal red band in the bottom panel), has not been subtracted.



06/06/2015 13:17

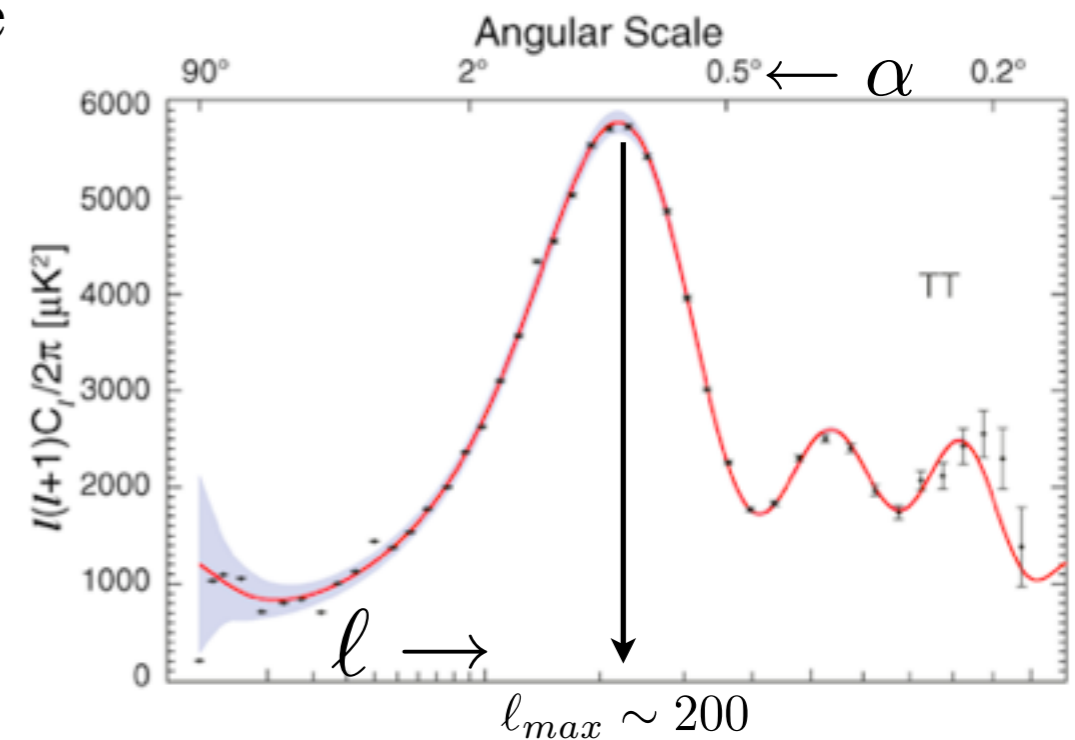
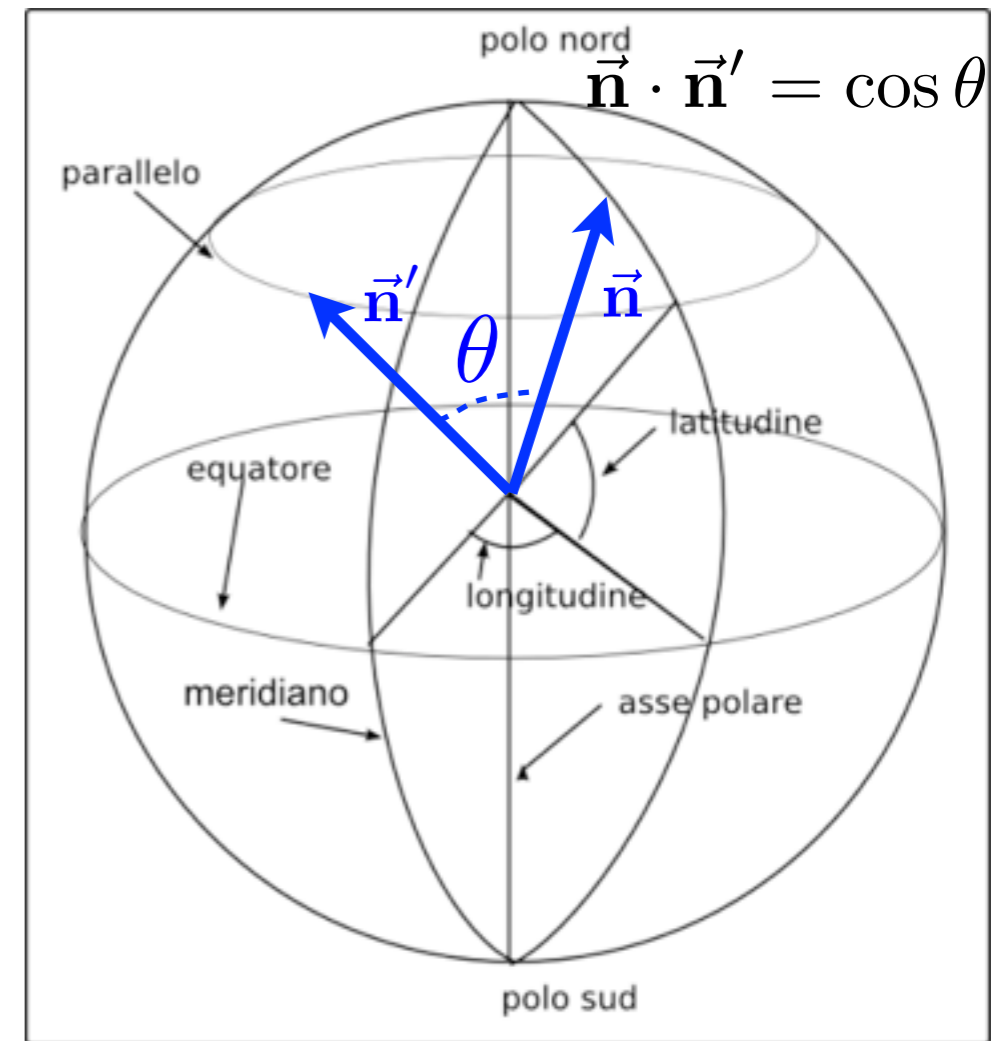
Cosmic Microwave Background Spectrum from COBE





4. Spettro di potenza angolare delle anisotropie

- Ogni punto sulla sfera celeste e' individuato da due coordinate:
 - $-90^0 < \theta < +90^0$: latitudine; $0^0 < \varphi < 360^0$ = longitudine
 - ovvero da un vettore \vec{n} , con $|\vec{n}|=1$
- Correlazioni delle fluttuazioni di temperatura:
 - $C = \langle \delta T(\vec{n}) \delta T(\vec{n}') \rangle / \langle T \rangle^2$
 - nella media, C dipende solo dalla posizione relativa delle due direzioni (e' il Principio Cosmologico, non ci sono direzioni privilegiate)
 - posso sempre mettere il primo punto al polo nord e il secondo a θ e $\varphi=0$
 - ottengo una funzione della sola θ
- La funzione C si puo' esprimere come sovrapposizione di onde, con una scala della variabile angolare individuata da $l=1, 2, \dots$
 - scala angolare = $\alpha \sim \pi/l$ radianti = $180/l$ gradi
- il coefficiente di questo sviluppo corrispondente all'onda l , C_l , rappresenta la potenza che le fluttuazioni mettono nell'onda l , e si chiama **potenza angolare delle anisotropie**



in formule....

$$\frac{\langle \delta T(\vec{\mathbf{n}})\delta T(\vec{\mathbf{n}}') \rangle}{\langle T \rangle^2} = C(\vec{\mathbf{n}} \cdot \vec{\mathbf{n}}')$$

$$C(\vec{\mathbf{n}} \cdot \vec{\mathbf{n}}') = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell=0}^{+\infty} (2\ell + 1) C_{\ell} P_{\ell}(\cos \theta)$$

$P_{\ell}(z)$ = Polinomi di Legendre

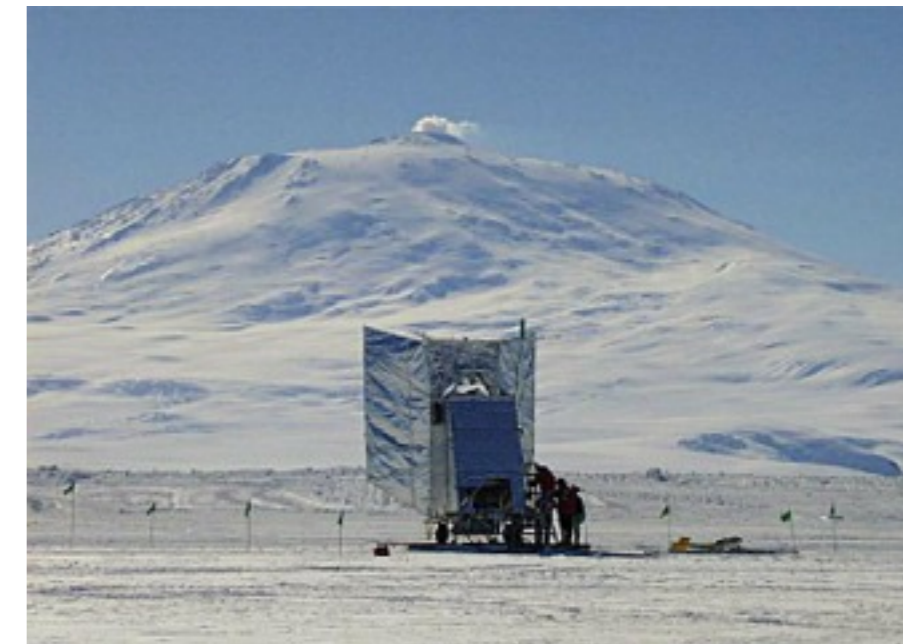
C_{ℓ} = Spettro di potenza angolare (angular power spectrum)

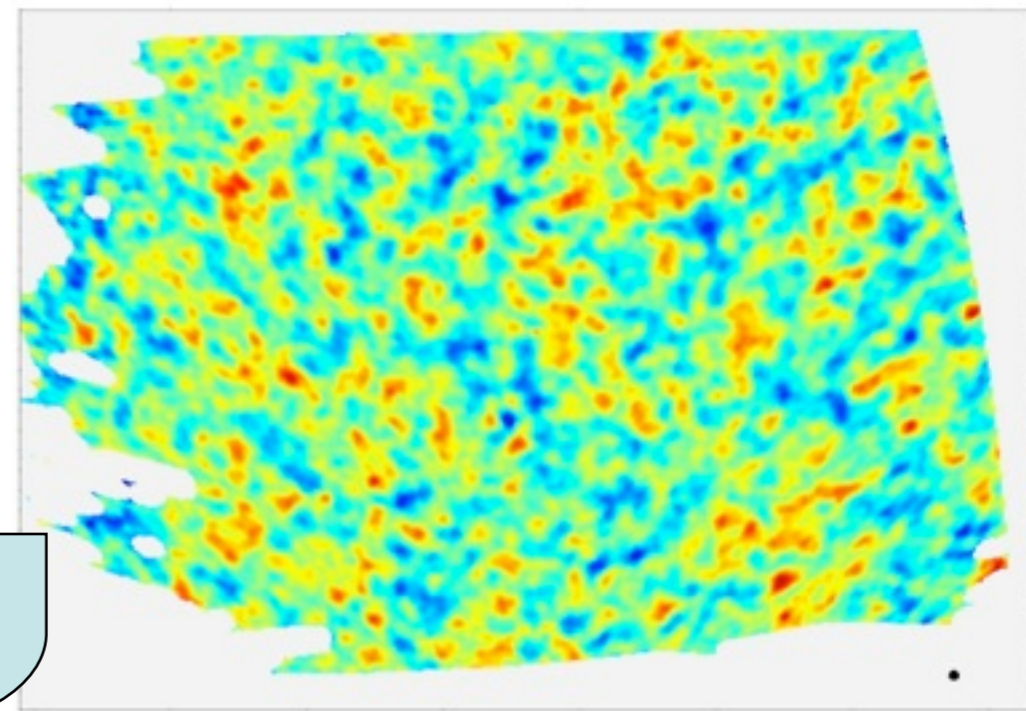
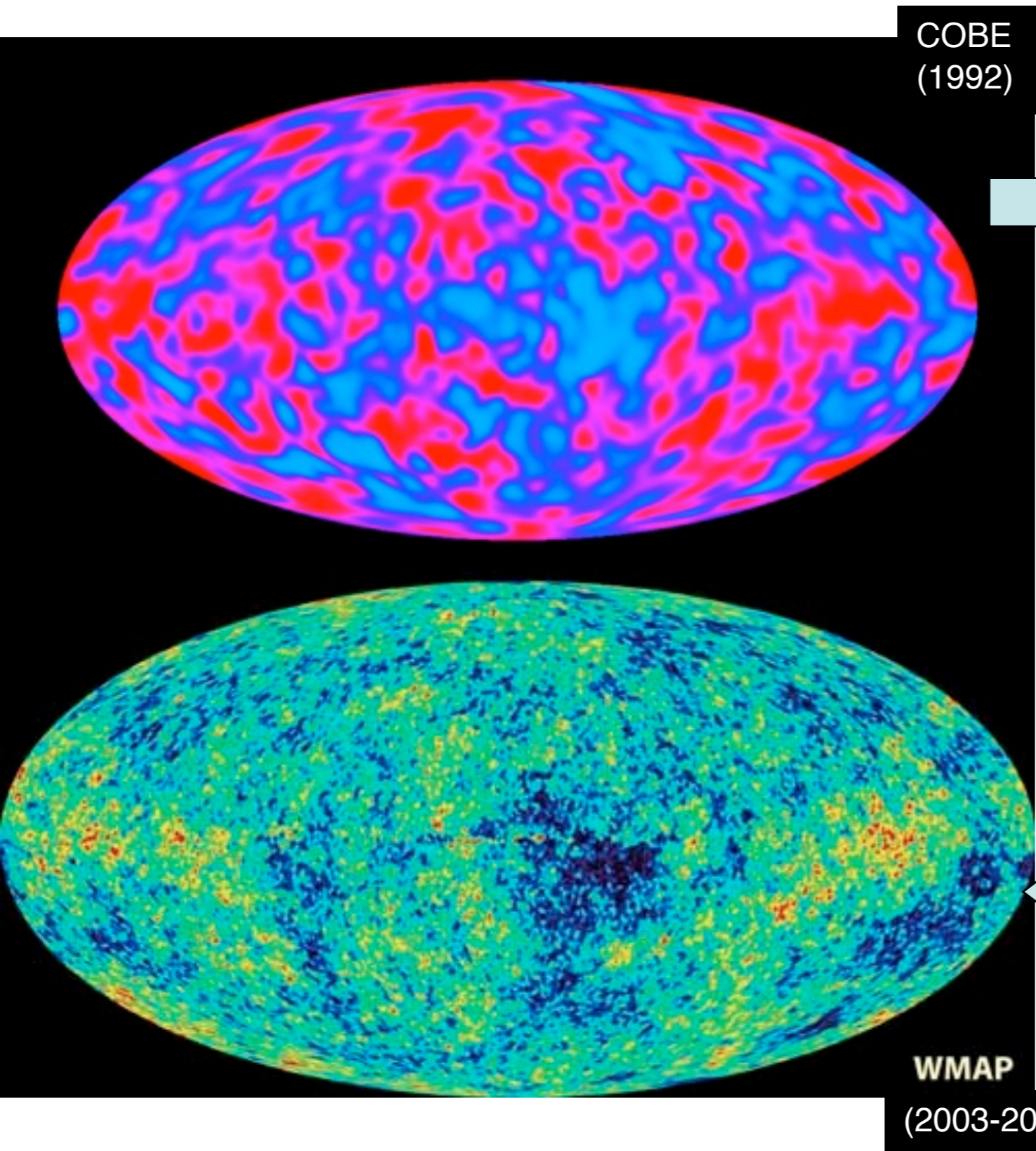
5. Boomerang (1997-2003)

The **BOOMERanG** experiment (**Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics**) measured the cosmic microwave background radiation of a part of the sky during three sub-orbital (high altitude) balloon flights. It was the first experiment to make large, high fidelity images of the CMB temperature anisotropies. By using a telescope which flew at over 42,000 meters high, it was possible to reduce the atmospheric absorption of microwaves to a minimum. This allowed massive cost reduction compared to a satellite probe, though only a tiny part of the sky could be scanned.

The first was a test flight over North America in 1997. In the two subsequent flights in 1998 and 2003 the balloon was launched from McMurdo Station in the Antarctic. It was carried by the Polar vortex winds in a circle around the South Pole, returning after two weeks. From this phenomenon the telescope took its name.

The BOOMERanG team was led by Andrew E. Lange of Caltech and Paolo de Bernardis of the University of Rome La Sapienza.

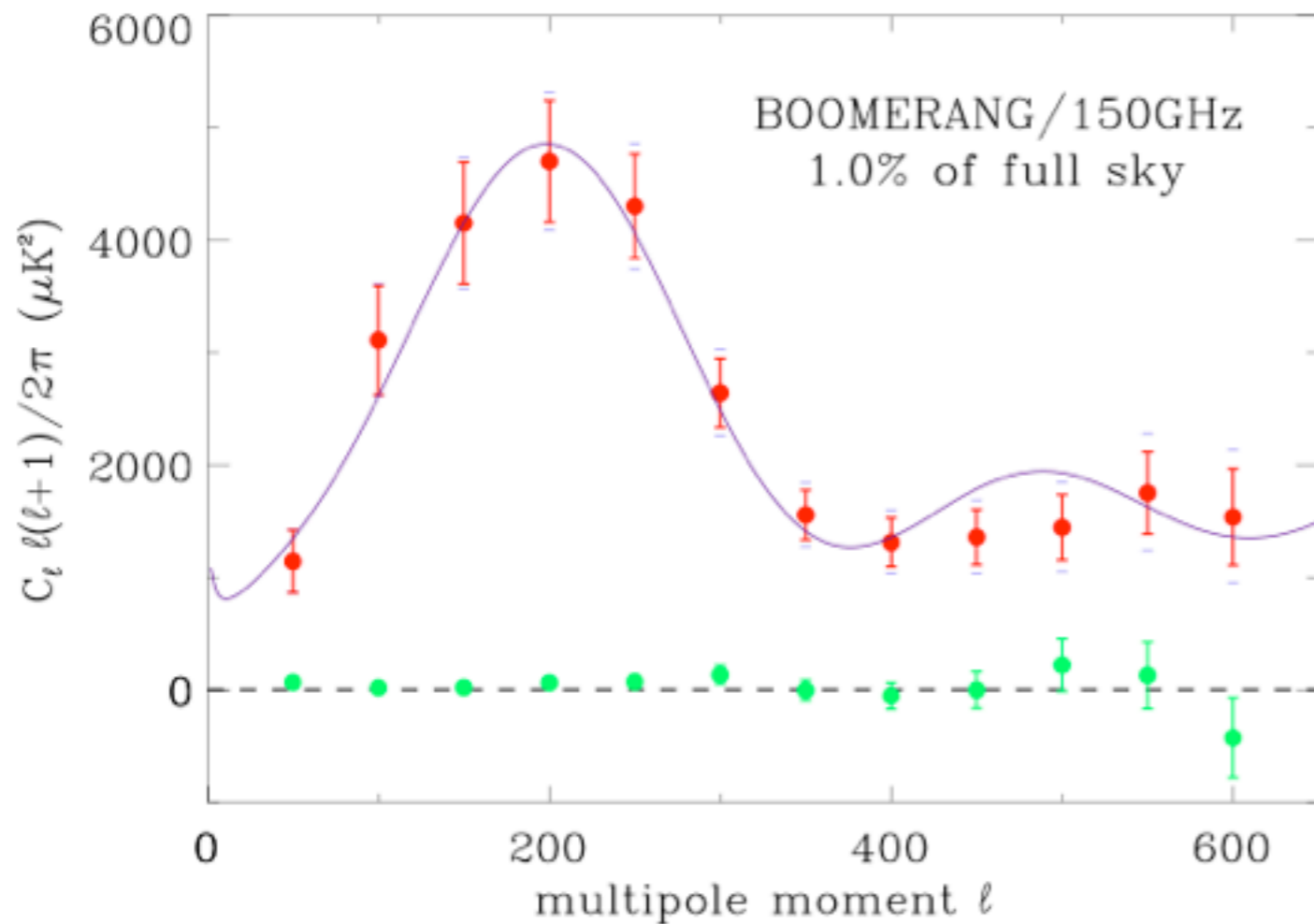




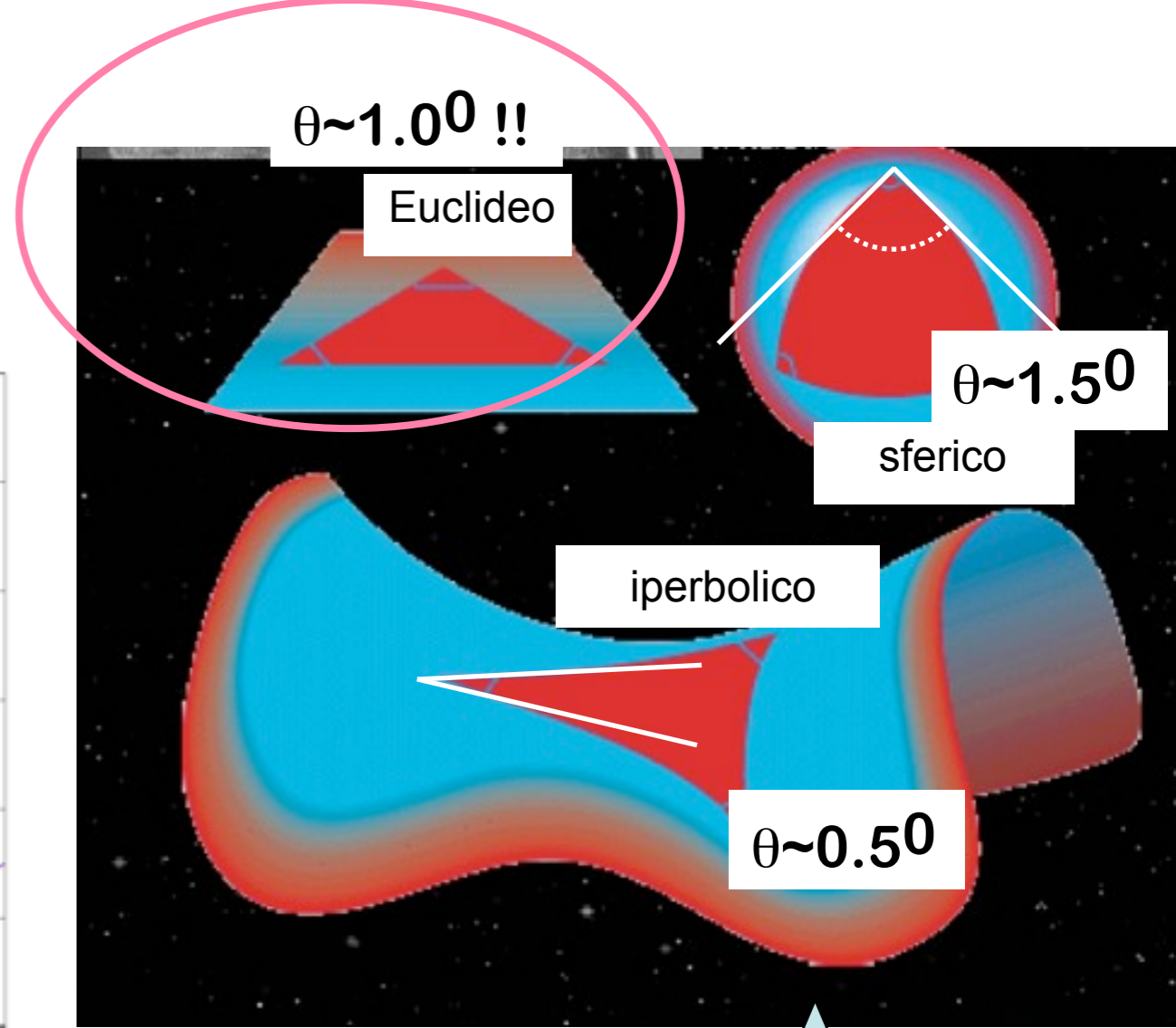
Le structure osservate hanno una dimensione angolare di circa 1°

Le structure osservate hanno una dimensione angolare di circa 1°

Picco acustico $\approx 1^\circ$

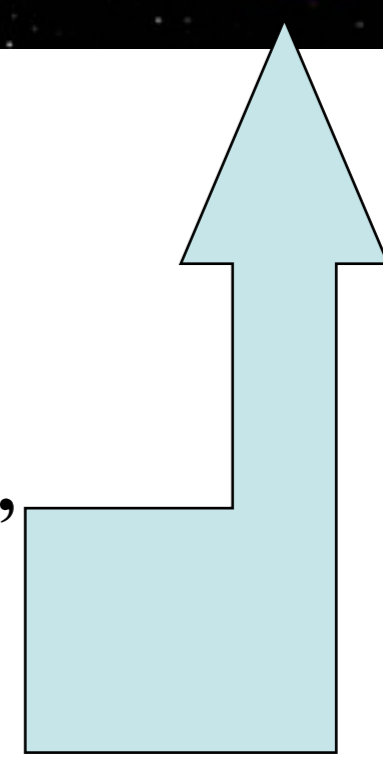


← $1/\theta$



Il picco principale corrisponde alle onde acustiche nel plasma, di cui conosciamo la lunghezza d'onda e la distanza da noi; l'angolo sotto cui le vediamo ci dice che l'Universo e' piatto:

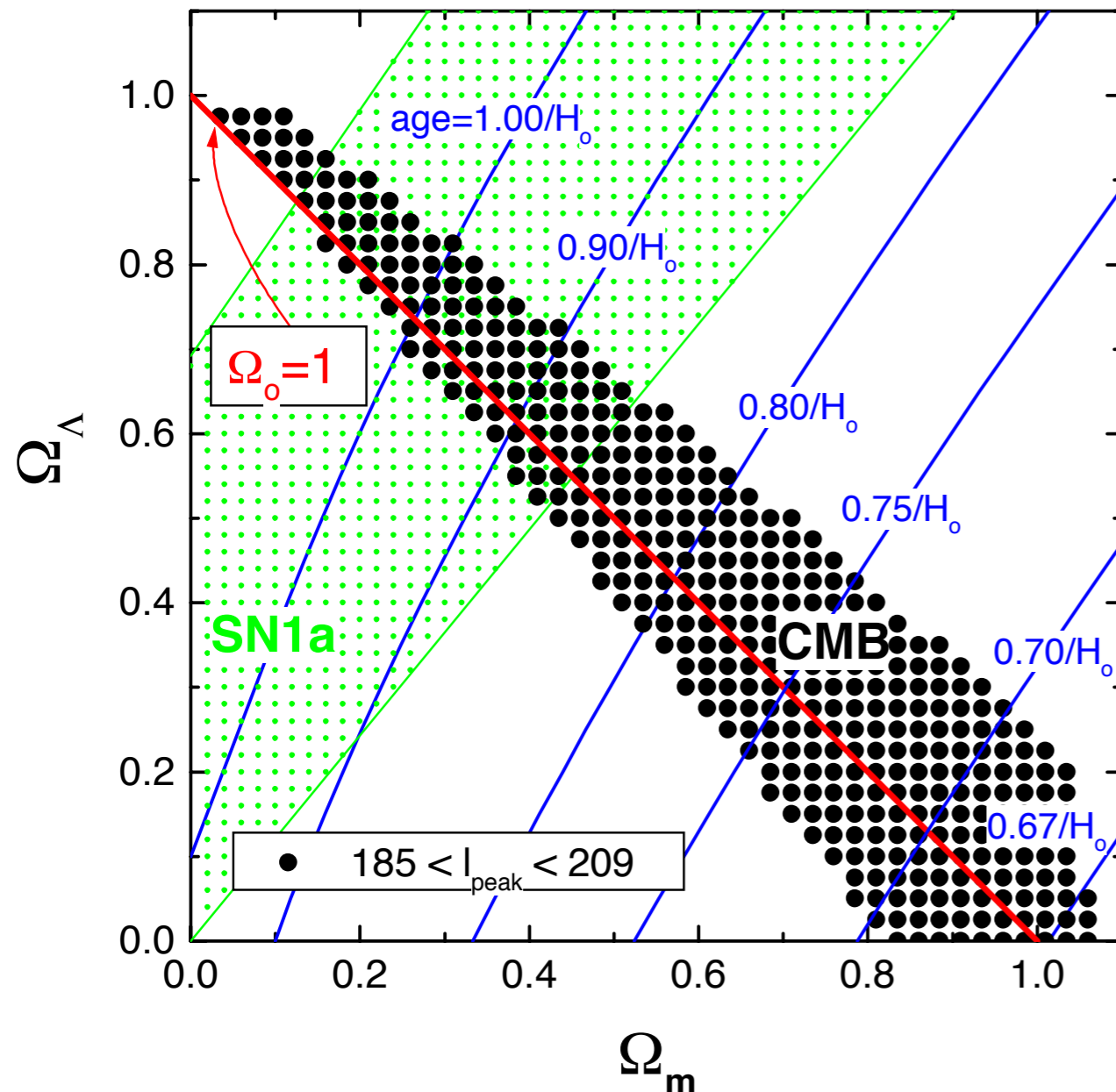
$\Omega=1$!!!!



A flat Universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation

P. de Bernardis¹, P. A. R. Ade², J. J. Bock³, J. R. Bond⁴, J. Borrill^{5,12}, A. Boscaleri⁶, K. Coble⁷, B. P. Crill⁸, G. De Gasperis⁹, P. C. Farese⁷, P. G. Ferreira¹⁰, K. Ganga^{8,11}, M. Giacometti¹, E. Hivon⁸, V. V. Hristov⁸, A. Iacoangeli¹, A. H. Jaffe¹², A. E. Lange⁸, L. Martinis¹³, S. Masi¹, P. V. Mason⁸, P. D. Mauskopf^{14,15}, A. Melchiorri¹, L. Migliorini¹⁶, T. Montroy⁷, C. B. Netterfield¹⁶, E. Pascale⁶, F. Piacentini¹, D. Pogosyan⁴, S. Prunet⁴, S. Rao¹⁷, G. Romeo¹⁷, J. E. Ruhl⁷, F. Scaramuzzi¹³, D. Sforna¹ & N. Vittorio⁹

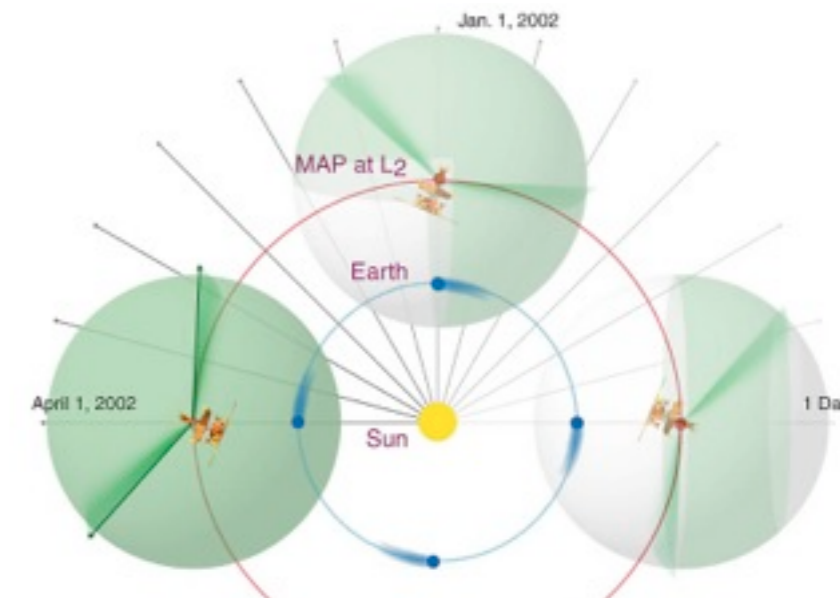
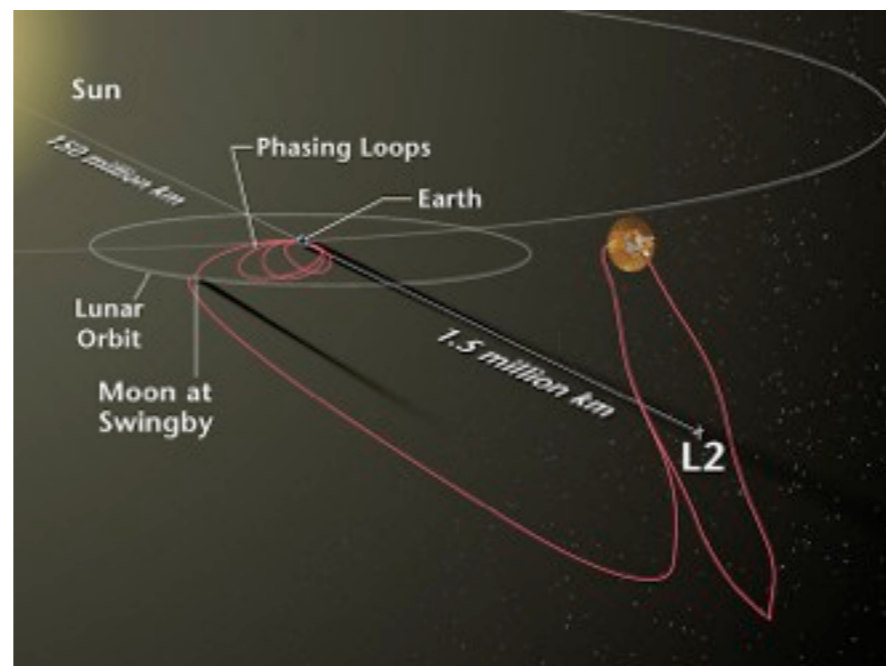
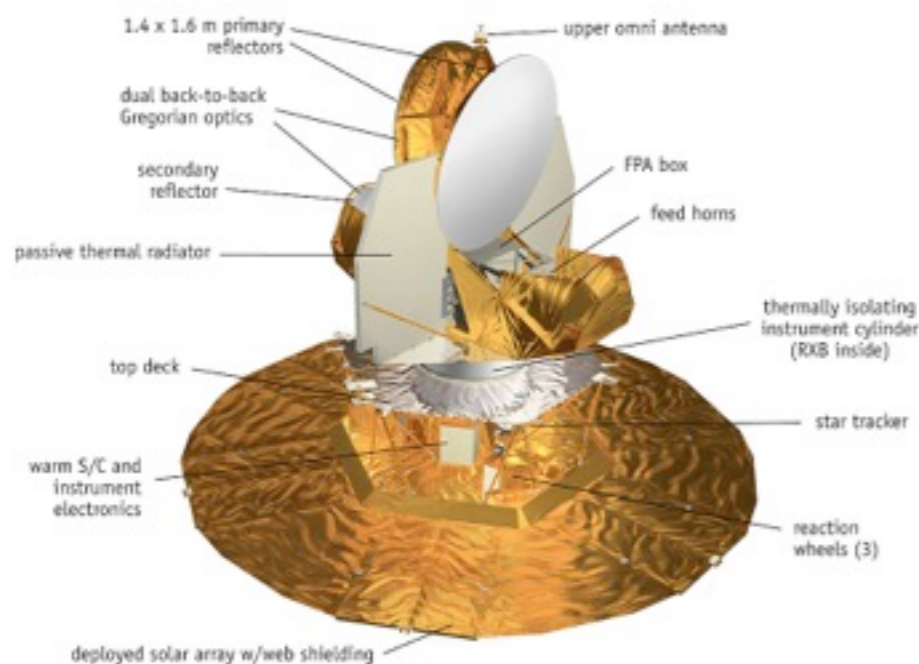
April 2000



- I punti in nero corrispondono a modelli che danno un fit accettabile dello spettro di potenza angolare intorno al picco principale
- la zona verde corrisponde ai valori di Ω_Λ e Ω_m indicati dalla curva di Hubble delle galassie lontane (cfr. Lez. 27)
- $\Omega_\Lambda + \Omega_m \approx 1$, $\Omega_\Lambda \approx 0.7$, $\Omega_m \approx 0.3$.
- Le linee blu danno l'eta' dell'Universo in unita' di $1/H_0 \approx 14 \cdot 10^9$ anni (cfr. Lez. 14)

6. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)- NASA

- Progettava una risoluzione di un fattore >40 migliore di COBE
- satellite posto nel punto lagrangian L_2 , circa 1.5 milioni di km dalla Terra, per minimizzare la radiazione dal Sole, Terra, Luna
- su un'orbita periodica intorno a L_2 , scan completo del cielo in 6 mesi
- Lanciato nel 2001, ha funzionato fino al 2010, quando e' entrato in funzione il satellite PLANCK dell'ESA
- Ha iniziato l'era delle misure di precisione in Cosmologia
- stabilendo quello che si chiama: The Standard Cosmological Model, o anche il modello Λ -CDM (costante cosmologica e Materia Oscura Fredda)



Concordance - or Standard - Cosmology (Wikipedia)

The Λ CDM (Lambda cold dark matter) or Lambda-CDM model is a parametrization of the Big Bang cosmological model in which the universe contains a cosmological constant, denoted by Lambda (Greek Λ), associated with dark energy, and cold dark matter (abbreviated CDM). It is frequently referred to as the standard model of Big Bang cosmology, since it is the simplest model that provides a reasonably good account of the following properties of the cosmos:

Oggi

Lez. 17

Lez. 22

Lez. 27

- *the existence and structure of the cosmic microwave background*
- *the large-scale structure in the distribution of galaxies*
- *the abundances of hydrogen (including deuterium), helium, and lithium*
- *the accelerating expansion of the universe observed in the light from distant galaxies and supernovae*

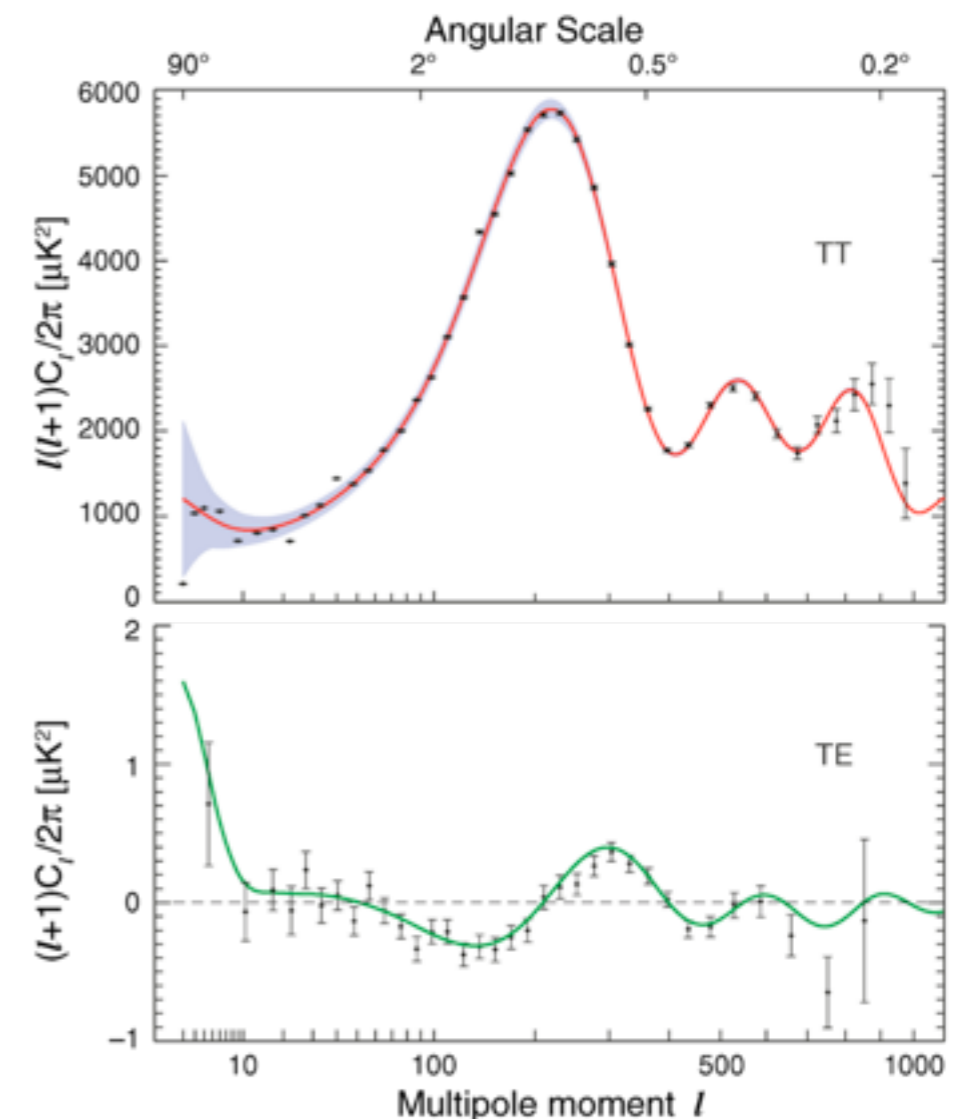
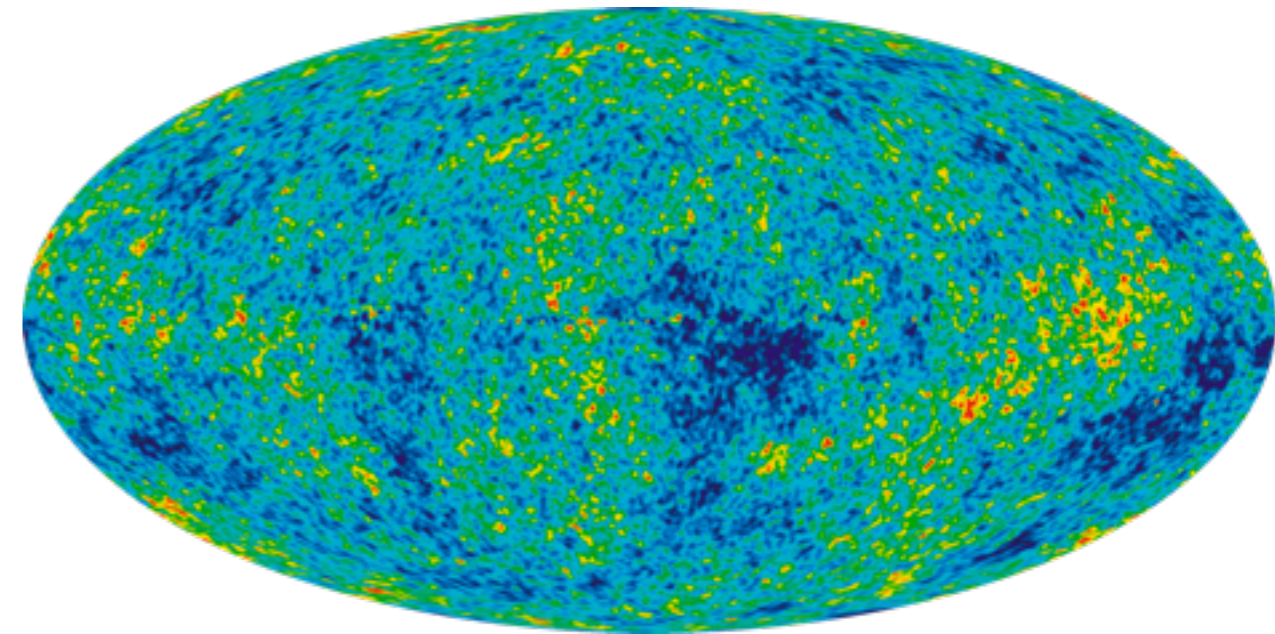
The model assumes that general relativity is the correct theory of gravity on cosmological scales. It emerged in the late 1990s as a concordance cosmology, after a period of time when disparate observed properties of the universe appeared mutually inconsistent, and there was no consensus on the makeup of the energy density of the universe.

The Λ CDM model can be extended by adding cosmological inflation, quintessence and other elements that are current areas of speculation and research in cosmology.

Some alternative models challenge the assumptions of the Λ CDM model. Examples of these are modified Newtonian dynamics, modified gravity and theories of large-scale variations in the matter density of the universe.

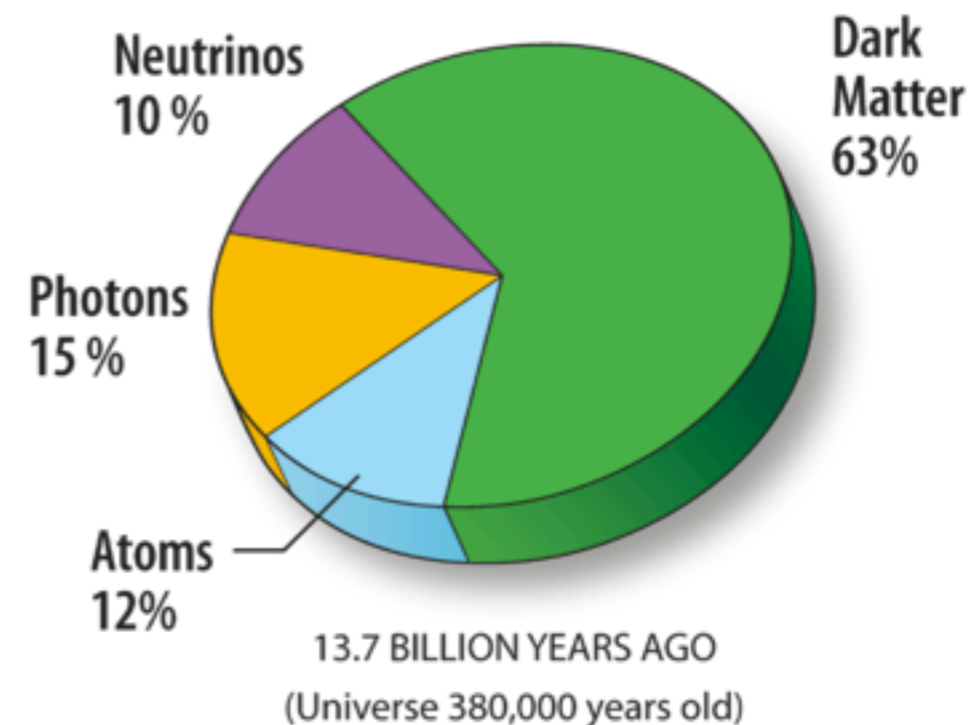
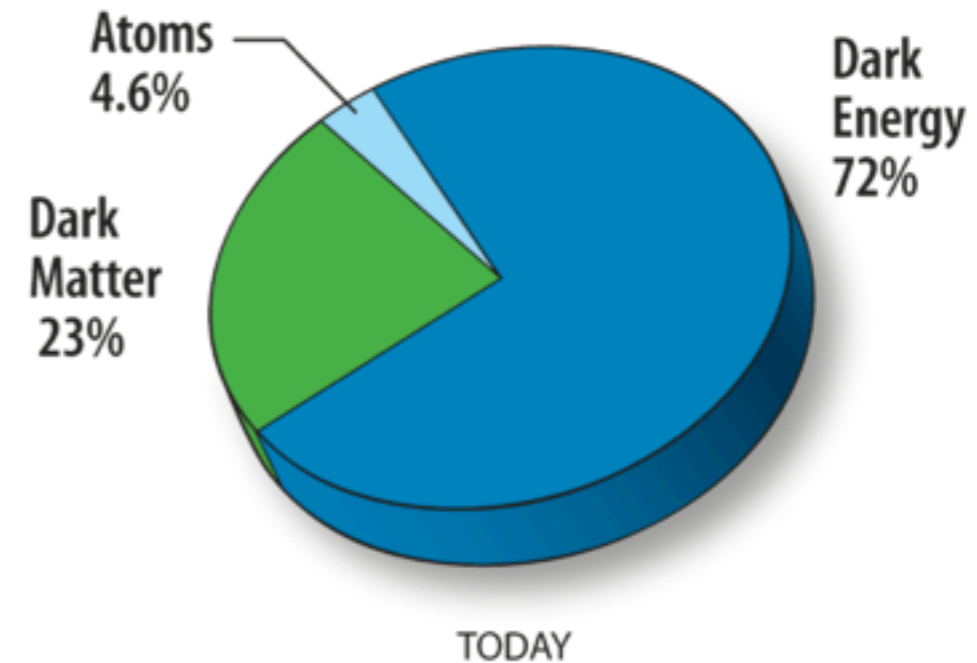
Composizione dell'Universo secondo WMAP

- WMAP ha permesso di determinare con grande precisione lo spettro di potenza delle anisotropie
- i picchi secondari sono sensibili alla composizione dell'Universo in termini di materia (CDM) e energia oscura (Λ)
- inoltre il complesso delle misure fornisce valori accurati della costante di Hubble e della densità della materia barionica
- Il quadro risultante è in ottimo accordo con il Modello Cosmologico Standard (linea rossa)



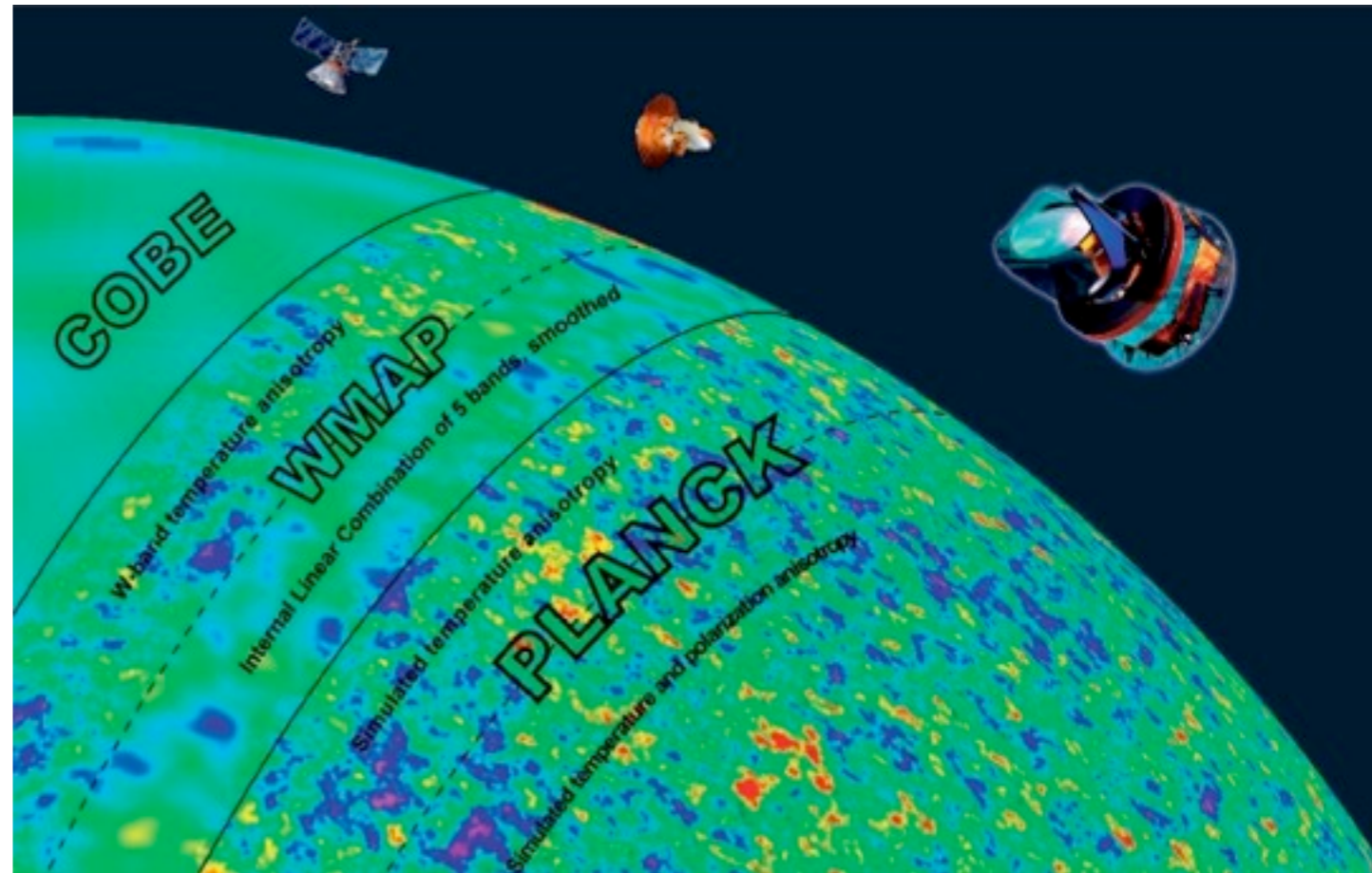
Composizione dell'Universo secondo WMAP (cont.)

- Componenti principali dell'Universo, oggi: materia oscura, materia barionica (densità circa 1/5 della DM), costante cosmologica
- Universo euclideo $\Omega_\Lambda + \Omega_m \approx 1$
- ricordiamo che:
$$\rho_{rad} \propto \frac{1}{a(t)^4}, \quad \rho_m \propto \frac{1}{a(t)^3}, \quad \rho_\Lambda \propto \frac{1}{a(t)^0}$$
- andando indietro nel tempo $a(t)$ diminuisce, quindi il contributo relativo della radiazione aumenta e quello della costante cosmologica diminuisce.
- la seconda figura mostra la situazione al momento della ricombinazione degli atomi: la radiazione e i neutrini fornivano una componente importante
- per tempi ancora inferiori, è la radiazione a dominare.

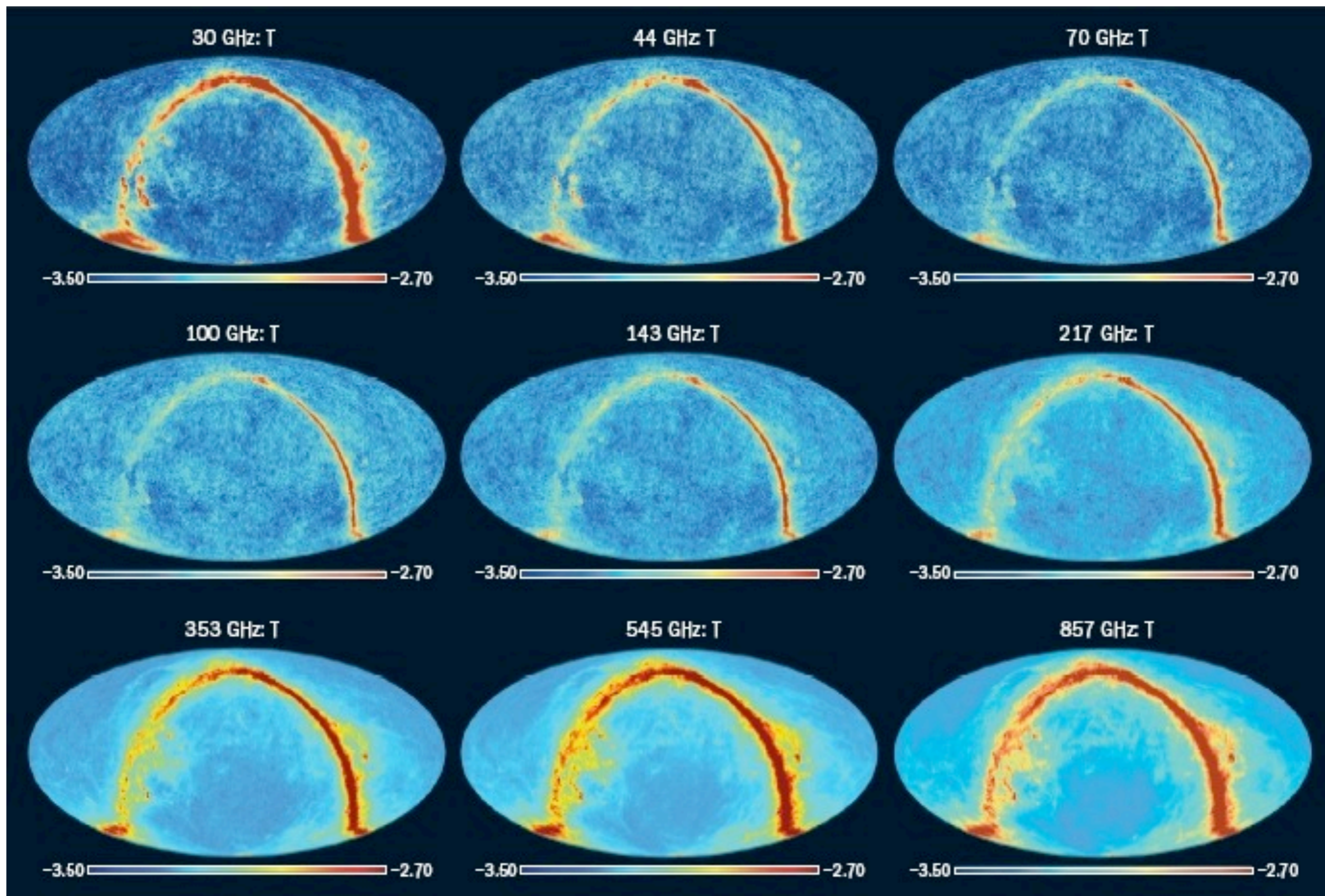


PLANCK-ESA

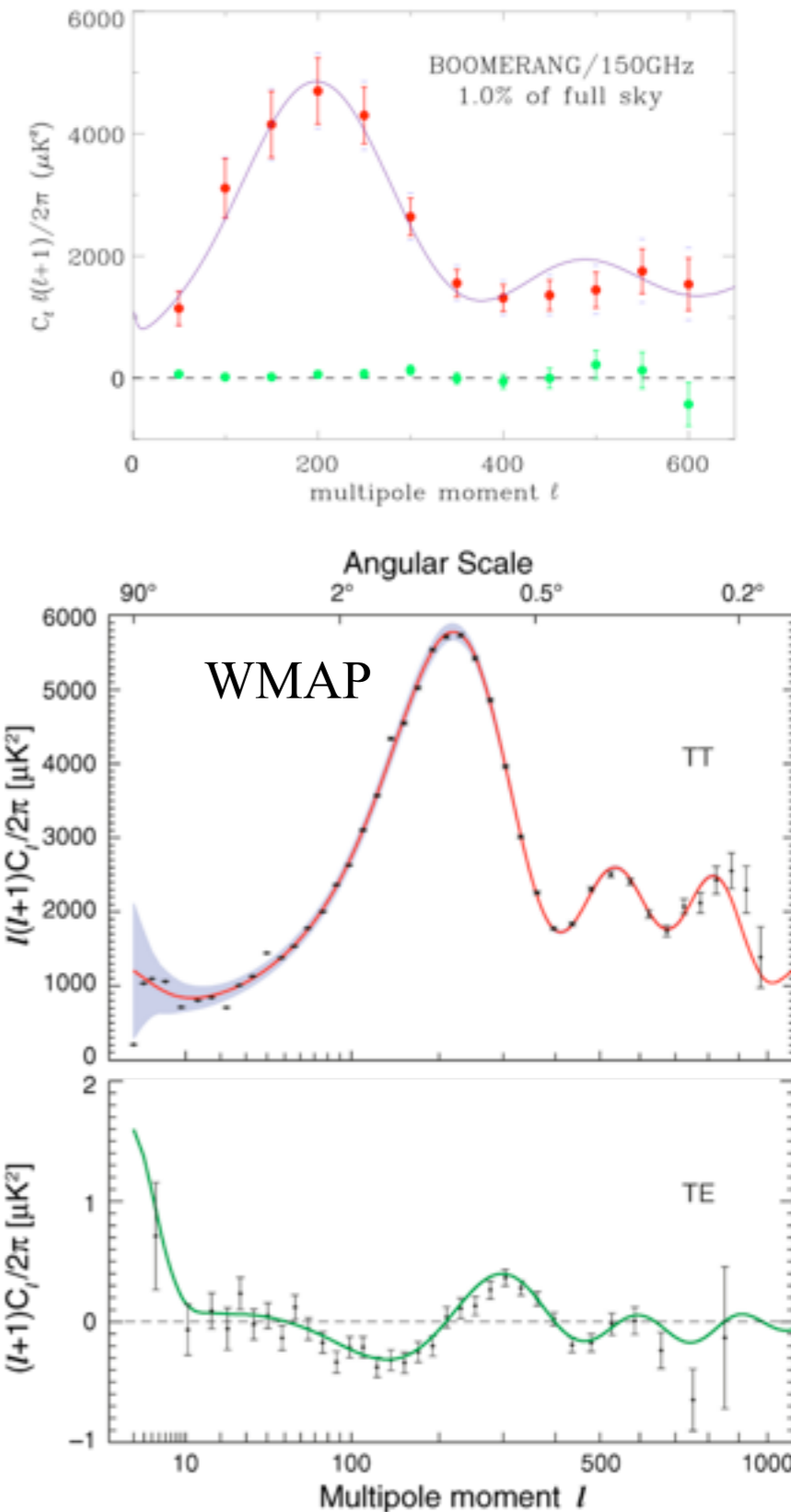
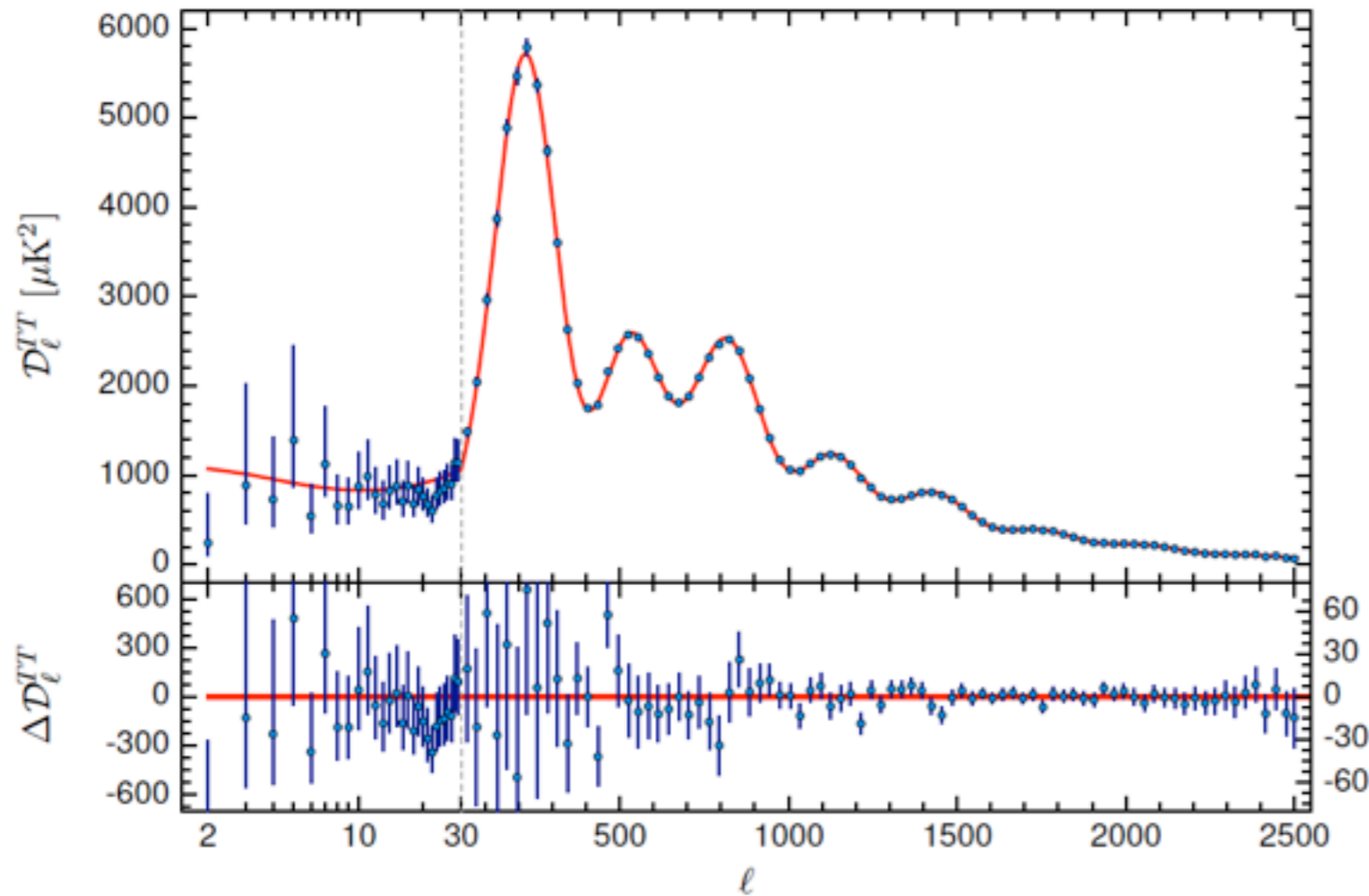
- Lanciato 14 maggio 2009
- Installato nel punto Lagrangiano L₂: 3 luglio 2009.
- Compie un'orbita di raggio 400.000 km intorno ad L₂
- 3 luglio 2009: pienamente operativo
- Operazioni scientifiche terminano il 3 ottobre 2013
- disattivato 23 ottobre 2013



- Primo rilascio risultati di Cosmologia: 2013, arXiv:1303.5076v3
- Ultimo rilascio: 2015, arXiv:1502.01589v2



PLANCK: spettro di potenza angolare



The Planck 2015 temperature power spectrum.

The best-fit base ΛCDM theoretical spectrum fitted to the Planck TT+ lowP likelihood is plotted in the upper panel.

Residuals with respect to this model are shown in the lower panel. The error bars show $\pm 1\sigma$.

Per confronto, i risultati di Boomerang e di WMAP

PLANCK: Concordance Cosmology alla prova

$$h = \frac{H_0}{100}$$

[1] Parameter	[5] 2015F(CHM)	[6] 2015F(CHM) (Plik)
$\Omega_b h^2$	0.02225 ± 0.00023	0.02222 ± 0.00023
$\Omega_c h^2$	0.1194 ± 0.0022	0.1199 ± 0.0022
H_0	67.48 ± 0.98	67.26 ± 0.98
n_s	0.9682 ± 0.0062	0.9652 ± 0.0062
Ω_m	0.313 ± 0.013	0.316 ± 0.014

NOTE:

dens. barioni* $h^2 \rightarrow \Omega_b = 0.049$
 dens. cold matter $\rightarrow \Omega_c = 0.264$
 Hubble cost. oggi
 indice spettrale (atteso: leggermente < 1 ,
 inflazione)
 densita' materia totale (nota: $\Omega_b + \Omega_c = 0.314$, non
 moltineutrini massivi!!!)

Parameter	TT, TE, EE+lensing+ext
Ω_K	$0.0008^{+0.0040}_{-0.0039}$
Σm_ν [eV]	< 0.194
N_{eff}	$3.04^{+0.33}_{-0.33}$
Y_p	$0.249^{+0.025}_{-0.026}$
$dn_s/d \ln k$	$-0.002^{+0.013}_{-0.013}$
$r_{0.002}$	< 0.113
w	$-1.019^{+0.075}_{-0.080}$

$1 - \Omega_{\text{tot}}$ (Universo euclideo)
 limite sulla massa totale dei neutrini
 Numero effettivo dei neutrini (torna con Z^0 !!)
 abbondanza ^4He primordiale

coeff. equazione di stato dark energy (atteso: -1)



Storia del Cosmo dopo PLANCK

→ COSMIC HISTORY

