

Cosmologia e fondo cosmico di microonde

Aniello (Daniele) Mennella

*Dipartimento di Fisica
Università degli studi di Milano*

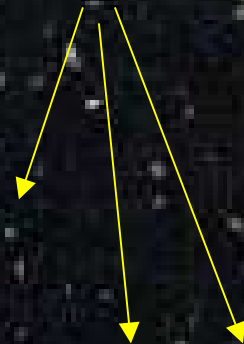


~10 miliardi di anni luce

Queste galassie ci mostrano com'era
l'universo 10 miliardi di anni fa...



~10 miliardi di anni luce



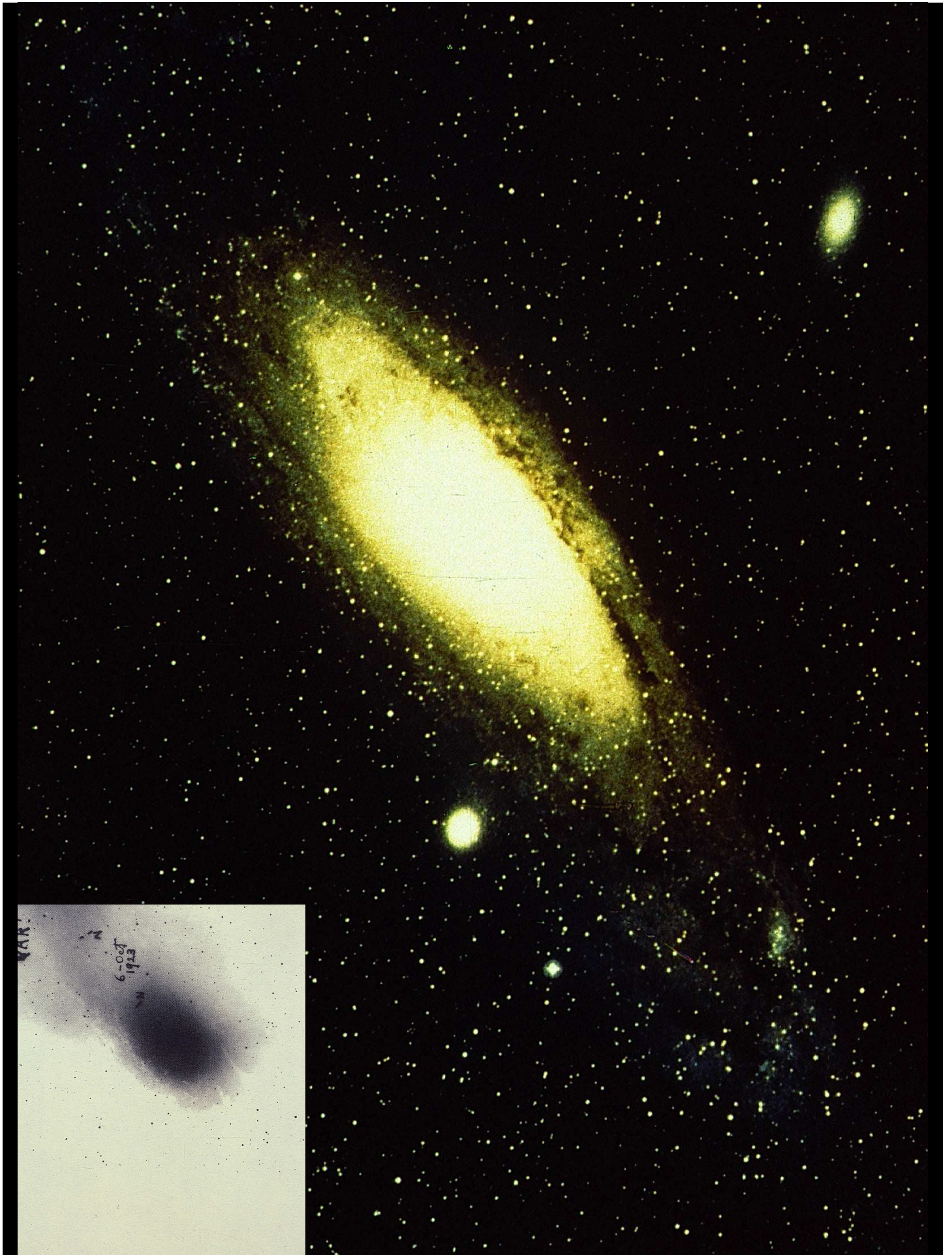
Queste galassie ci mostrano com'era
l'universo 10 miliardi di anni fa...

... ma quanto lontano si può guardare
nello spazio e nel tempo?

WAR!

6-00-9
Erb1

N



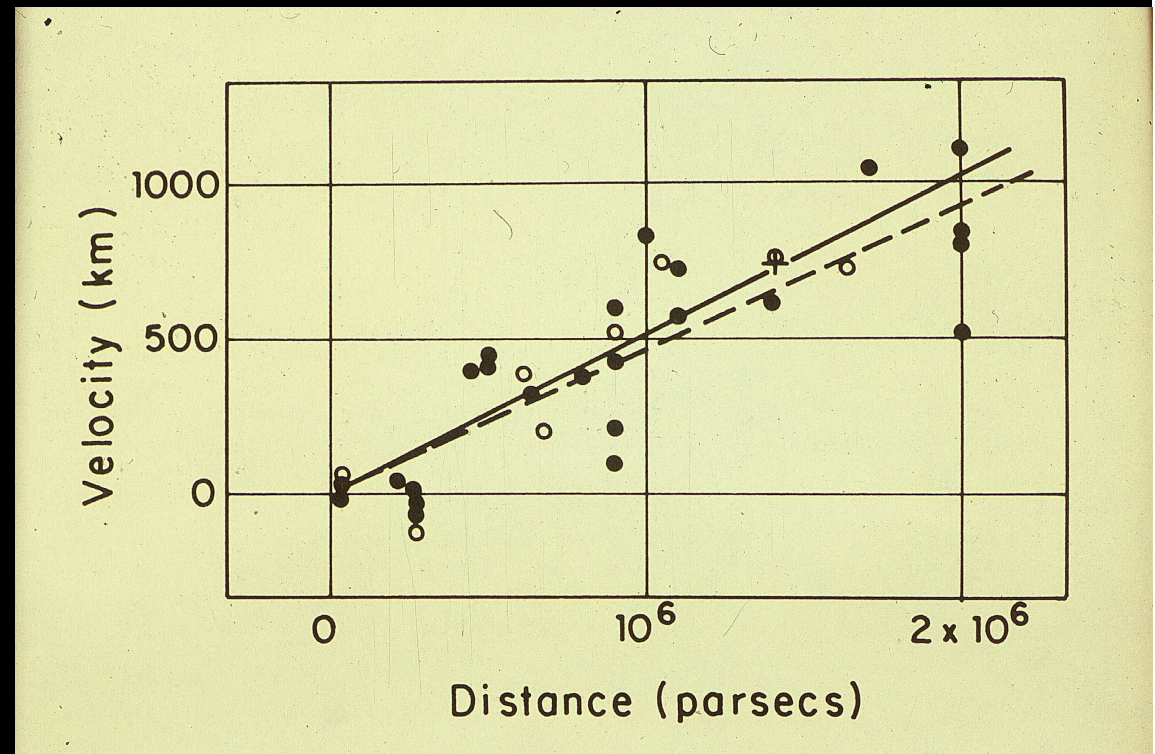
1929 – Legge di Hubble



Edwin Hubble - 1929

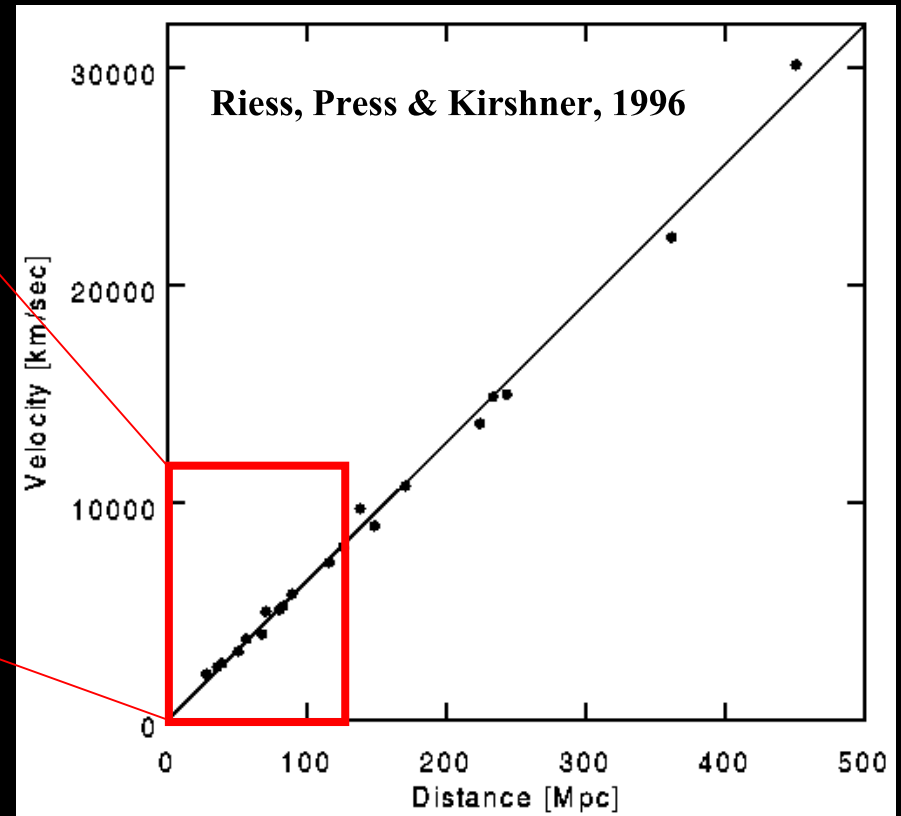
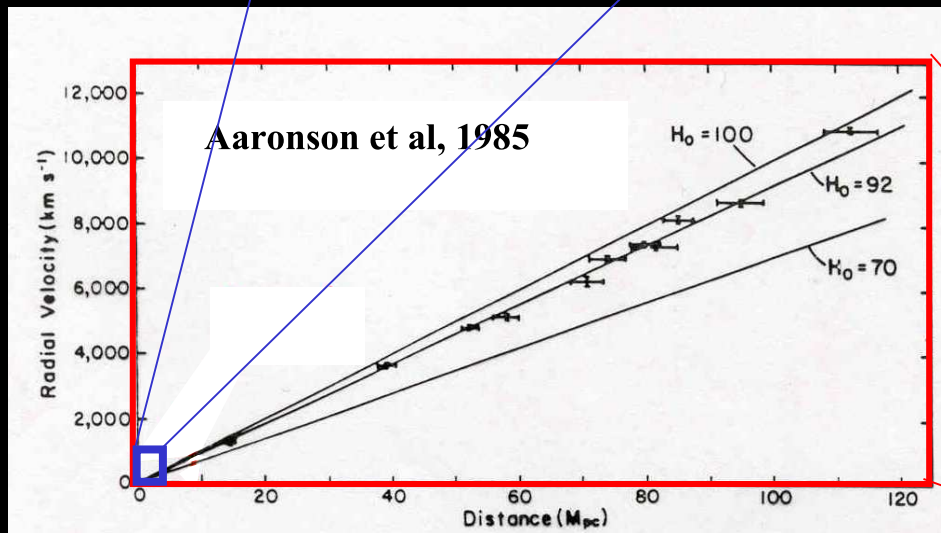
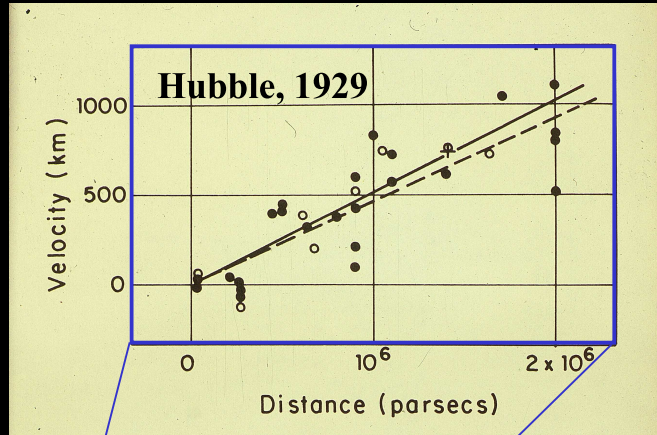
$$v_r = H_0 \cdot d$$

Velocità di recessione *Costante di Hubble* *Distanza*



2002 – Legge di Hubble

Oggi le osservazioni confermano la Legge di Hubble fino alle più grandi distanze accessibili



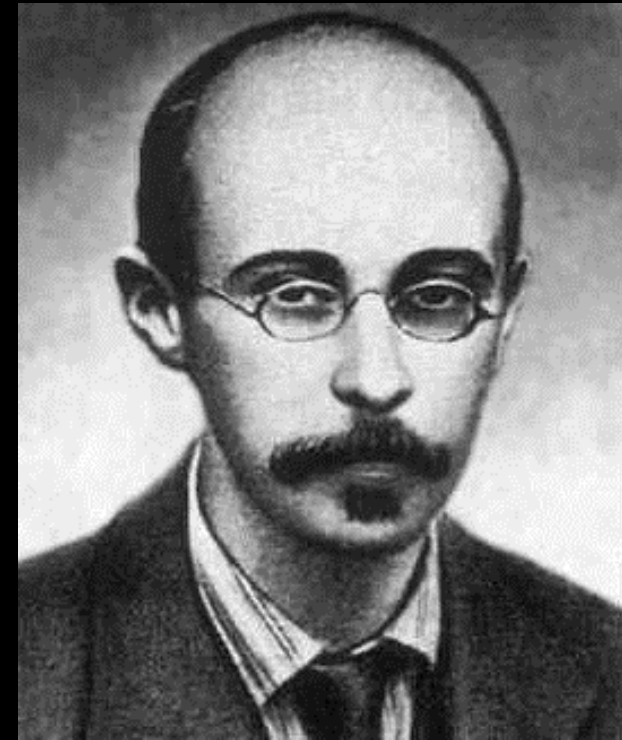
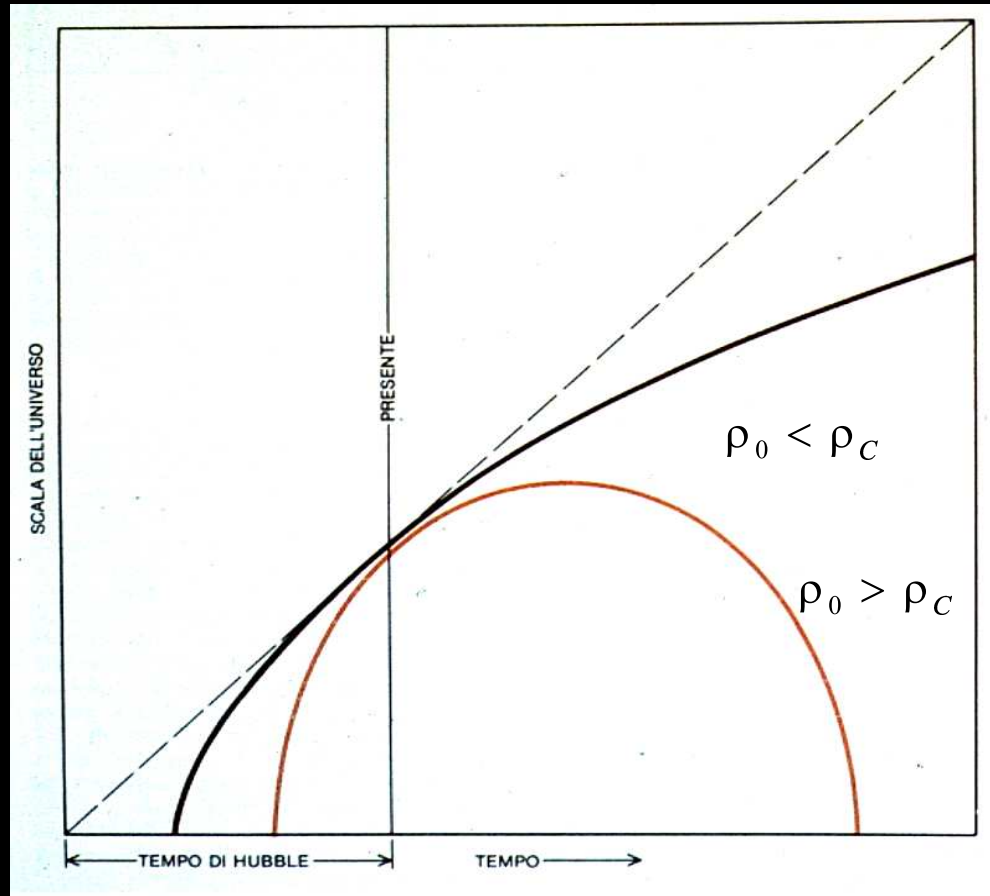
1 parsec (pc) = 3.26 anni luce

Se l'universo oggi si sta espandendo,
cosa possiamo dire di come era nel passato?

- ?
- ?
- ?

I modelli di Friedmann

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$$



Alexander Friedmann

La dinamica e la geometria dell'universo sono determinati dalla sua densità media

George Gamow – Big bang e CMB



Evoluzione dell'Universo



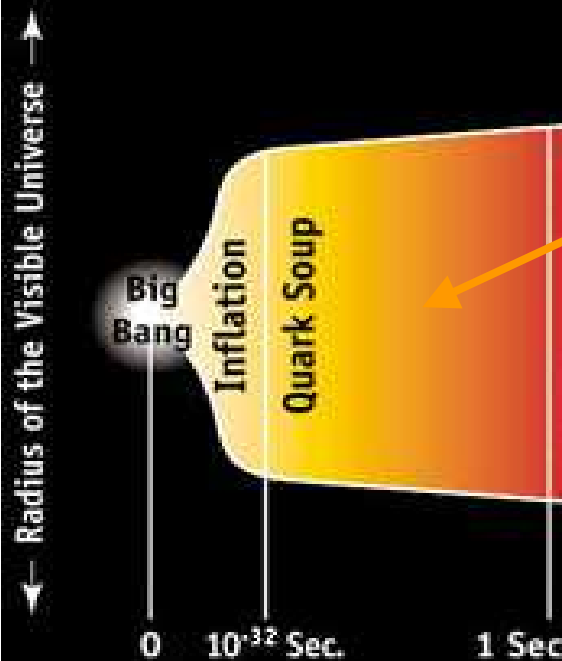
- L'universo nei primi istanti di vita ha densità e temperature altissime. I processi fisici che agiscono in questo periodo di vita non sono ancora chiari.
- L'immagine dell'esplosione evocata dal termine "Big Bang" è più evocativa che reale.
- L'universo "osservabile" aveva in questa fase le dimensioni di una palla da gioco

Evoluzione dell'Universo

INFLAZIONE: Espansione esponenziale causata dall'energia del vuoto

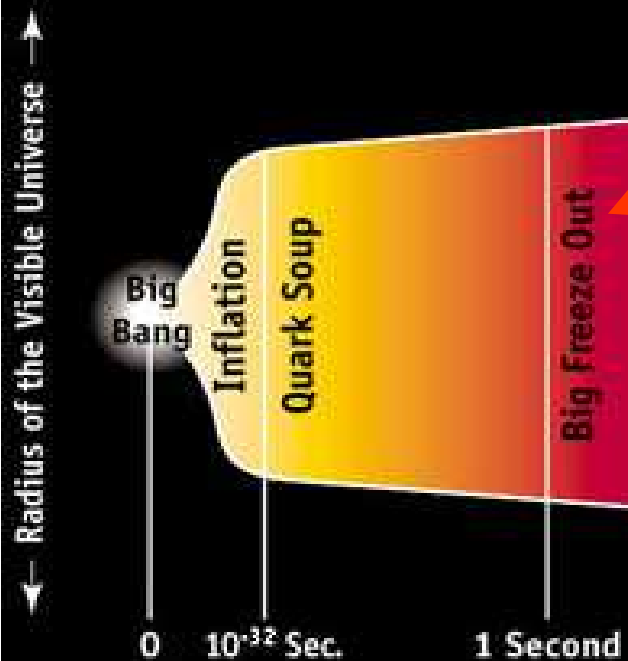


Evoluzione dell'Universo



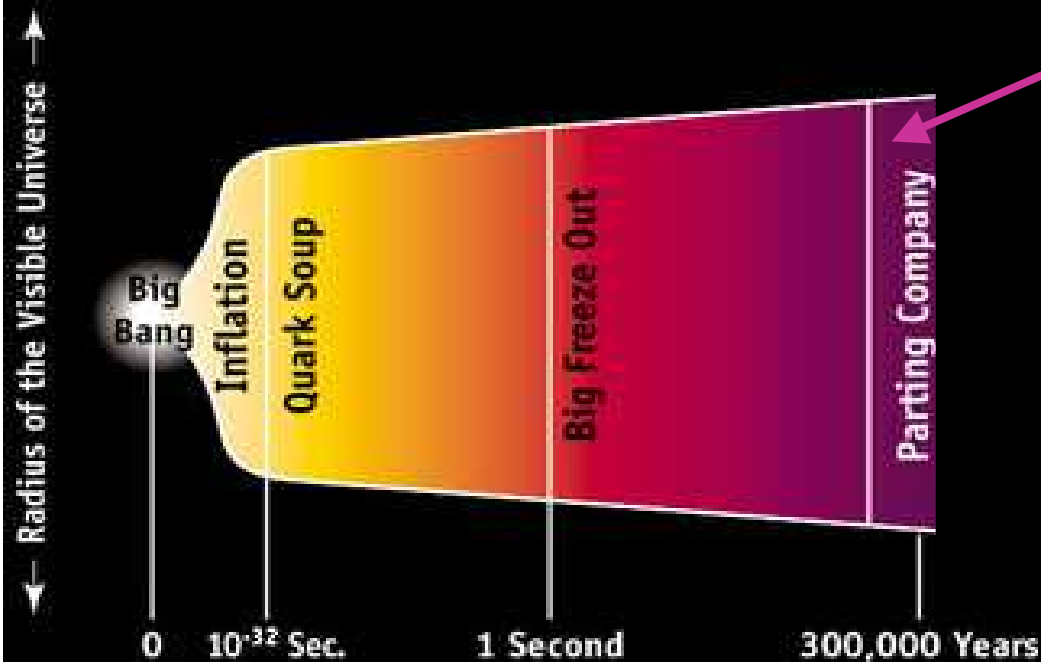
- L'universo è una "zuppa" di particelle, antiparticelle e radiazione in equilibrio dinamico (particelle e antiparticelle sono continuamente create ed annichilate)
- Esiste una piccola sproporzione fra particelle e antiparticelle a favore delle prime
- Per ogni famiglia di particelle esiste una temperatura al di sotto della quale l'equilibrio fra radiazione e materia si rompe, lasciando come residuo la piccola frazione di particelle
- I quark si combinano per formare i barioni, ovvero protoni e neutroni

Evoluzione dell'Universo



- Dopo circa 1 secondo la temperatura è sufficientemente bassa da consentire l'interazione fra i barioni
- Si formano i nuclei più leggeri (Elio, Deuterio, Litio)
- L'abbondanza dell'elio, del deuterio e del litio primordiali è possibile misurarla oggi e confrontarla con le previsioni dei modelli

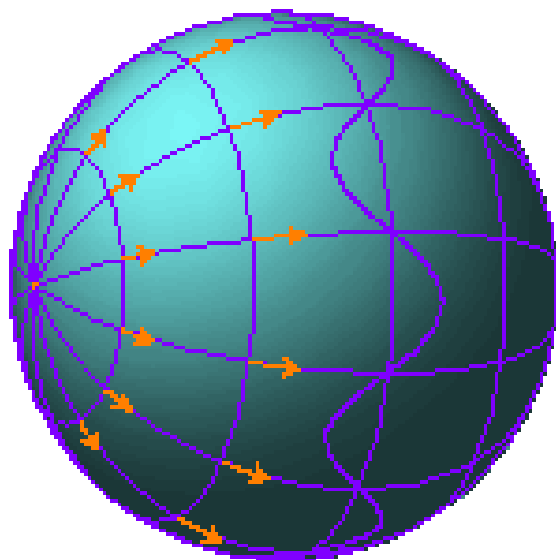
Evoluzione dell'Universo



- Dopo la nucleosintesi la materia è ionizzata (gli elettroni sono liberi).
- La radiazione interagisce con gli elettroni e non può propagarsi liberamente (universo opaco)
- A $t \sim 300000$ anni la temperatura scende < 3000 K e gli elettroni si legano ai nuclei. La materia diventa neutra e la radiazione può propagarsi (universo trasparente)

CMB – Cosmic Microwave Background

- Radiazione di corpo nero (emissione termica)
- Per effetto dell'espansione dell'universo ci aspettiamo una lunghezza d'onda spostata verso il "rosso" (red-shift) di un fattore circa 1000 (a che frequenza? A che temperatura?)
- Ci si aspetta una distribuzione essenzialmente isotropa ed omogenea



Fondo Cosmico di Microonde

1964-65, Bell Telephon Labs, New Geresy

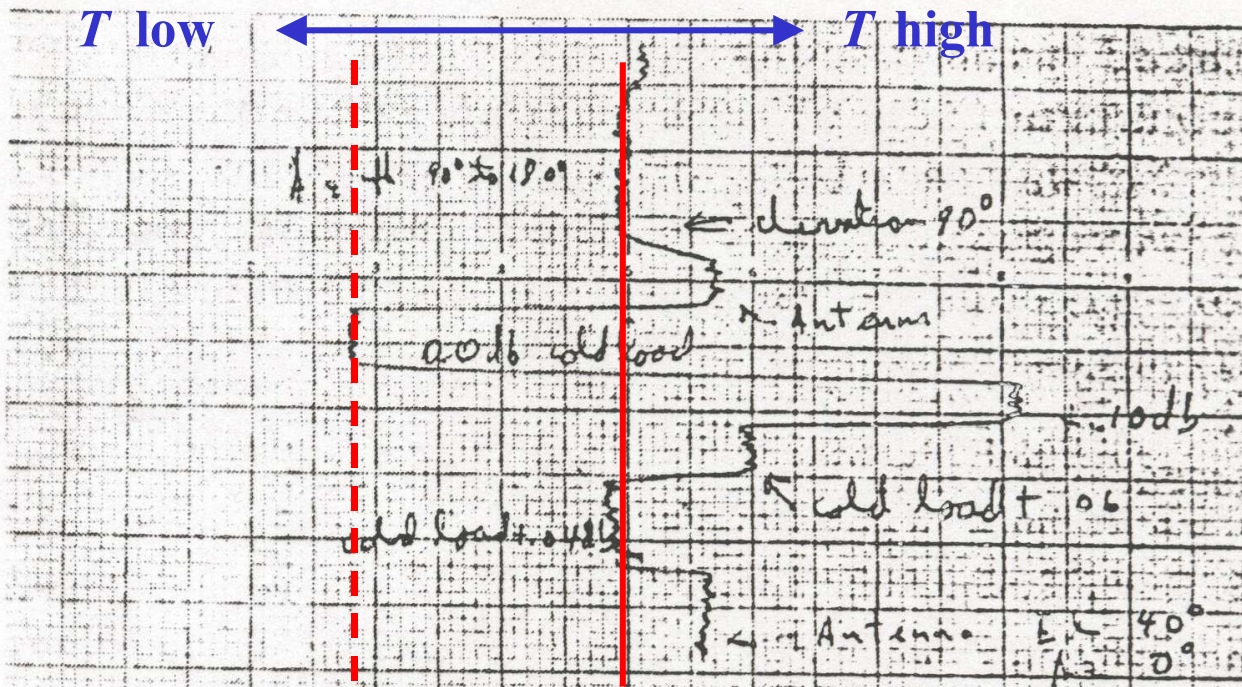
A.Penzias & R.Wilson

1978: Nobel per la Fisica



T low

T high



Calibratore Fondo del cielo

$T_{SKY} \sim 3 K$

FDT 11:15

Diode Voltages	2	6.1
#7	3	7.1
#10	4	7.4
in attenuator	5	7.4
"	6	7.4
"	7	7.4
"	8	7.4
"	9	2.9
"	10	1.9

Therm 63°F

Cas A with Cold Load

1 5/20/64

prelim card

**E' ragionevole aspettarsi anisotropie
nella CMB?**

E' ragionevole aspettarsi anisotropie nella CMB?

- Oggi l'universo è anisotropo su piccole scale (galassie, stelle, pianeti, persone, ...)
- In tempi più recenti la materia si è aggregata per effetto dell'attrazione gravitazionale: è necessario supporre l'esistenza di zone di sovradensità e di rarefazione.
- La "caccia" alle anisotropie si è aperta su larga scala nel 1992, con la pubblicazione dei risultati della missione COBE della NASA

COBE

Cosmic Background Explorer



Mission:

Launch:
November 1989

Orbit:
900 km LEO

Spinning
Spacecraft

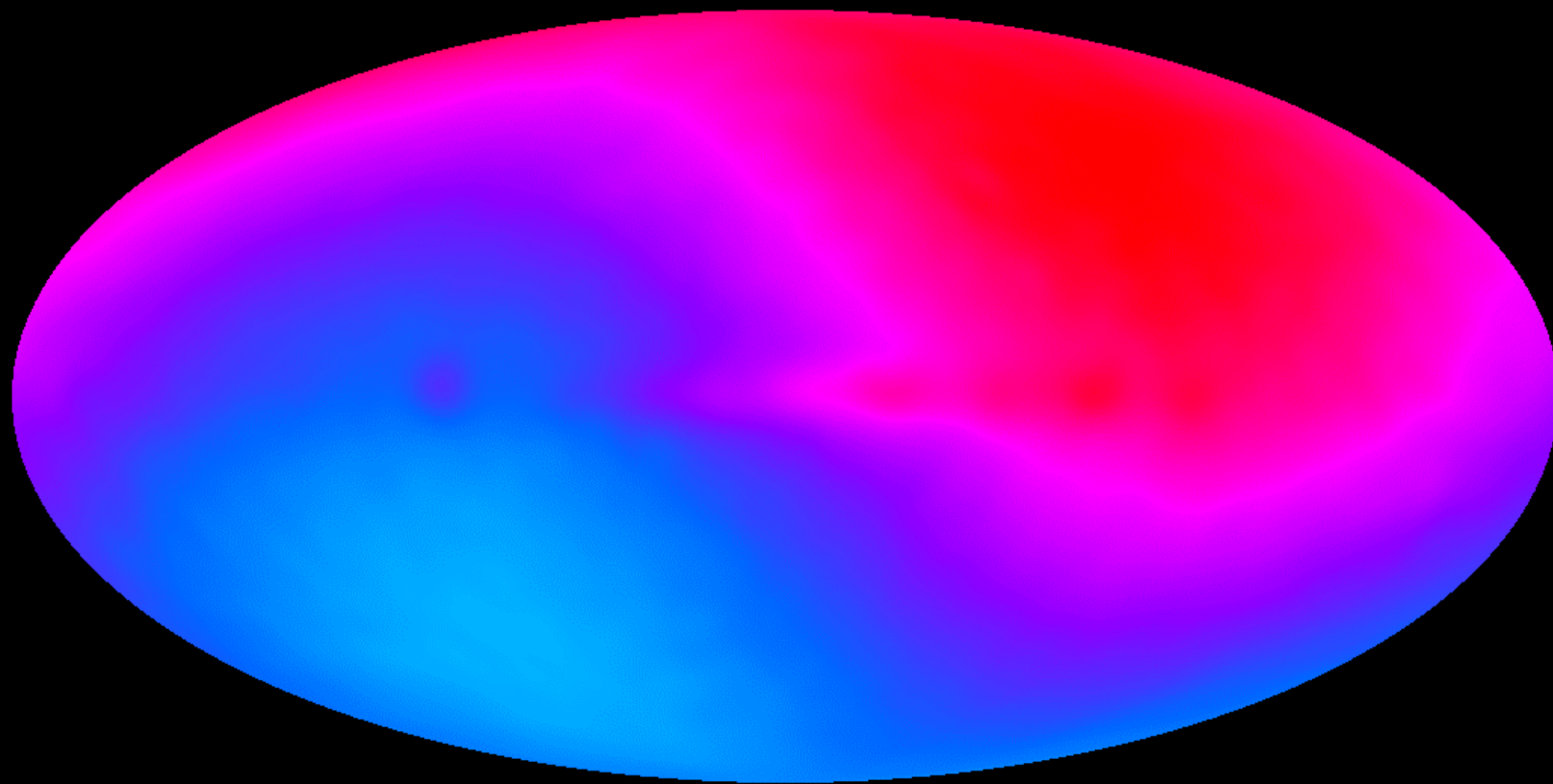
Experiments:

DMR:
CMB Anisotropy

FIRAS:
CMB Spectrum

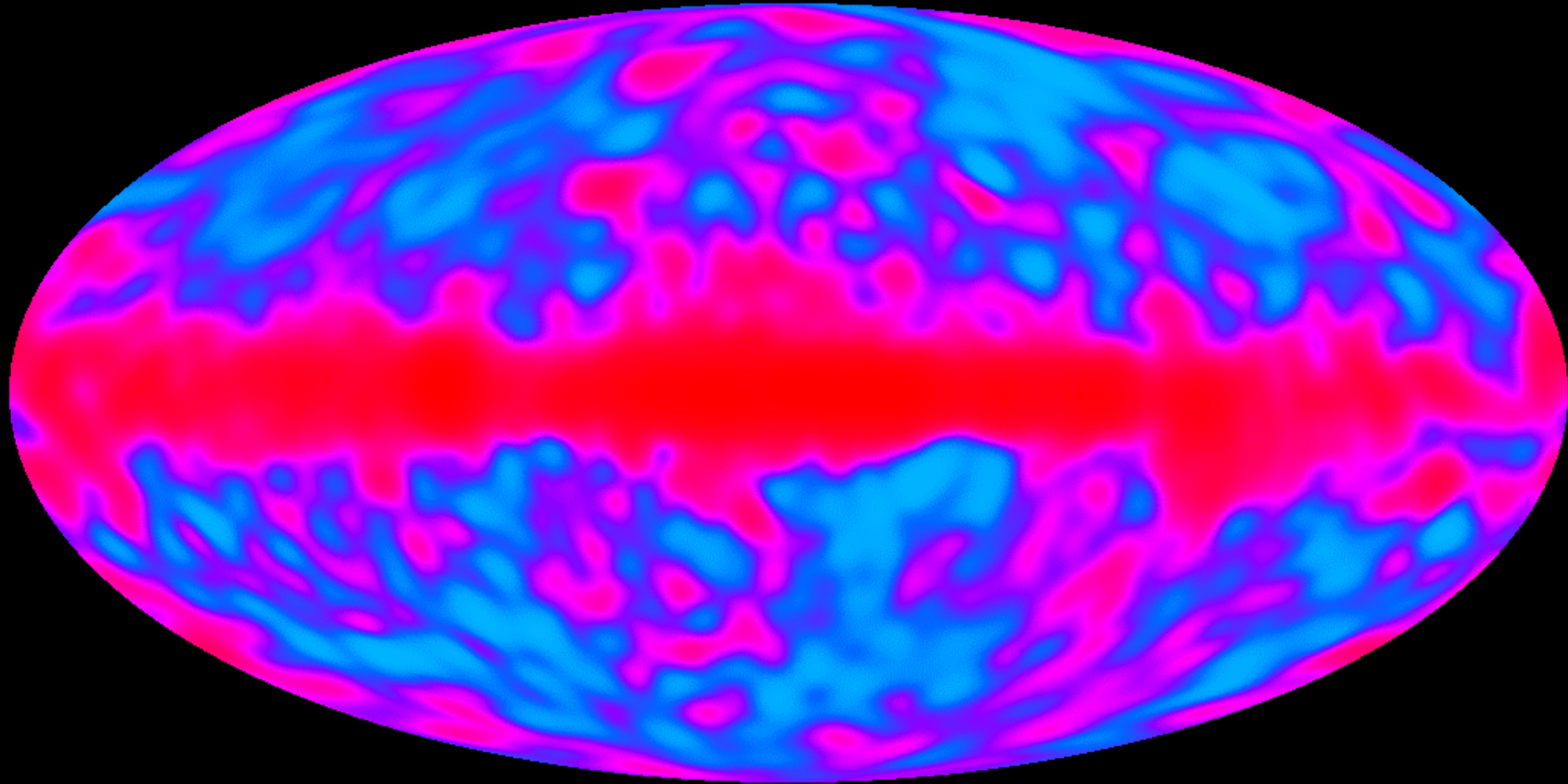
DIRBE:
IR Background

DMR 53 GHz Maps



Dipole-dominated map
 $\Delta T \sim \pm 3.5 \text{ mK}$

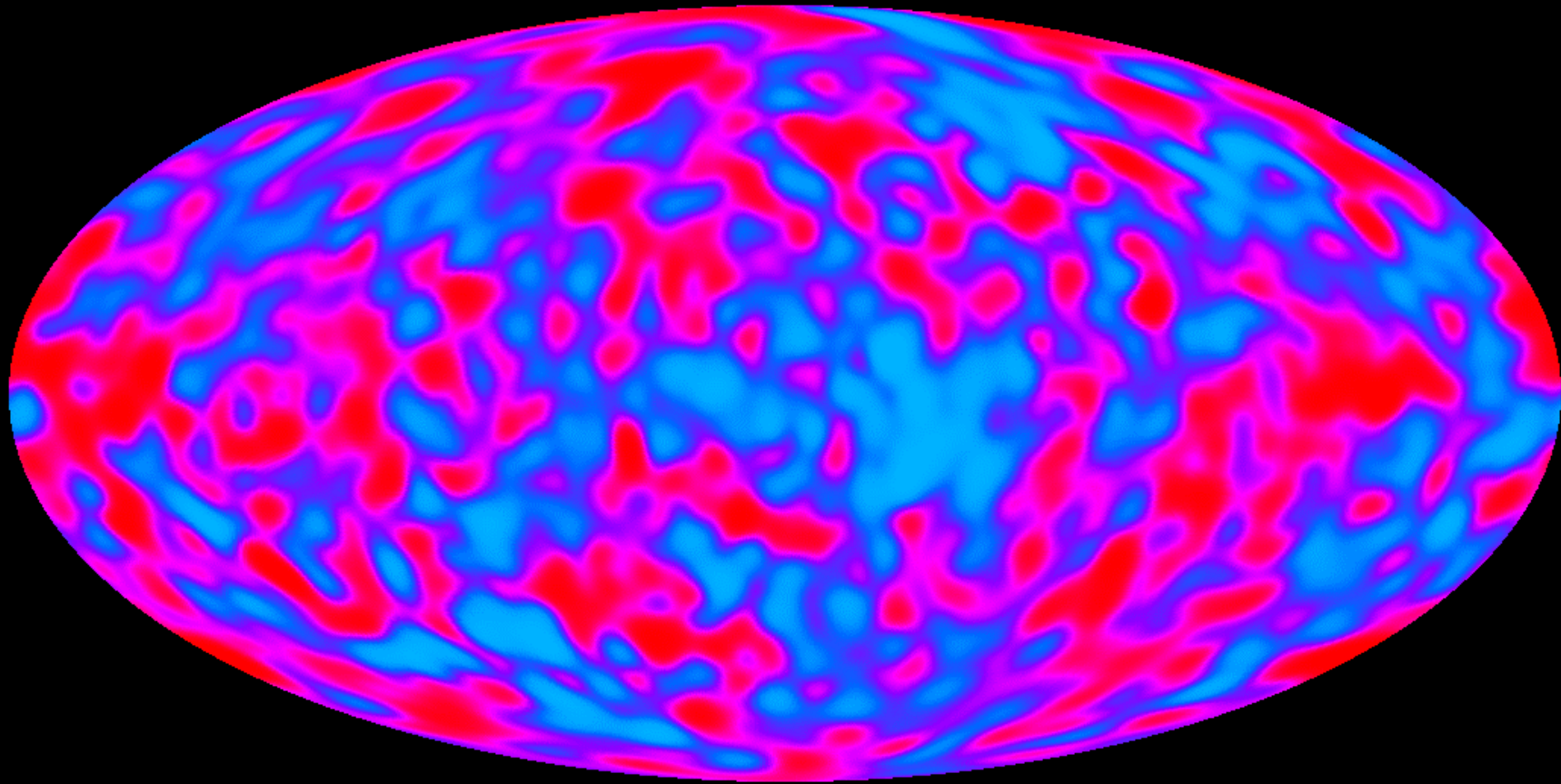
DMR 53 GHz Maps



Fluctuations from *Galaxy*,
background and instrument noise
 $\Delta T \sim \pm 0.1 \text{ mK}$

DMR 53 GHz Maps

La prima "immagine" dell'universo primordiale

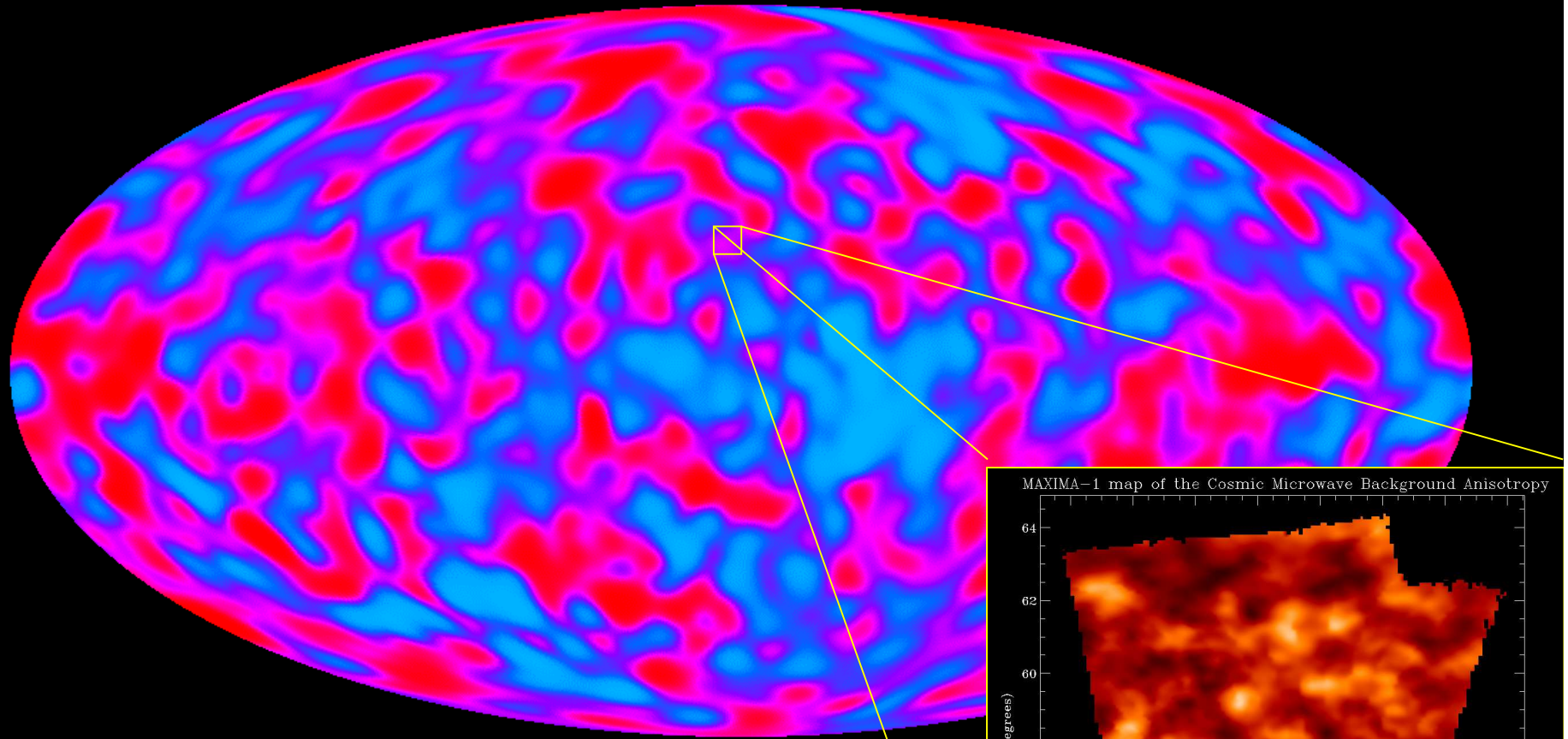


Fluctuations from CMB
(with instrument noise)

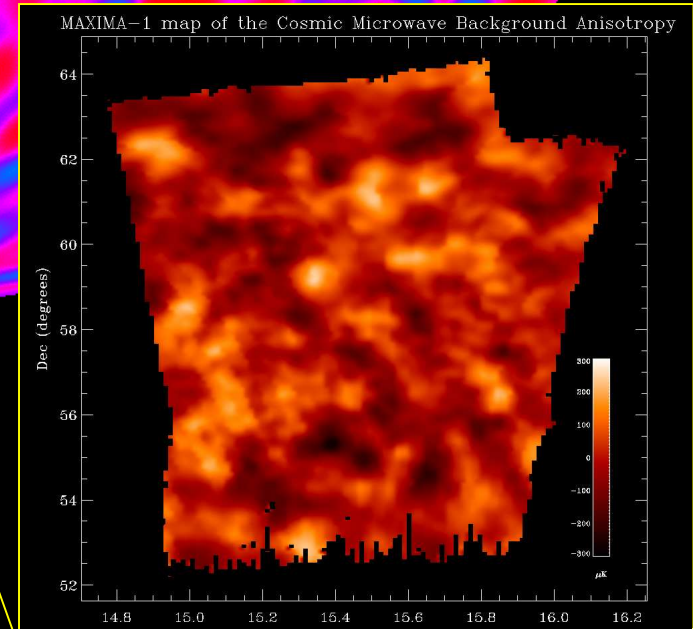
$$\Delta T_{\text{CMB}} \sim \pm 35 \text{ mK}$$

DMR 53 GHz Maps

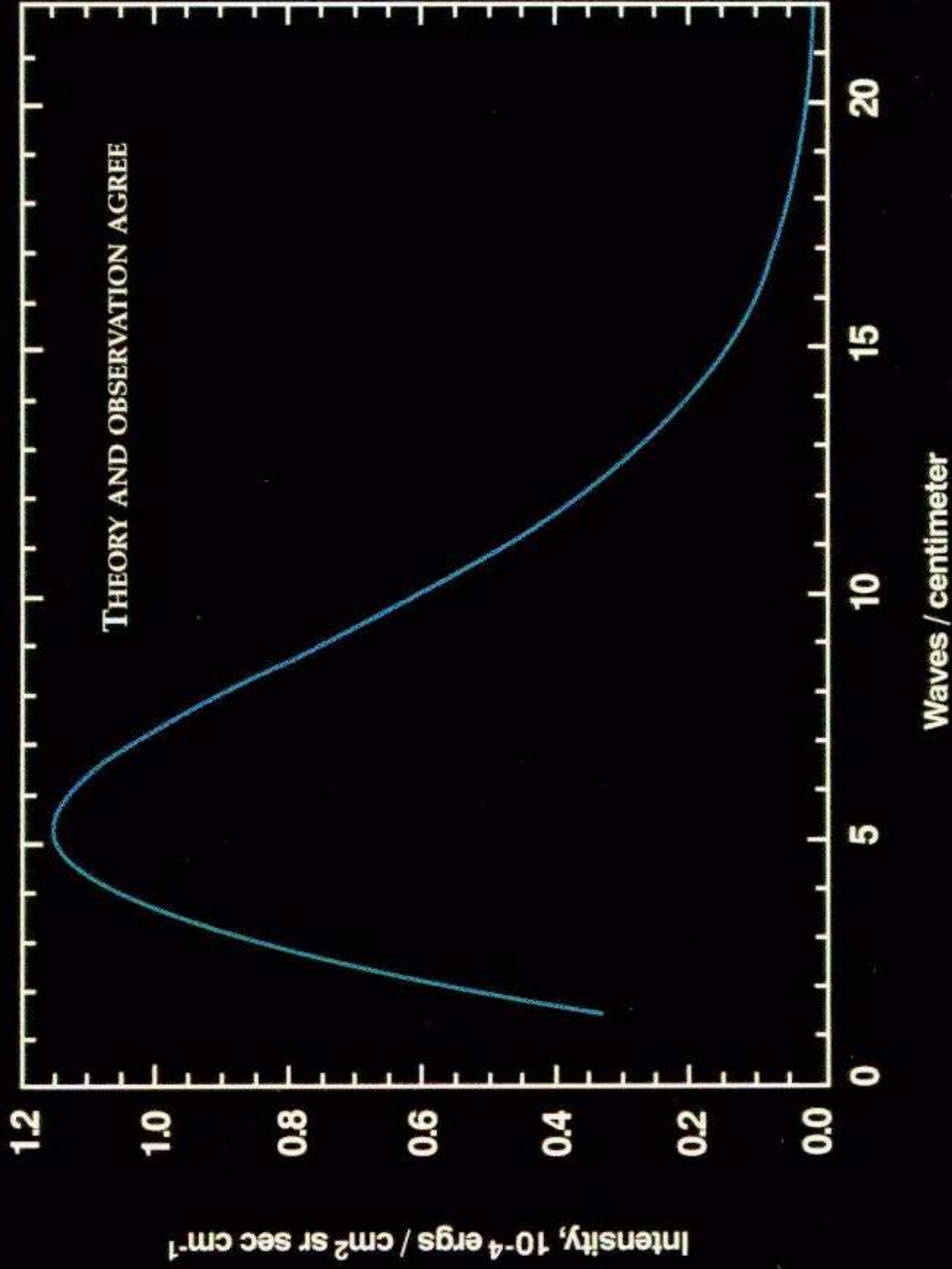
La prima "immagine" dell'universo primordiale

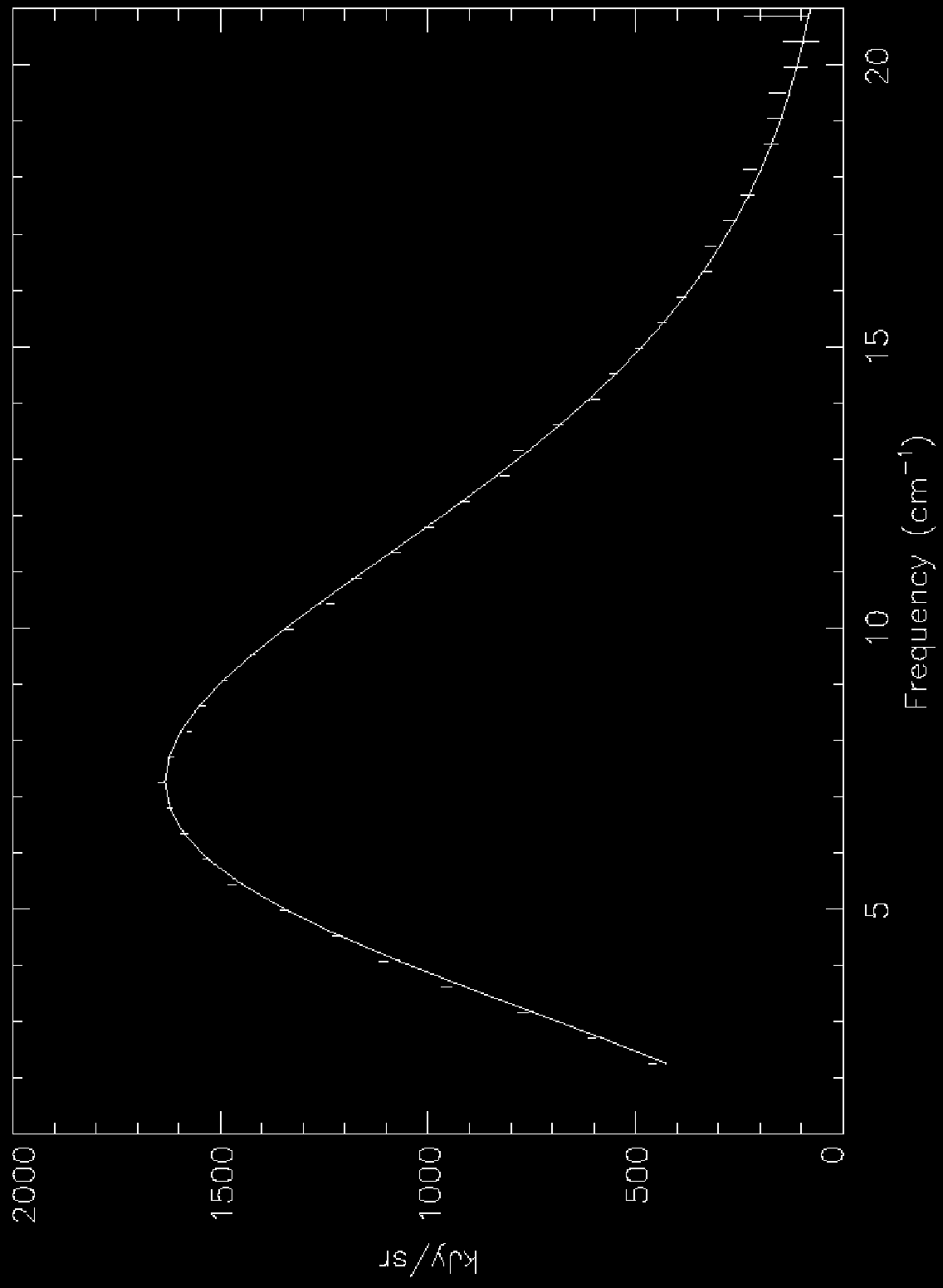


Boomerang, Maxima,
DASI, CBI, ...



COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE





Che informazioni ci dà una mappa di anisotropie di CMB?

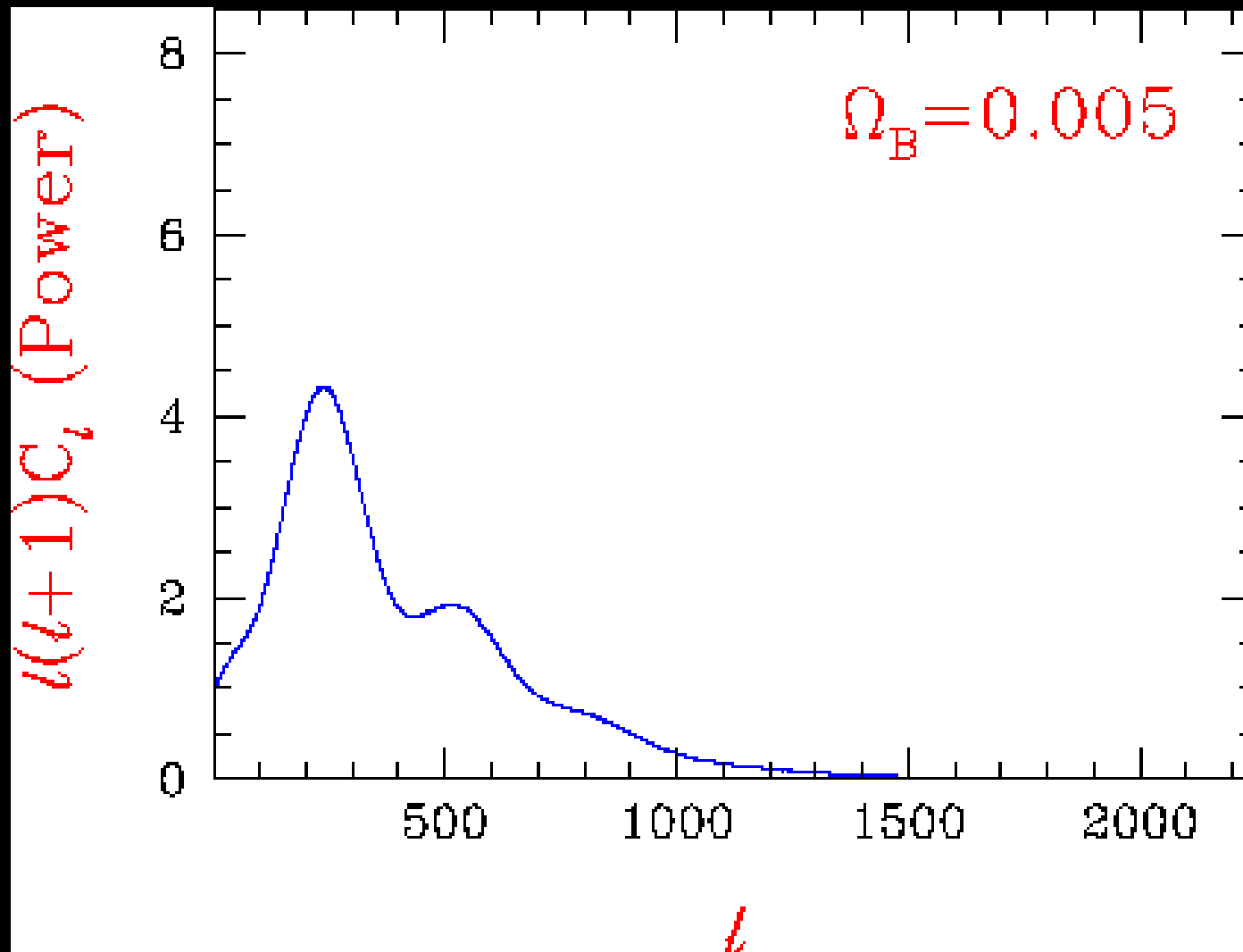
Scale angolari “fini” \longrightarrow



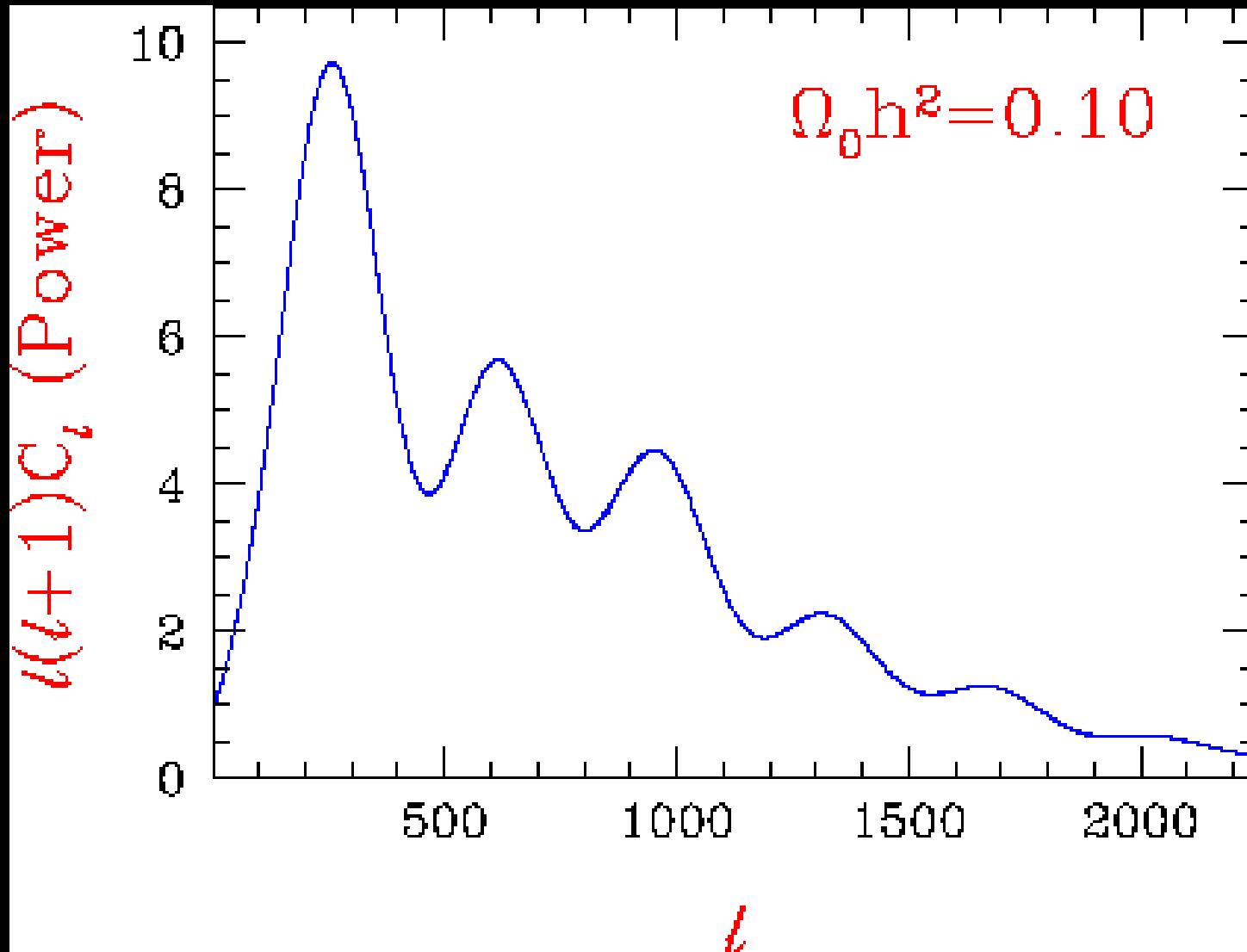
A cosa serve lo spettro di potenza?

- La "forma" dello spettro di potenza riflette la distribuzione di materia e radiazione all'epoca disaccoppiamento
- Dipende dai "parametri cosmologici", gli ingredienti costitutivi dell'Universo
- Una misura accurata dello spettro di potenza consente di determinare con grande precisione (dell'ordine del %) molti parametri cosmologici

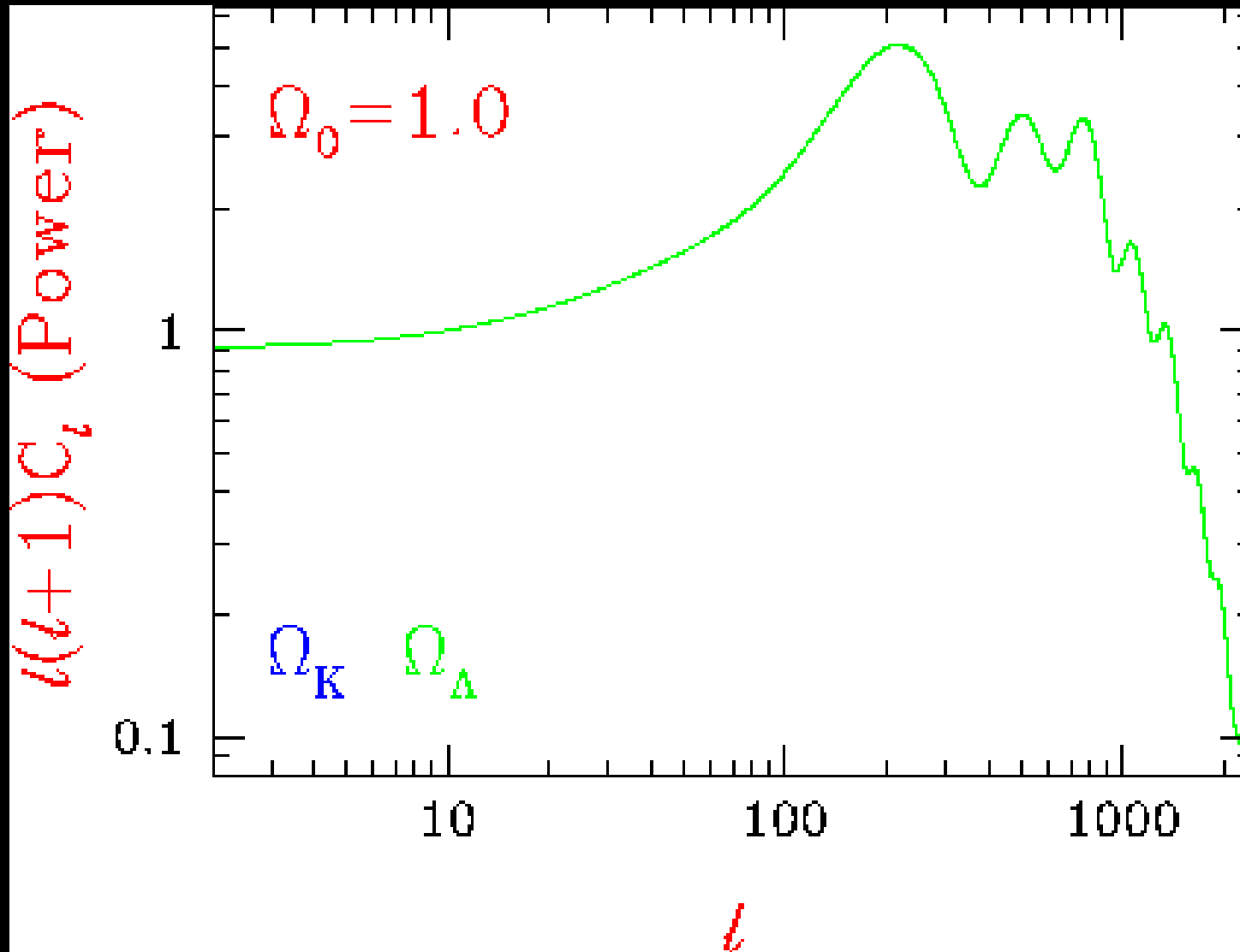
A cosa serve lo spettro di potenza?



A cosa serve lo spettro di potenza?



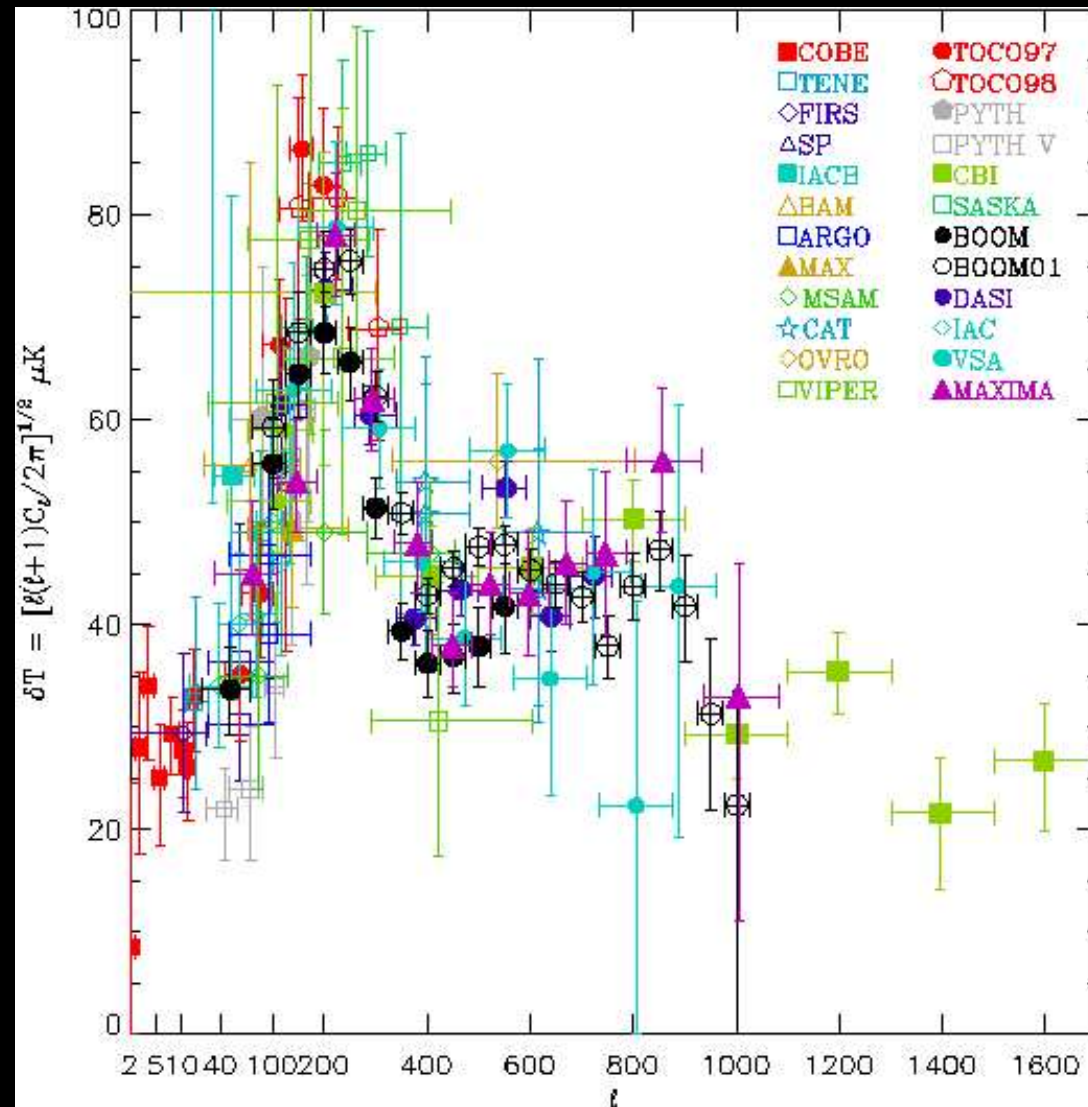
A cosa serve lo spettro di potenza?



Misure sperimentali dello spettro di potenza da COBE a MAP

Misure estremamente delicate

- Segnale molto piccolo
- Contaminazione atmosferica
- Necessarie misure da satellite



Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevata risoluzione angolare ($l \sim 1500 \Rightarrow q \sim 5-7'$)
- Elevato rapporto segnale-rumore ($\sim 10, \Rightarrow \sigma_{\text{pix}} \sim 5 \mu\text{K}/\text{pixel}$)
- Ampia copertura del cielo
- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)
- Contaminazione da errori sistematici al livello del $\sim 10\%$ del rumore strumentale ($< 1 \mu\text{K}/\text{pixel}$)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevata risoluzione angolare ($l \sim 1500 \Rightarrow q \sim 5-7'$)
- Elevato rapporto segnale-rumore ($\sim 10, \Rightarrow \sigma_{\text{pix}} \sim 5 \mu\text{K}/\text{pixel}$)
- Ampia copertura del cielo
- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)
- Contaminazione da errori sistematici al livello del $\sim 10\%$ del rumore strumentale ($< 1 \mu\text{K}/\text{pixel}$)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevata risoluzione angolare ($l \sim 1500 \Rightarrow q \sim 5-7'$)
- Elevato rapporto segnale-rumore ($\sim 10, \Rightarrow \sigma_{\text{pix}} \sim 5 \mu\text{K}/\text{pixel}$)
- Ampia copertura del cielo
- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)
- Contaminazione da errori sistematici al livello del $\sim 10\%$ del rumore strumentale ($< 1 \mu\text{K}/\text{pixel}$)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevata risoluzione angolare ($l \sim 1500 \Rightarrow q \sim 5-7'$)
- Elevato rapporto segnale-rumore ($\sim 10, \Rightarrow \sigma_{\text{pix}} \sim 5 \mu\text{K}/\text{pixel}$)
- Ampia copertura del cielo
- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)
- Contaminazione da errori sistematici al livello del $\sim 10\%$ del rumore strumentale ($< 1 \mu\text{K}/\text{pixel}$)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevata risoluzione angolare ($l \sim 1500 \Rightarrow q \sim 5-7'$)
- Elevato rapporto segnale-rumore ($\sim 10, \Rightarrow \sigma_{\text{pix}} \sim 5 \mu\text{K}/\text{pixel}$)
- Ampia copertura del cielo
- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)
- Contaminazione da errori sistematici al livello del $\sim 10\%$ del rumore strumentale ($< 1 \mu\text{K}/\text{pixel}$)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevata risoluzione angolare ($l \sim 1500 \Rightarrow q \sim 5-7'$)
 \Rightarrow Antenna a riflettore (telescopio)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Elevato rapporto segnale-rumore (~ 10 , $\Rightarrow \sigma_{\text{pix}} \sim 5 \mu\text{K}/\text{pixel}$)
 - \Rightarrow Schiere di ricevitori criogenici (basso rumore) a larga banda (bolometri, ricevitori coerenti)
 - \Rightarrow Lunghi tempi di integrazione

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Ampia copertura del cielo

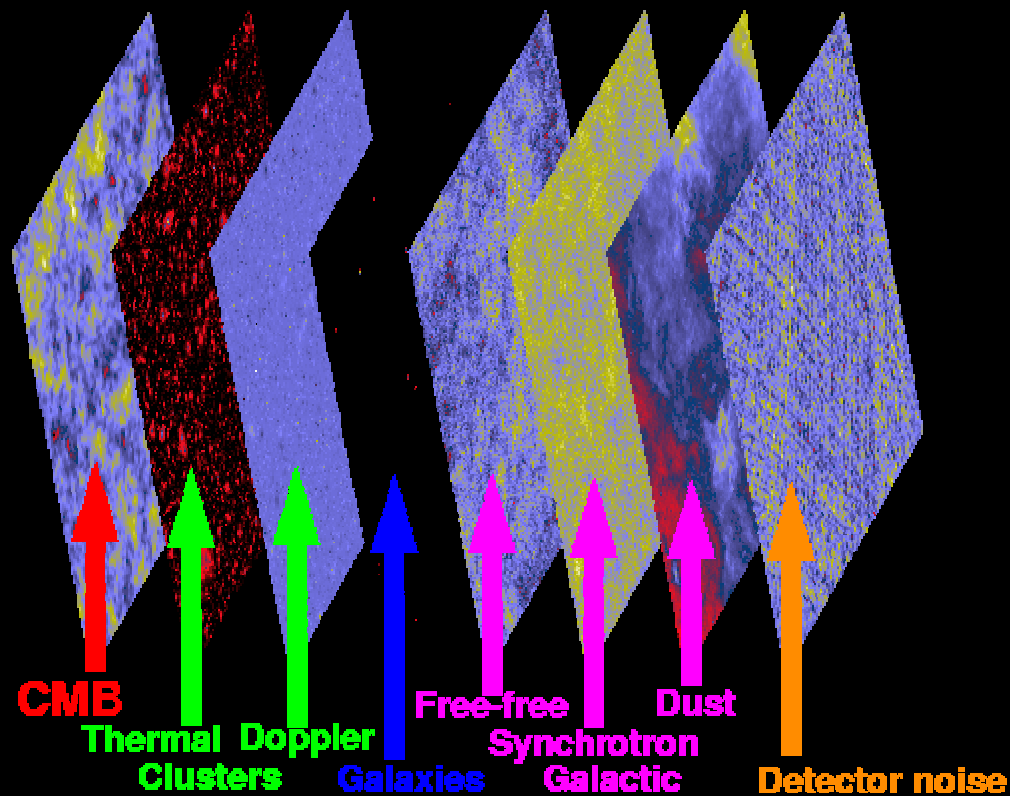
⇒ Missione spaziale

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

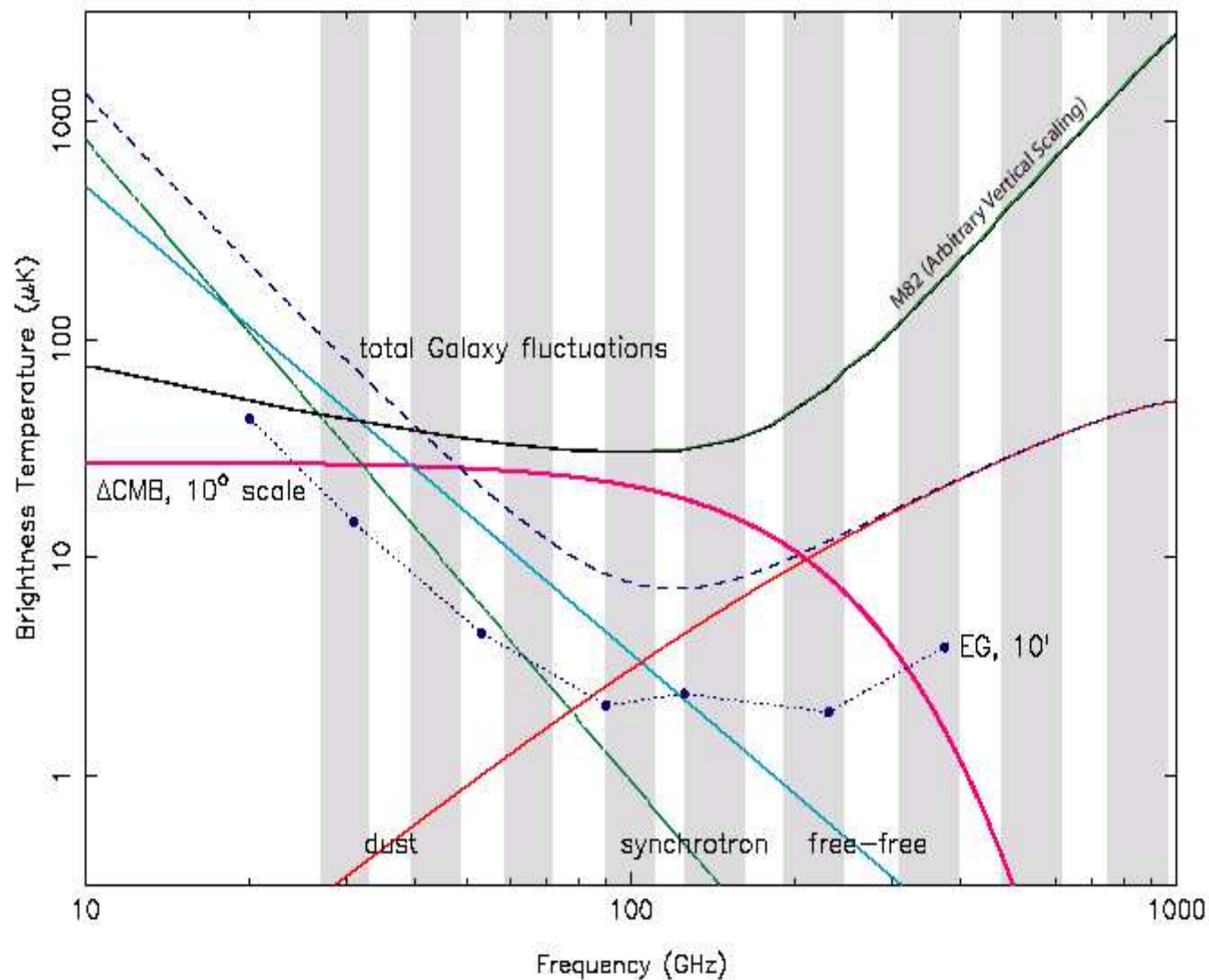
- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)



Requisiti sperimentali per misure “di precisione”



Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

- Possibilità di rimuovere segnali di “foreground” (segnali galattici ed extragalattici)

=> Ampia copertura in frequenza

Requisiti sperimentali per misure “di precisione”

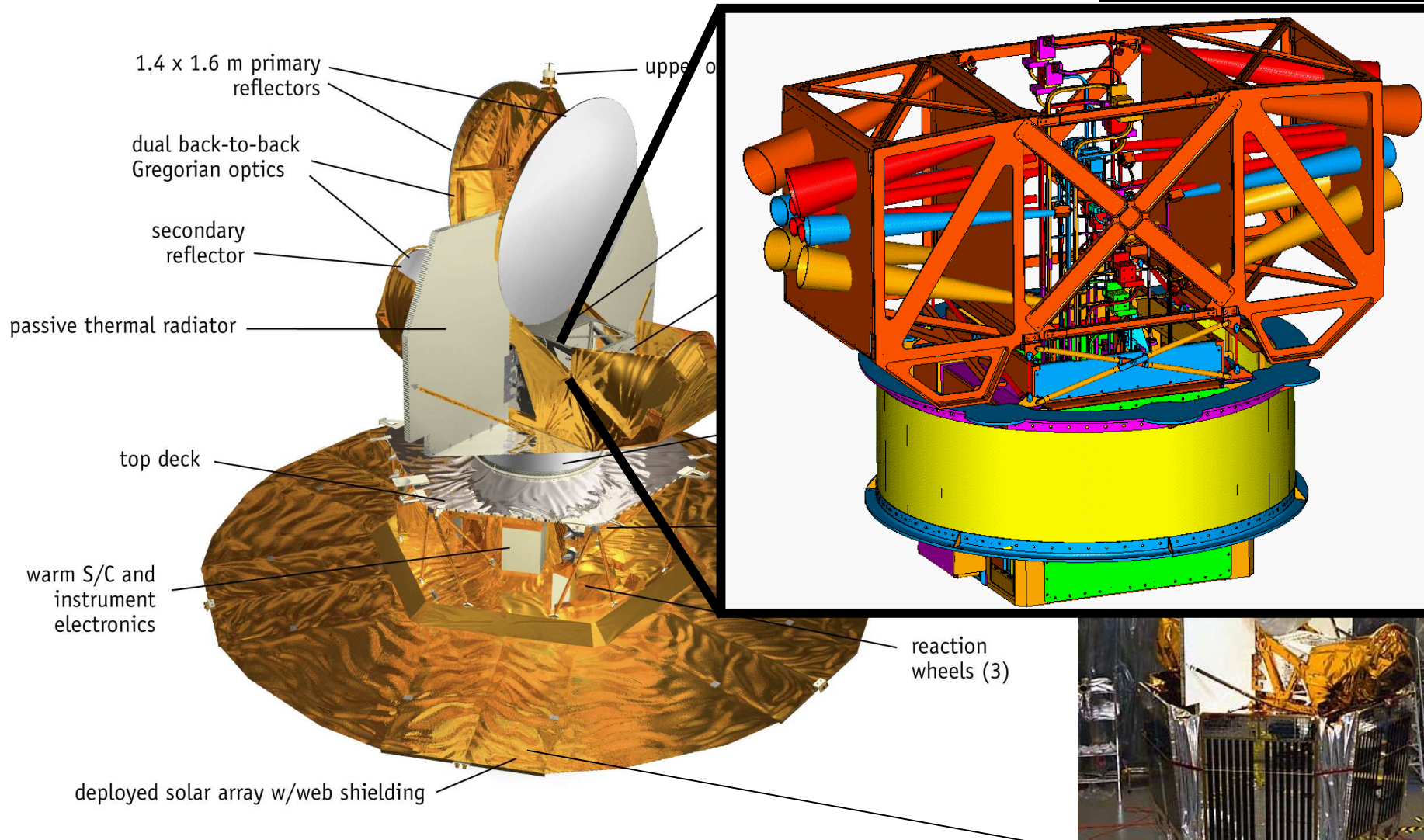
- Contaminazione da errori sistematici al livello del ~10% del rumore strumentale ($< 1 \mu\text{K}/\text{pixel}$)

⇒ Orbita termicamente stabile,

⇒ Hardware intrinsecamente stabile

⇒ Software di analisi dati in grado di riconoscere ed eliminare effetti sistematici residui

NASA WMAP Satellite Overview

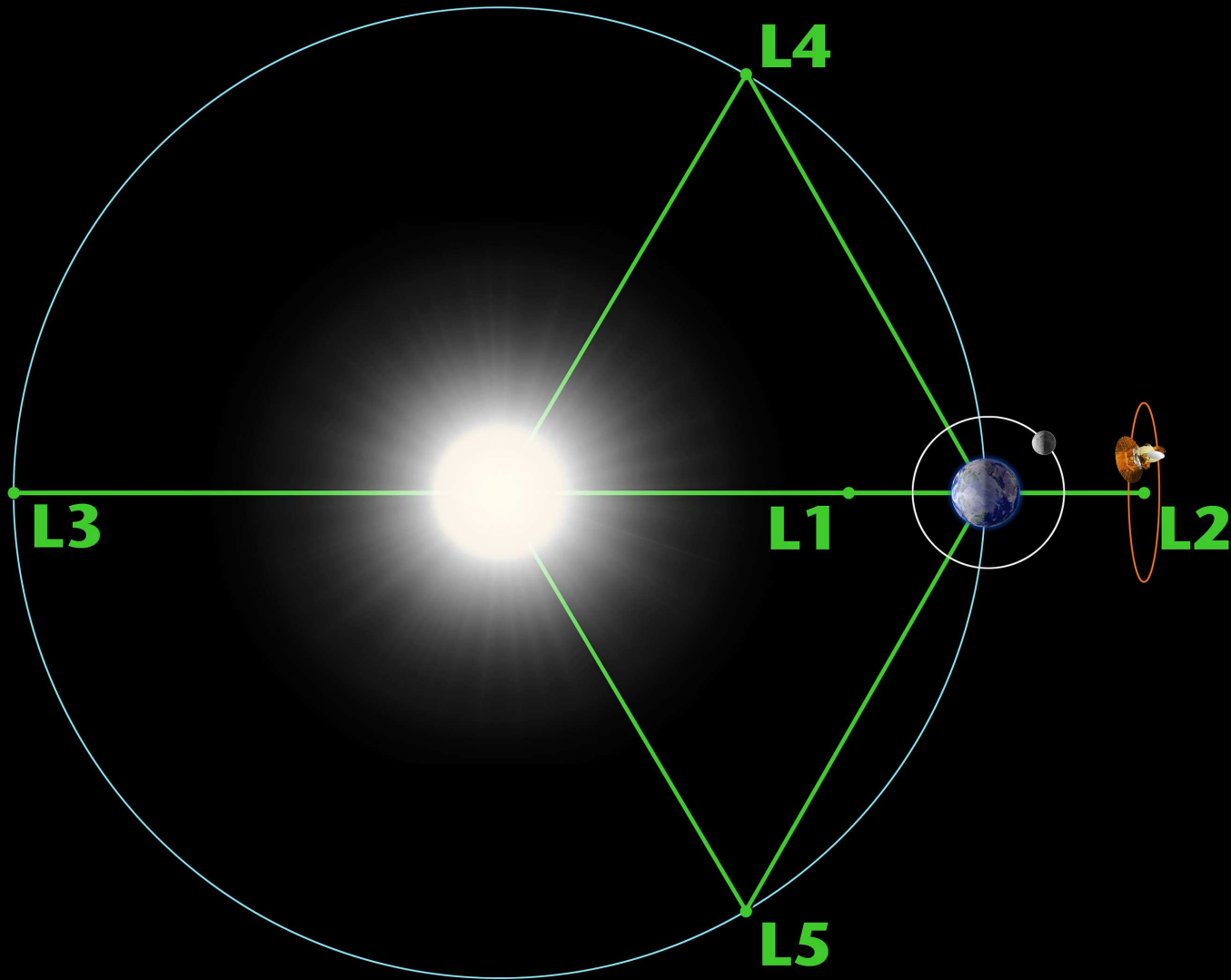


Launched June 2001

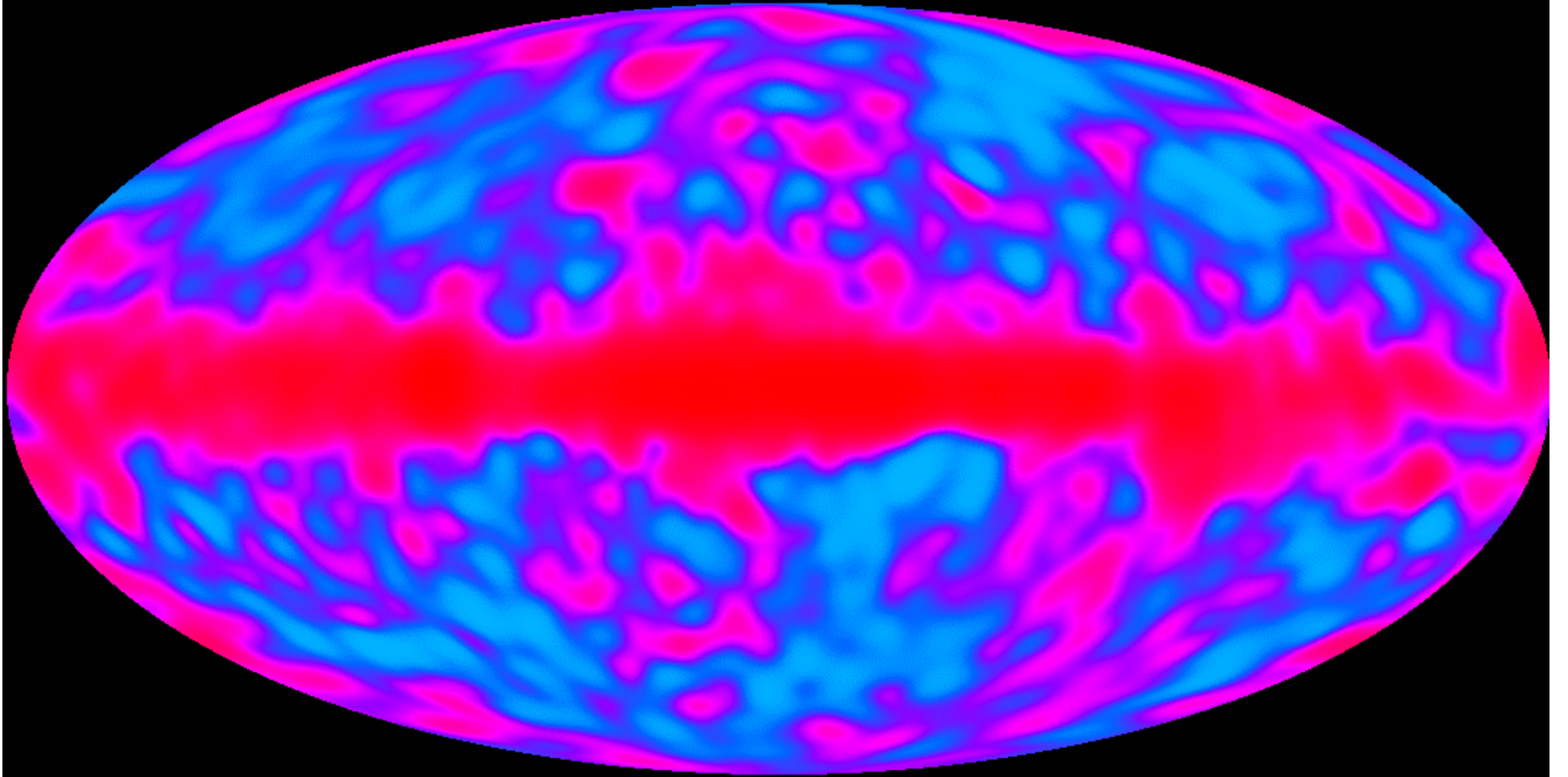


Sun-Earth L2 Orbits

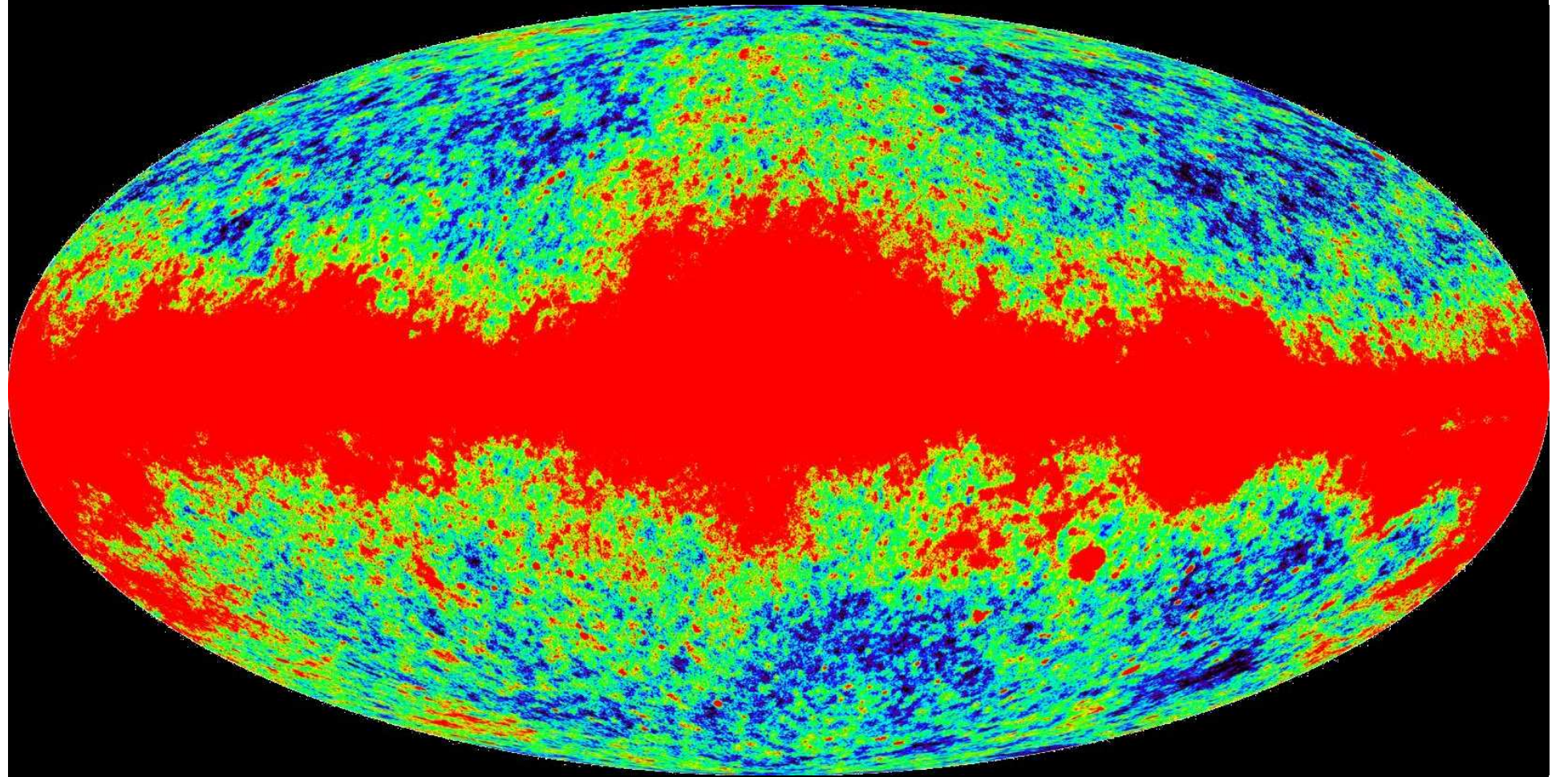
MAP – PLANCK – HERSCHEL – NGST



From COBE...

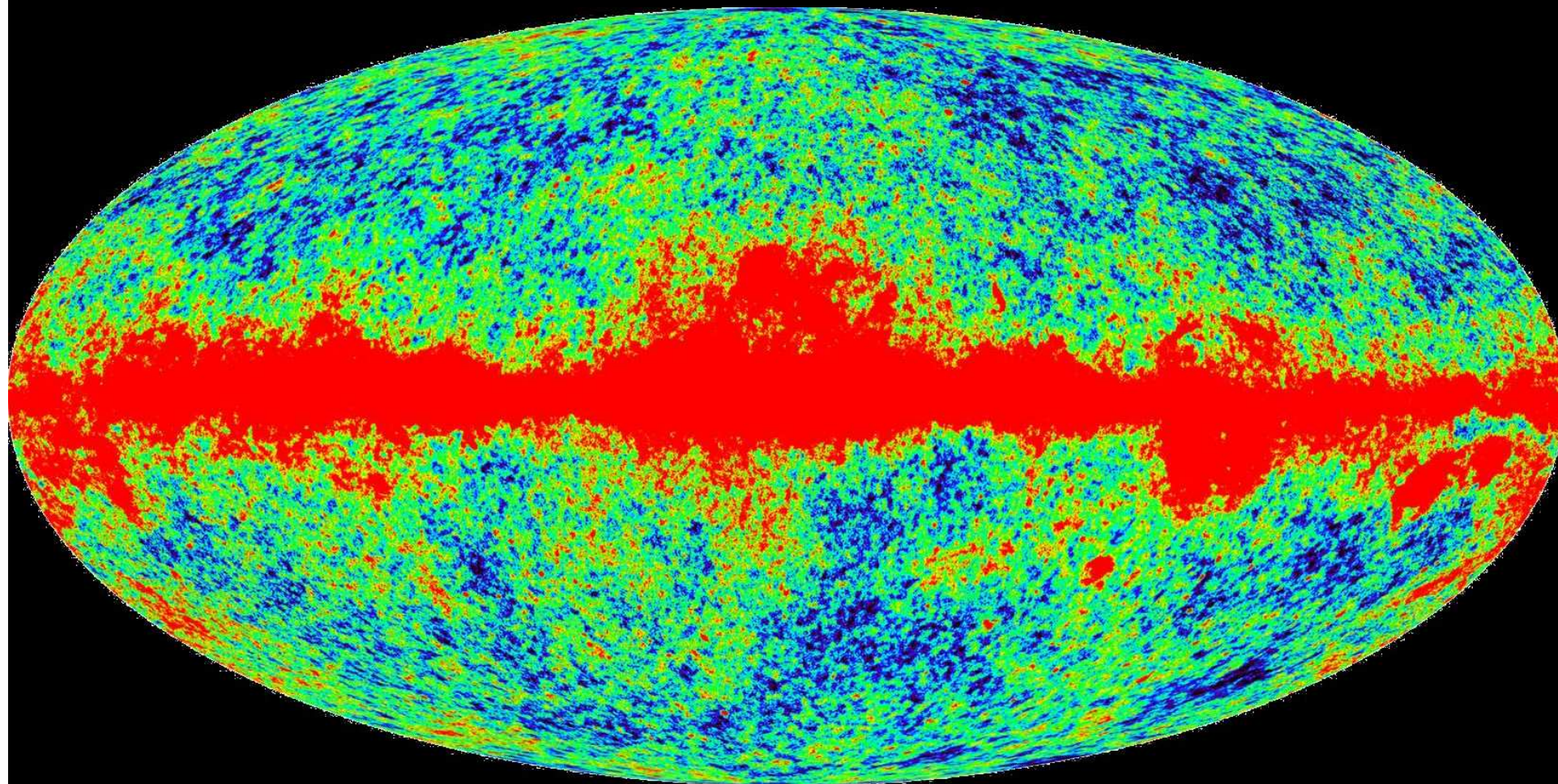


... to WMAP



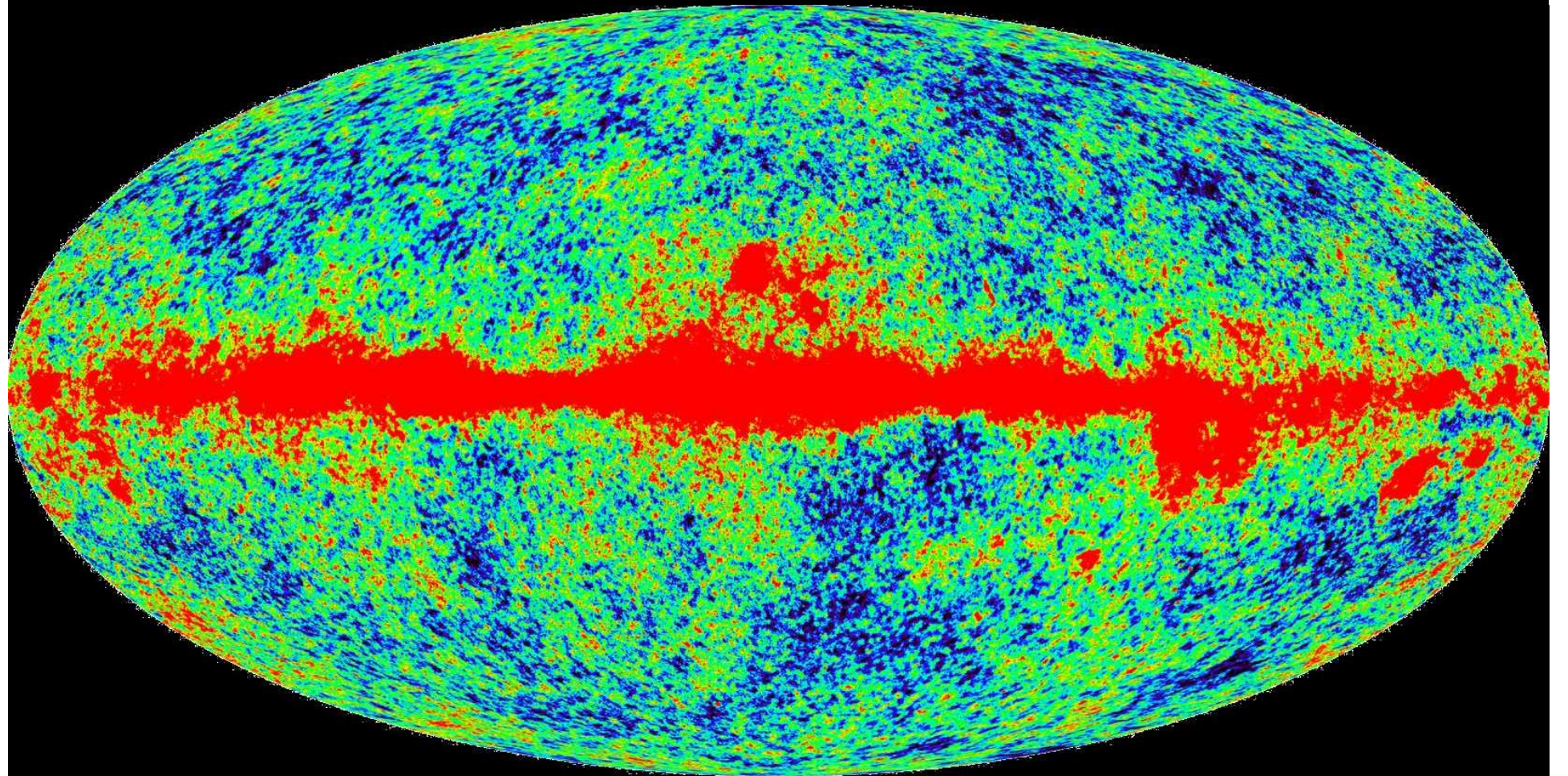
22 GHz

... to WMAP



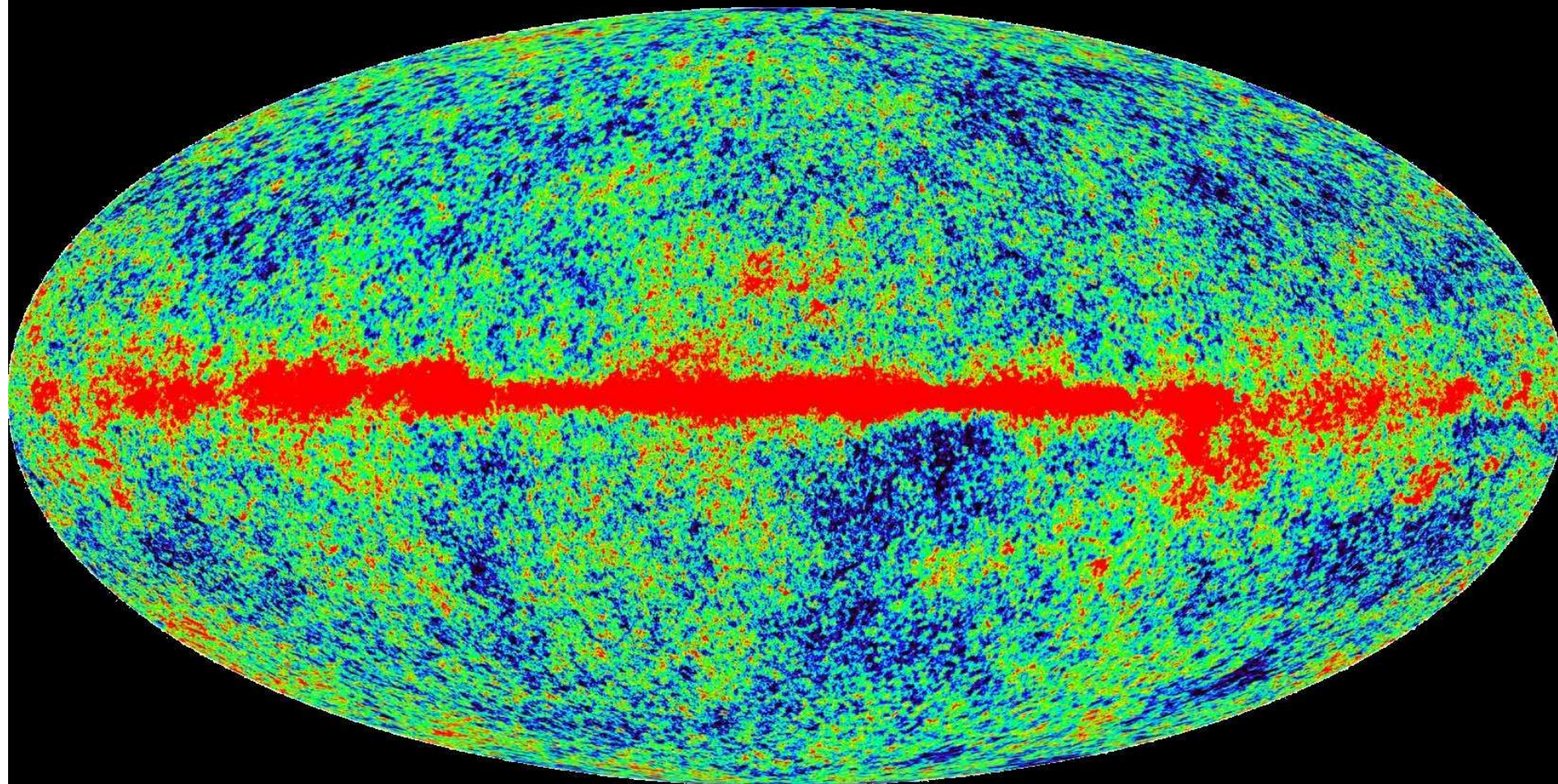
30 GHz

... to WMAP



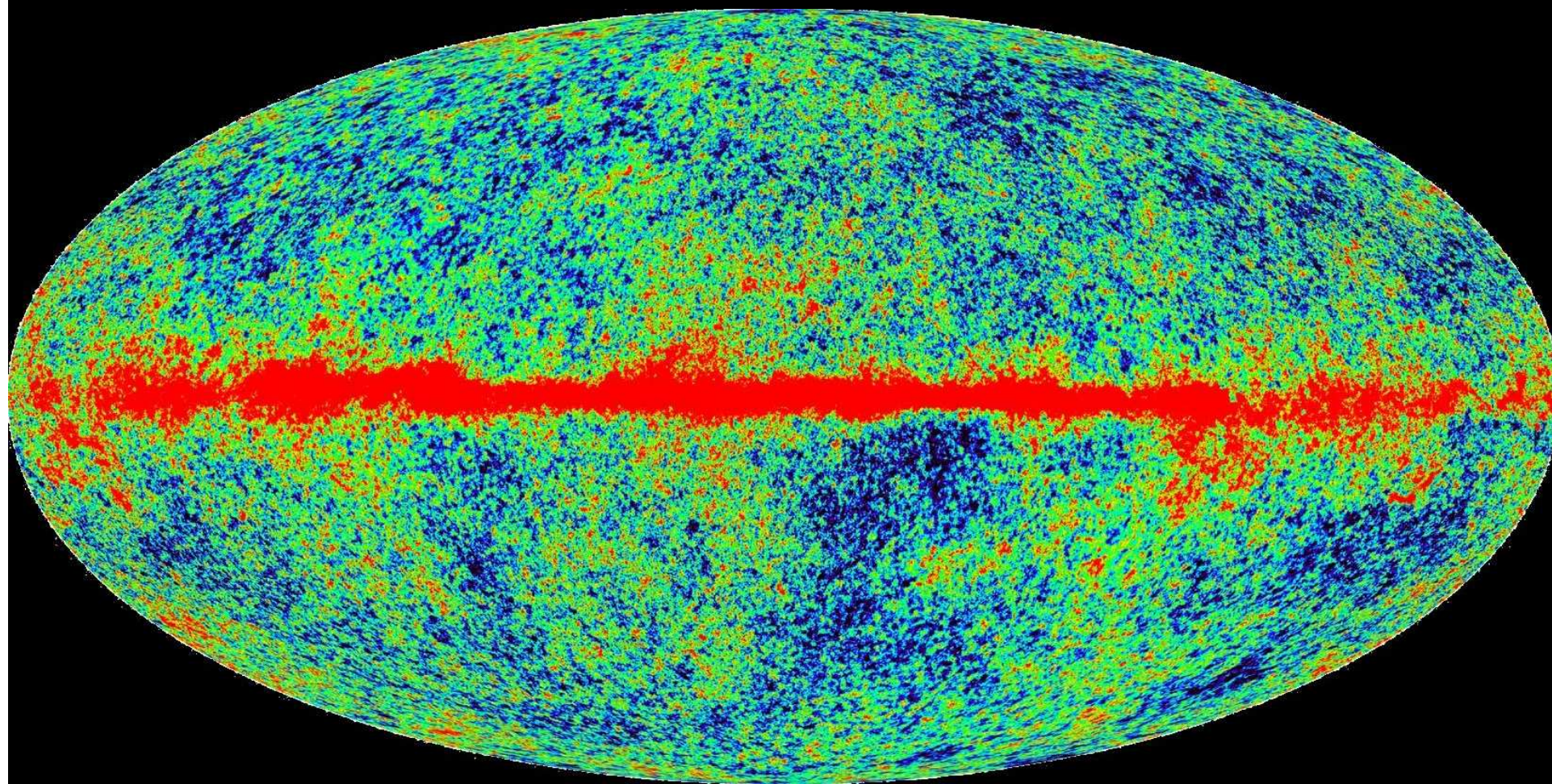
40 GHz

... to WMAP



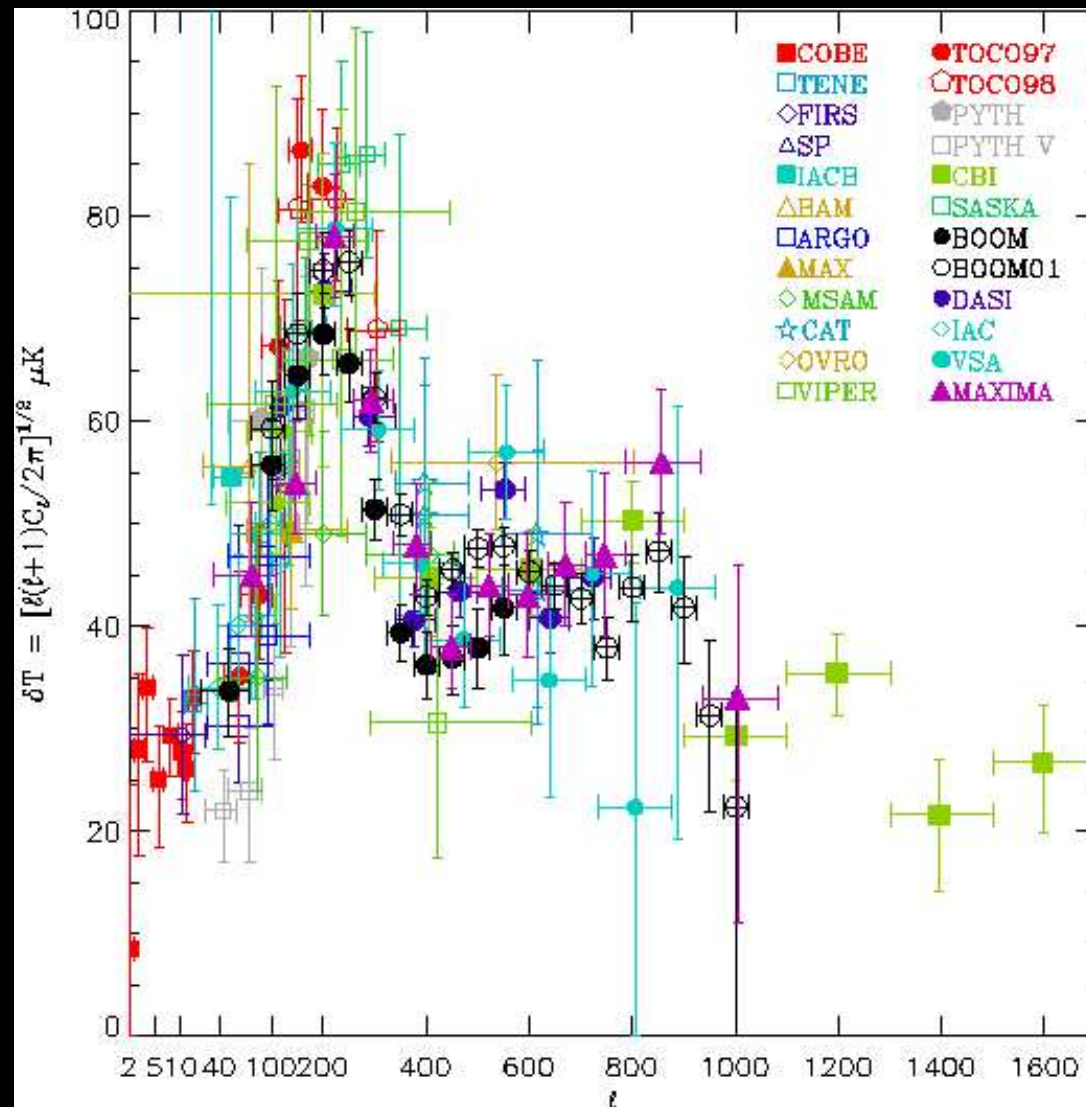
60 GHz

... to WMAP

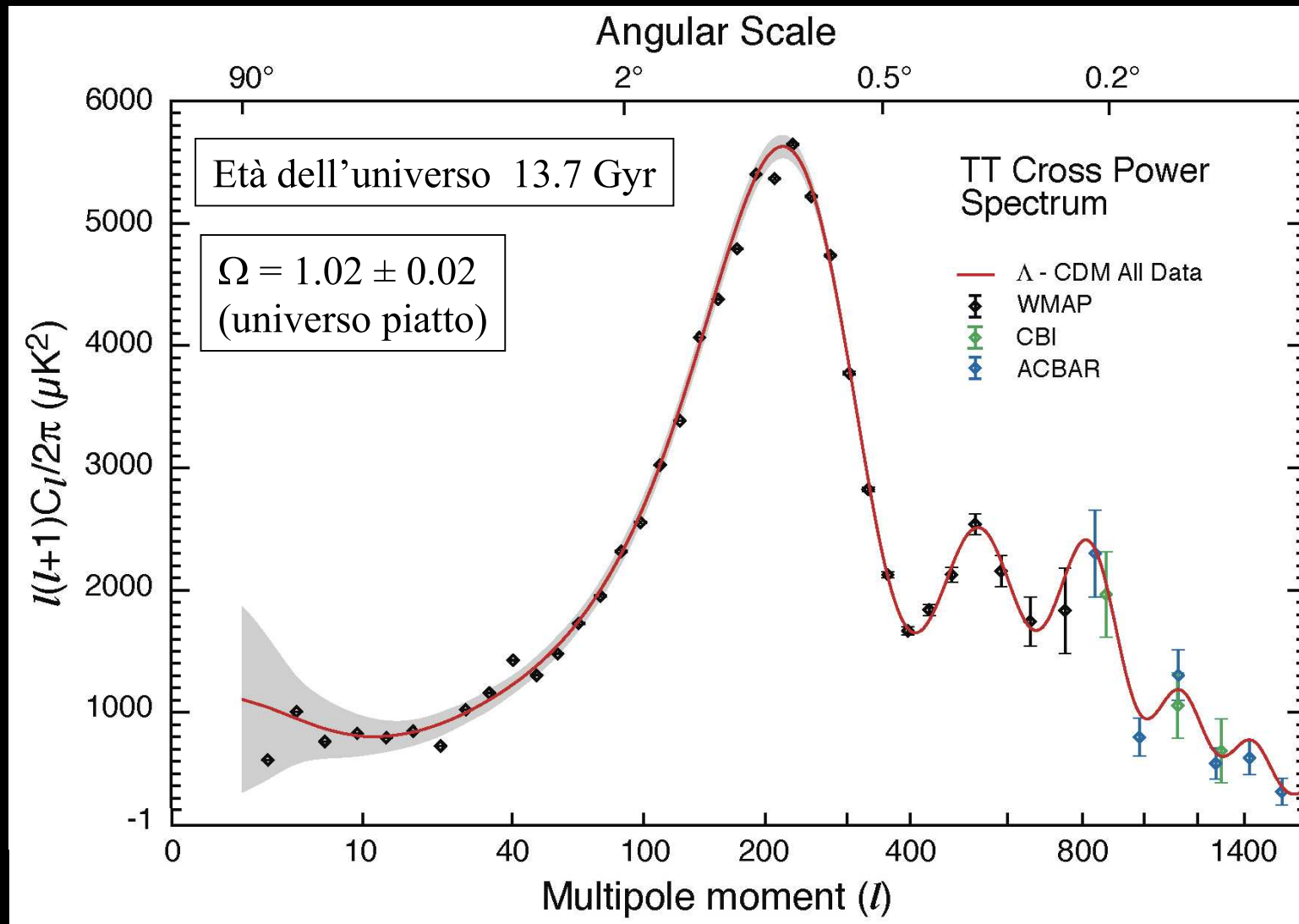


90 GHz

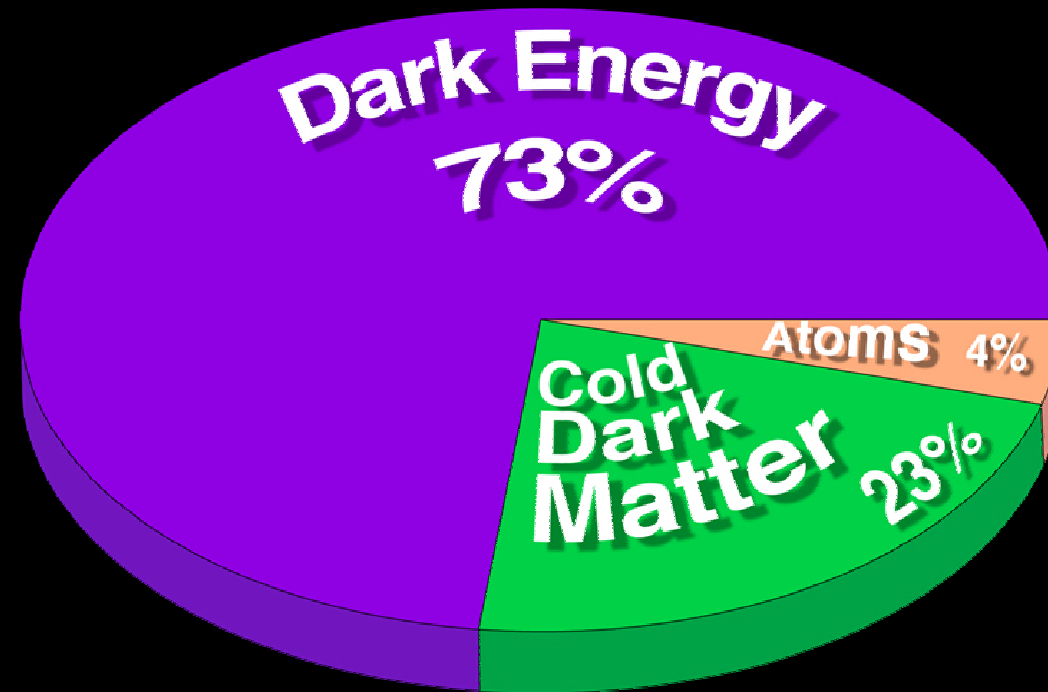
... come cambia lo spettro di potenza



... come cambia lo spettro di potenza



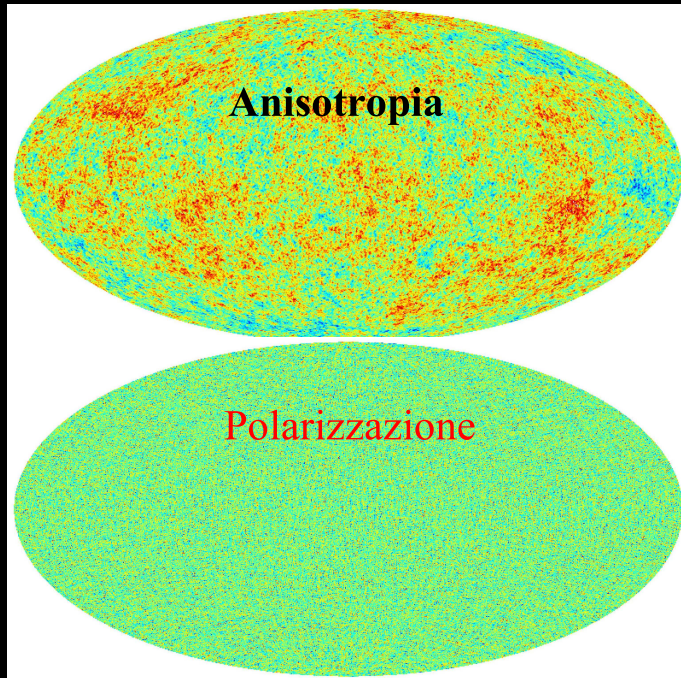
The WMAP pie



La missione Planck (ESA)

Obiettivo principale

- Osservazione “definitiva” delle anisotropie CMB
- Estrazione accurata dei parametri cosmologici dal power spectrum



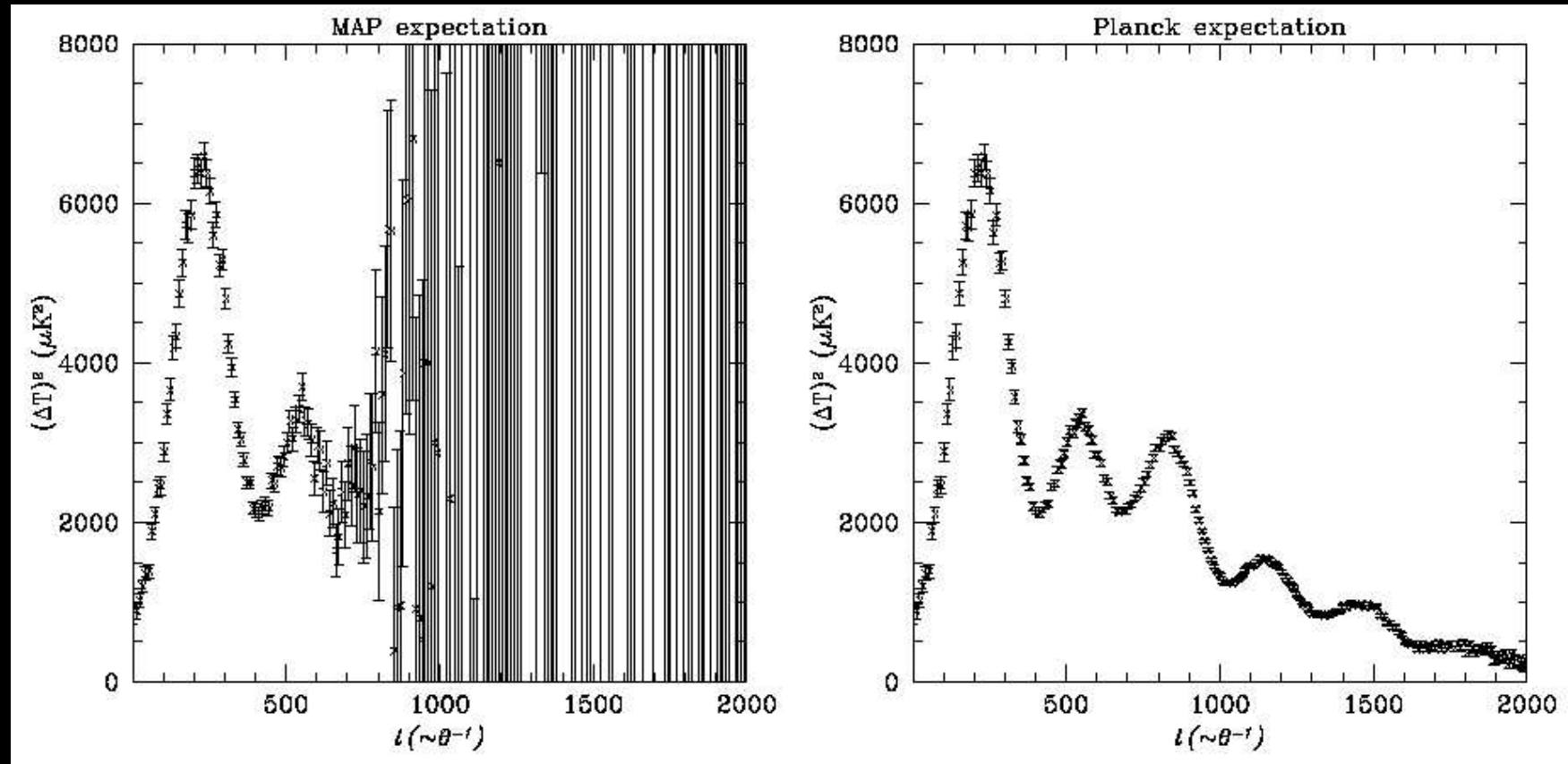
Obiettivi “secondari”

- Effetto SZ
- Sorgenti extragalattiche
 - *IR sources*
 - *Radio sources*
- Emissione galattica diffusa
 - *sincrotrone*
 - *free-free*
 - *polveri*

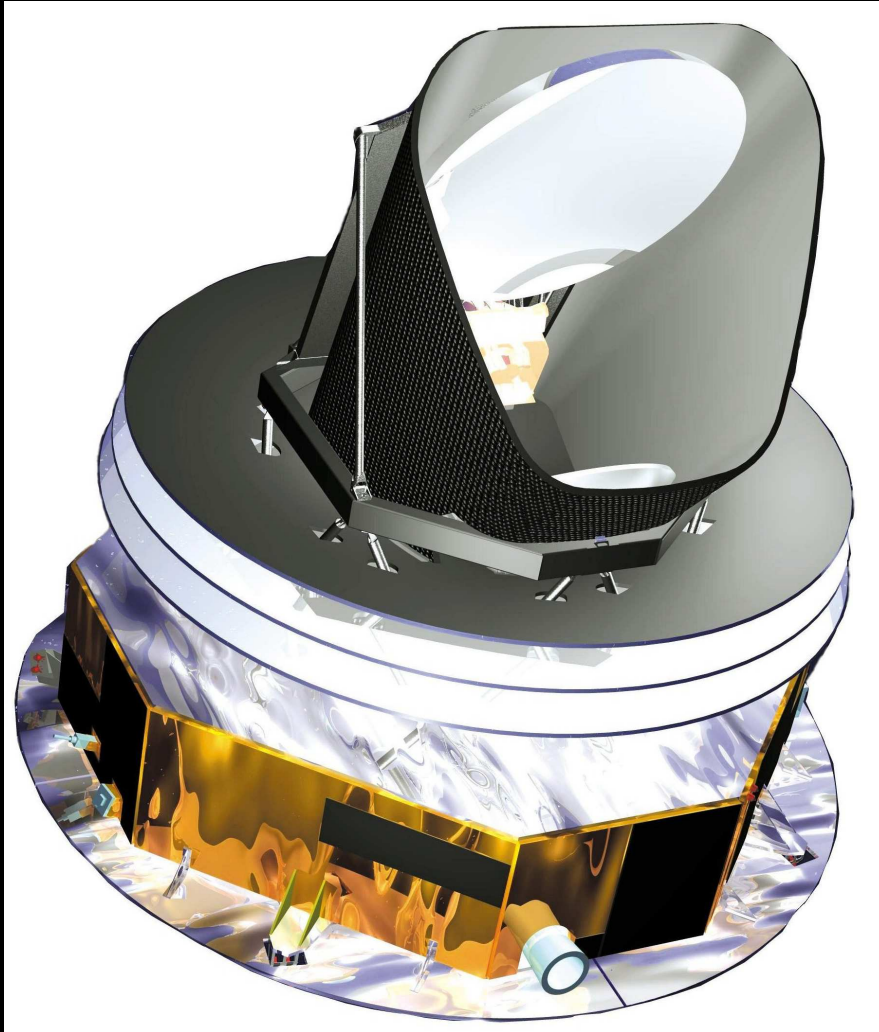
Polarizzazione

- CMB
- Componenti galattiche
- Sorgenti

La missione Planck (ESA)



La missione Planck (ESA)



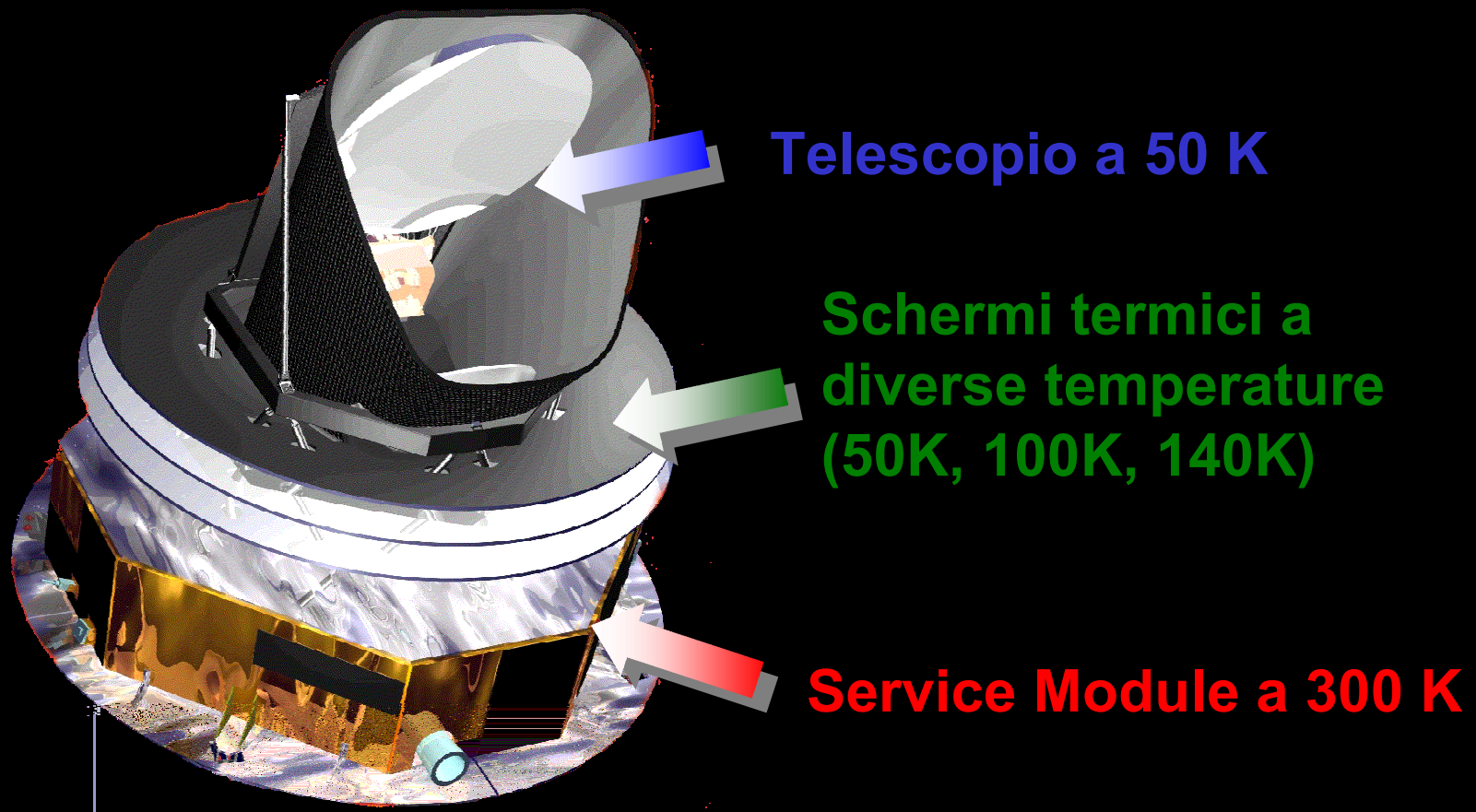
Requisiti

- Risoluzione angolare: $< 10'$
- Sensibilità per pixel: $< 10 \text{ microK}$
- Range di frequenza: 30-900 GHz
- Copertura del cielo: 100%
- Errori sistematici: $< 3 \text{ microK}$

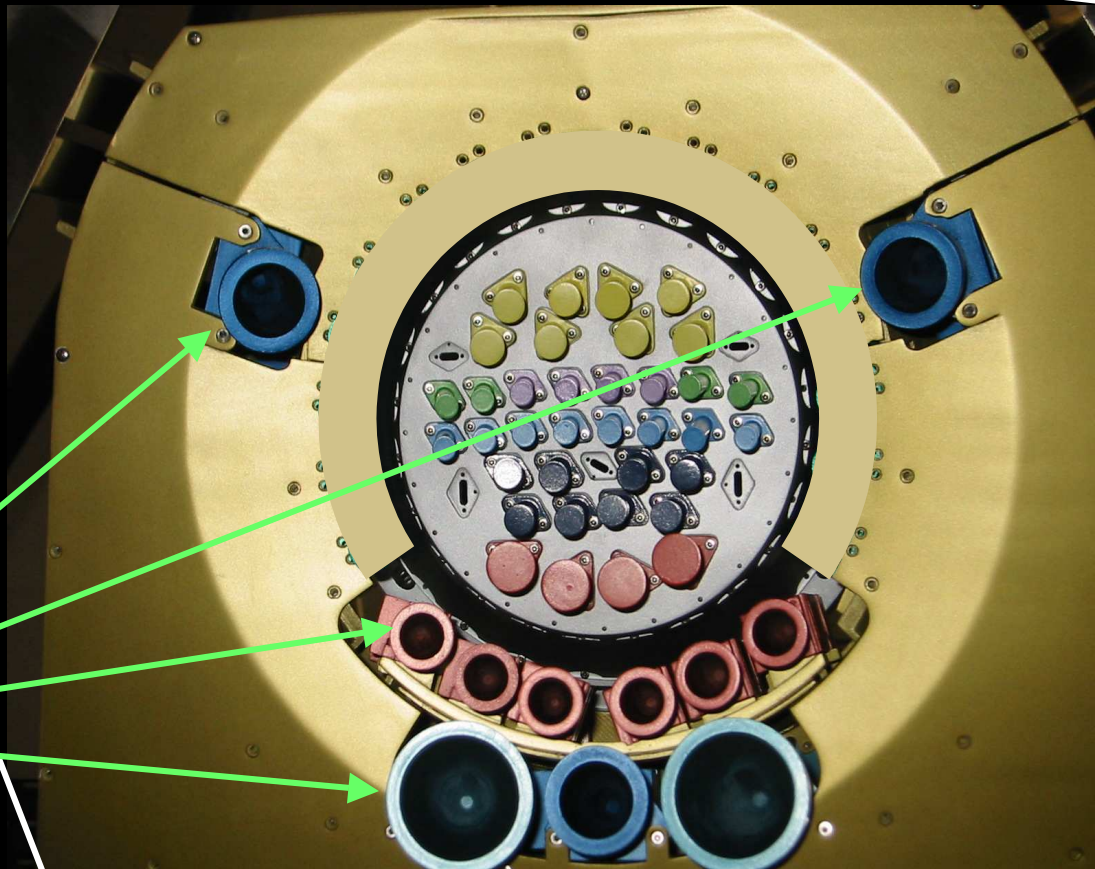
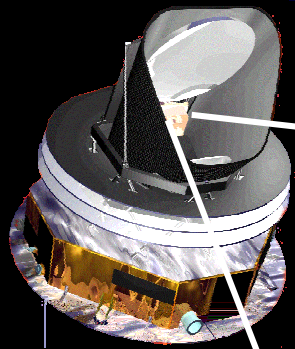
Implementazione

- Telescopio: 1.5m, Aplanatico off-axis
- Detectors: array di radiometri (3 canali fra 30 e 70 GHz) + bolometri (6 canali fra 100 e 857 GHz)
- Raffreddamento passivo e attivo
- Orbita: Sun-Earth L2 ($1.5 \times 10^6 \text{ km}$)
- Lancio: 2007, Ariane 5

Il satellite

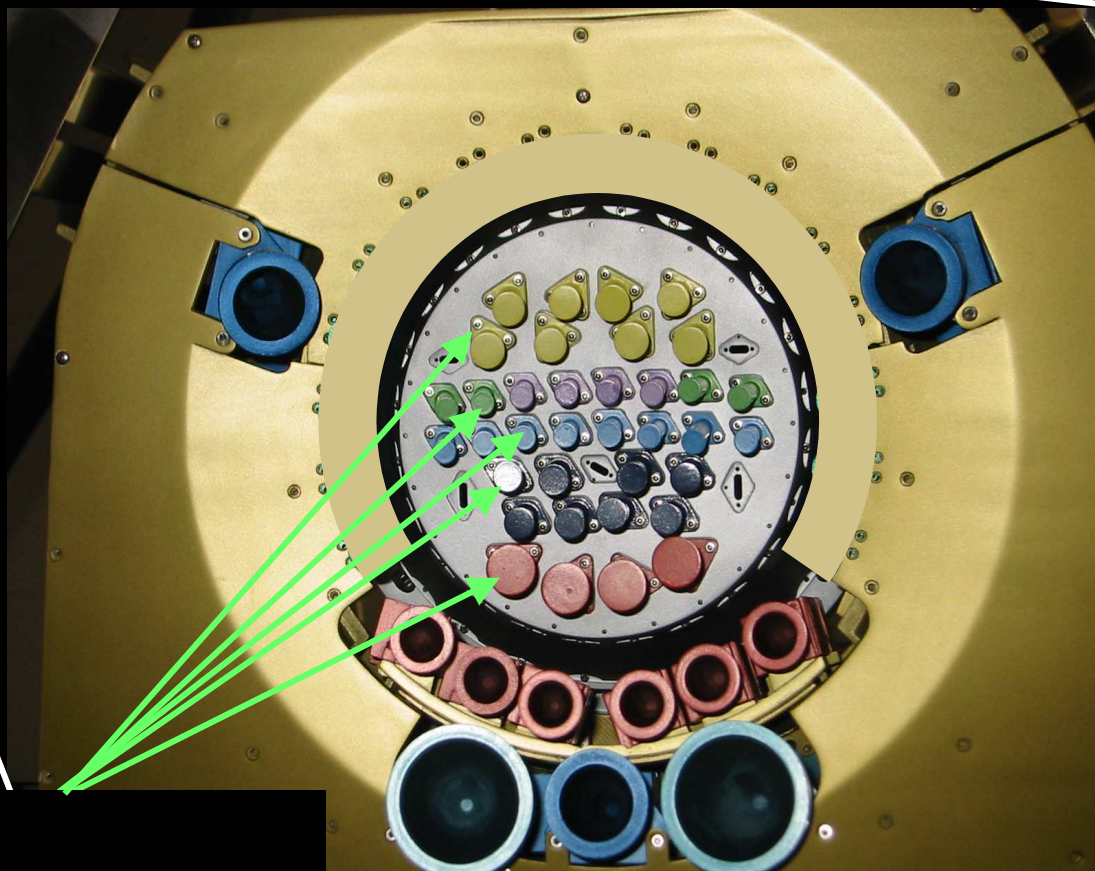
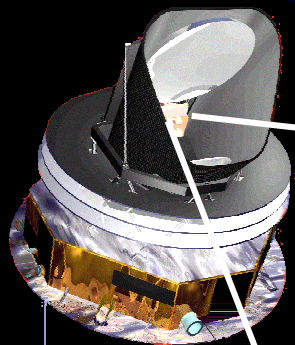


Il piano focale



LFI (20 K)
30-44-70 GHz

Il piano focale



HFI (4K – 0.1K)

100-143-217-353-545-857 GHz

Lo strumento LFI

