



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

# Cosmologia Observacional Charla III

Carlos Alexandre Wuensche  
Divisão de Astrofísica - INPE

III Curso Boliviano de Astrofísica y Cosmología  
La Paz, Setiembre 2005



# Agradecimentos

- ❖ Especialmente ao Dr. José Nogales, pelo convite e pela chance de conhecer a todos vocês.
- ❖ A todo Instituto de Física da UMSA, pela acolhida e pela organização da Escola - que ela aconteça por muitas décadas!!!!
- ❖ A Mirko Rajjevic e Jackeline Glasinovic, pelo enorme apoio na preparação do laboratório computacional.
- ❖ A Adolfo e Gonzalo pela ajuda durante a permanência em La Paz.
- ❖ A todos os alunos, que tornaram minha visita à Bolívia "inolvidable".



# Observações da Radiação Cósmica de Fundo

- Espectro
- Distribuição angular
- Polarização



# Cosmologia: Século XIX x Século XX

## Final do séc. XIX:

■ *Teoria*: Física Clássica; Universo "restrito" à Galáxia.

■ *Observação*: telescópios ópticos e chapas fotográficas

## Final do séc. XX:

■ *Teoria*: Relatividade Geral + "microfísica"; Universo observável  $\sim 3000$  Mpc

■ *Observações*: de rádio ( $\lambda \sim 100$  cm) a raios cósmicos ( $E > 10^{12}$  eV) realizadas no solo, com grandes telescópios, **e no espaço, com balões, foguetes e satélites**



# História da Radiação Cósmica de 2,7 K

- 1934** : **Richard Tolman** mostra que a radiação de um corpo negro em um universo em expansão é resfriada mas mantém sua distribuição térmica e permanece como corpo negro
- 1941** : **Andrew McKellar** usa a excitação dos dubletos de CN para afirmar que “a temperatura efetiva do espaço é ~ 2,3 K”
- 1948**: **George Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman** fazem a previsão de que o “Big Bang” daria origem à uma **radiação de fundo em microondas com uma temperatura de ~ 5 K**
- 1955**: **Tigran Shmaonov** mede um excesso de emissão em microondas com temperatura de ~ 3 K
- 1964**: **A.G. Doroshkevich e Igor Novikov** escrevem um artigo (que passa despercebido) sugerindo que se procure a radiação de corpo negro prevista por Gamow, Alpher e Herman
- 1965**: **Arno Penzias e Robert Wilson** descobrem a **Radiação Cósmica de Fundo em Microondas de 3 K (ganharam o Prêmio Nobel de Física de 1978 por essa descoberta)**  
Por intermédio de Bernie Burke, Robert Dicke, James Peebles, Roll e David Wilkinson sabem do resultado e interpretam a medida
- 1966**: **Rainer Sachs and Arthur Wolfe** prevêm flutuações de amplitude no ruído cósmico de microondas criadas por variações do potencial gravitacional entre a superfície de último espalhamento e o observador



**1968: Martin Rees e Dennis Sciama** prevêm flutuações de amplitude no ruído cósmico de microondas causadas por fótons cruzando barreiras de potencial dependentes do tempo

**1969: R.A. Sunyaev e Y. B. Zel'dovich** estudam o espalhamento Compton inverso dos fótons da radiação de fundo em microondas por elétrons quentes

**1990: O satélite COBE** mostra que a Radiação Cósmica em Microondas tem um **espectro de corpo negro quase perfeito**. Esse resultado dá forte apoio ao modelo “hot Big Bang”, à história térmica do Universo e coloca vínculos à densidade do meio intergaláctico

**1992: O satélite COBE** descobre anisotropia na Radiação Cósmica de Fundo em microondas. Esse resultado favorece o modelo do “Big Bang” com instabilidade gravitacional para explicar as estruturas em grande escala do Universo e gera grande atividade na Física e na Astronomia, tanto teórica quanto experimental

**2000:** Observações de anisotropia na Radiação Cósmica de Fundo de 2,7 K mostram que a curvatura do Universo é pequena e que o Universo é plano para todas as finalidades práticas. As anisotropias na Radiação de 2,7 K começam a cumprir a promessa de **determinar os parâmetros cosmológicos com uma precisão de 10 %, no mínimo** ⇒ **COSMOLOGIA DE PRECISÃO**

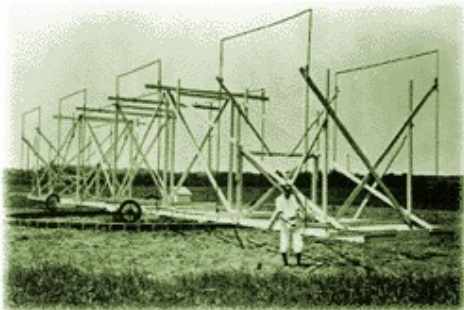
**2001: MAP** (Microwave Anisotropy Probe) foi lançado pela NASA, com sucesso absoluto!

**2007: Planck** (Max Planck Surveyor, anteriormente COBRAS/SAMBA) será lançado pela ESA

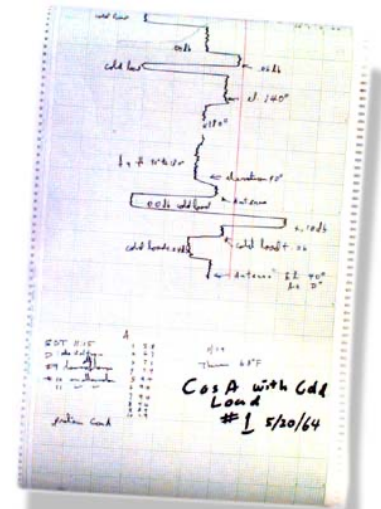
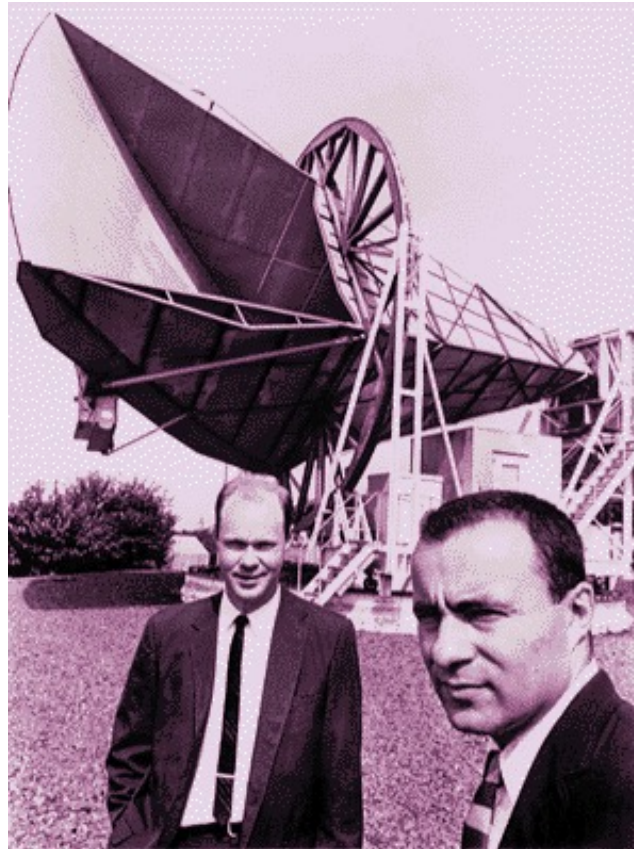


# História da Descoberta da RCFM

1933



1964





## Alguns números...

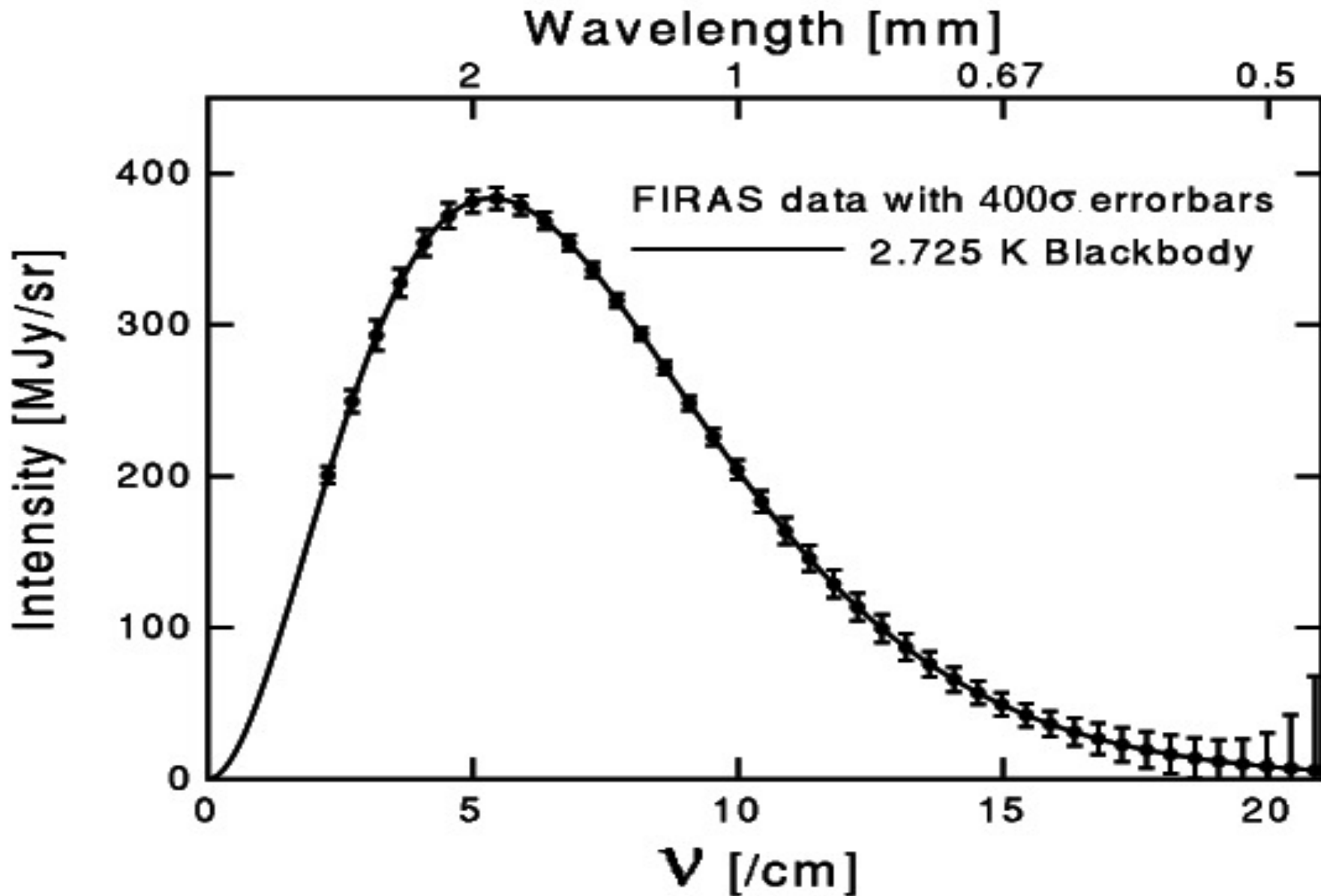
- $T = 2,725 \pm 0,001$  Kelvin (Mather et al. 1999, ApJ, **512**, 511).
  - e Kelvin (= 2,718281828 K)?
  - “Is it the triple point of water divided by 100 (=2,7315 K)?”
- $\rho = 4,6417 \times 10^{-34} (T / 2,725) \text{ g cm}^{-3}$
- $P_{\text{RCFM}} \sim 10^{-18} \text{ W}$
- Velocidade do Sol em relação à RCFM =  $369,3 \pm 2,5 \text{ km s}^{-1}$
- $n = 410,50 (T/2,725)^3 \text{ cm}^{-3}$

$$h = 6,62606876(52) \times 10^{-34} \text{ J s}$$





# RCF - espectro de corpo negro





# Por que a RCF tem um espectro de corpo negro?

- Átomos neutros interagem pouco com fótons de microondas. Íons e  $e^-$  do plasma primordial interagiriam via espalhamento Thomson
- Esse processo altera a direção do fóton mas não sua frequência. Portanto, espalhamento Thomson não produz um espectro térmico
- Sob que condições um campo de radiação inicialmente não-Planckiano relaxa para uma forma de corpo negro?
- Há a necessidade de 2 condições:
  1. mecanismo(s) para criar fótons e/ou redistribuir sua energia
  2. taxa de reação desses mecanismos deve ser maior que a taxa de expansão
- No Universo primordial, matéria e radiação estiveram em **equilíbrio térmico**  
⇒ espectro Planckiano
- Expansão não altera a forma do espectro de corpo negro



# Por que a RCF tem um espectro de corpo negro?

## ➤ Algumas suposições:

### ➤ acoplamento radiação-matéria:

$e^+ + e^- \leftrightarrow 2 \gamma$  e espalhamento Coulomb

### ➤ Interações do campo de radiação com $e^-$ e bárions

## ➤ Três processos físicos poderiam criar fótons ou alterar sua energia:

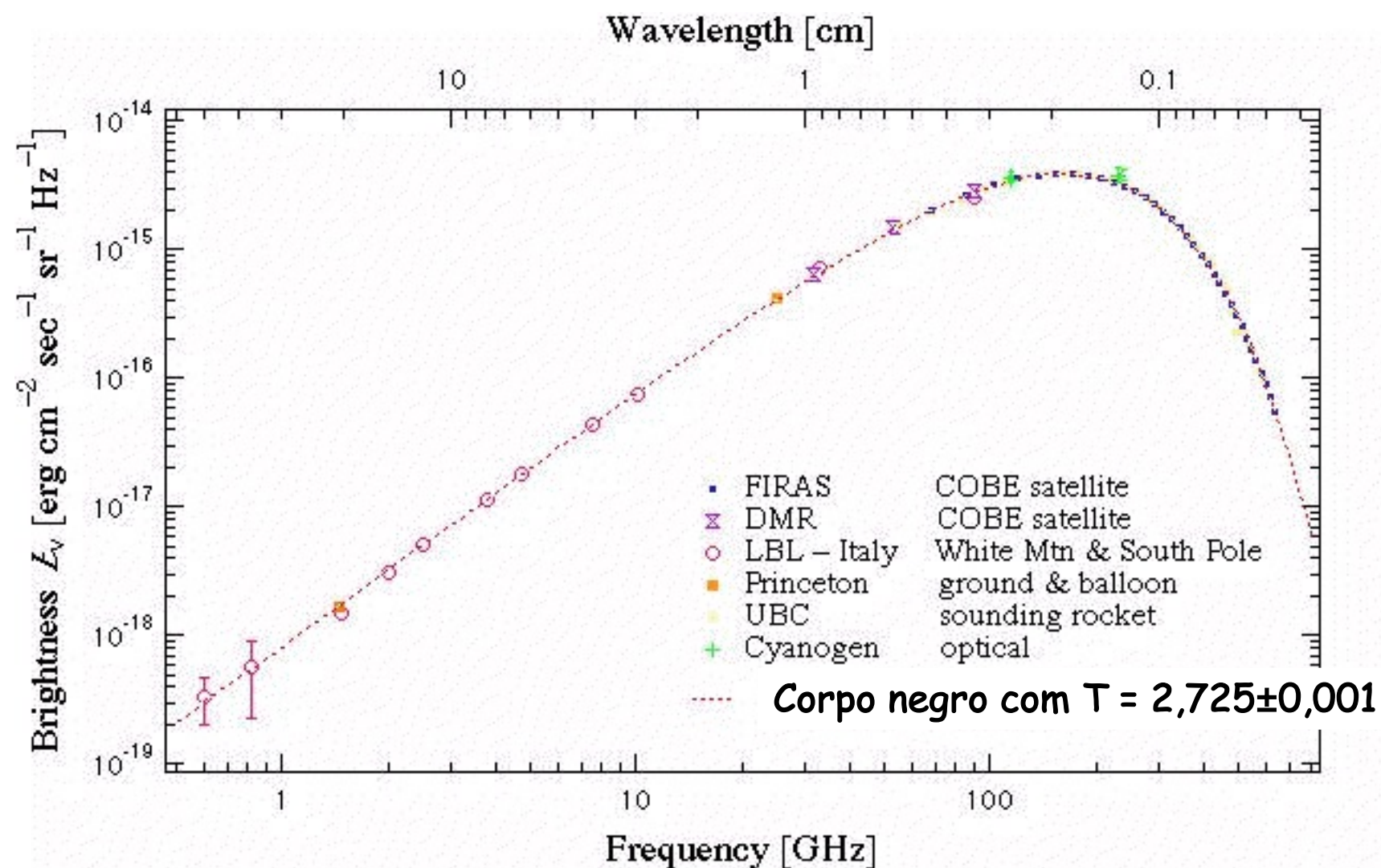
### ➤ Bremsstrahlung térmico (livre-livre) ( $e^-$ , $p$ )

### ➤ Efeito Compton

### ➤ Efeito Compton Radiativo (Double Compton), no qual um segundo fóton é produzido numa colisão $e^- \gamma$

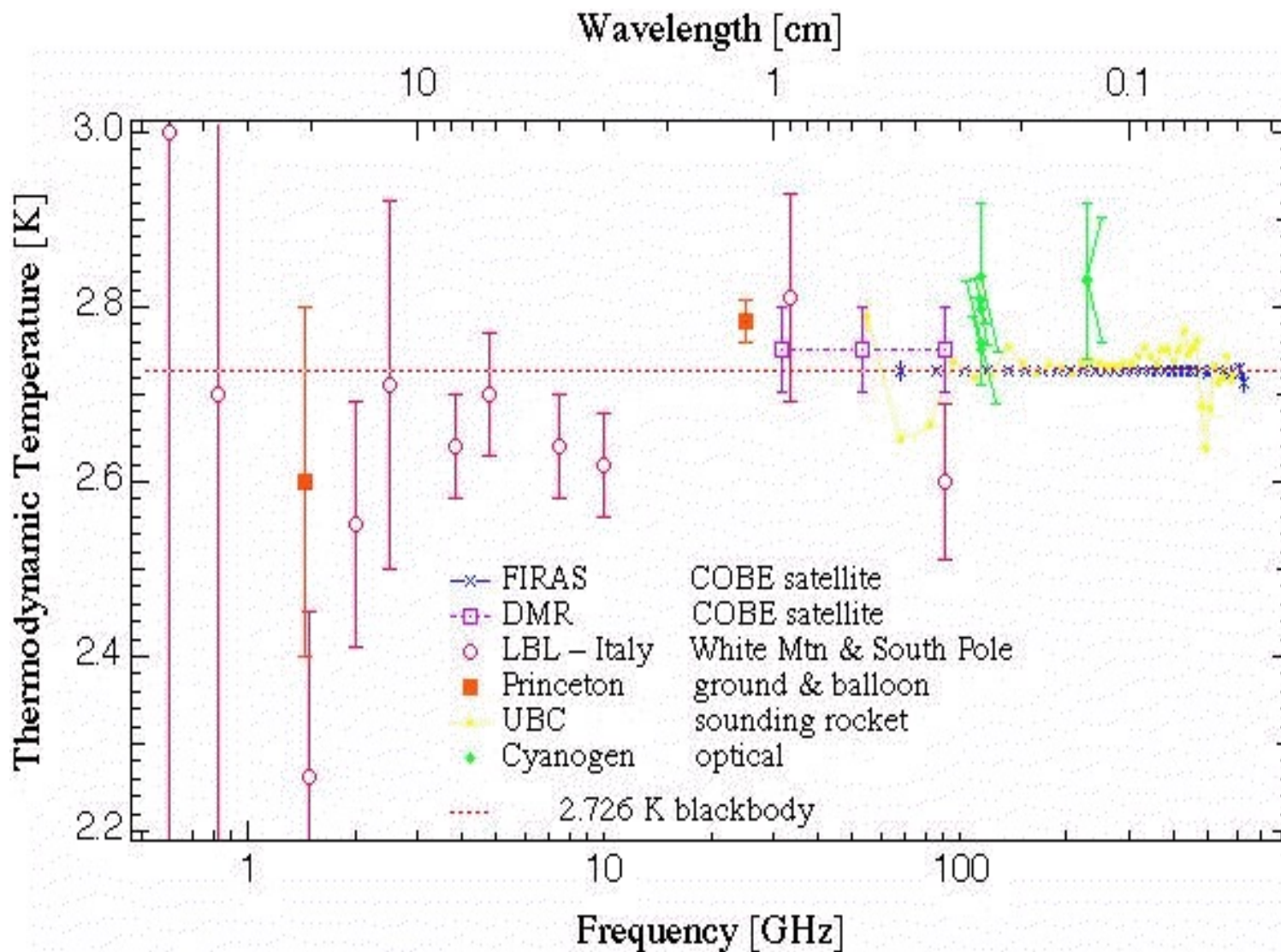


# RCF - espectro de corpo negro



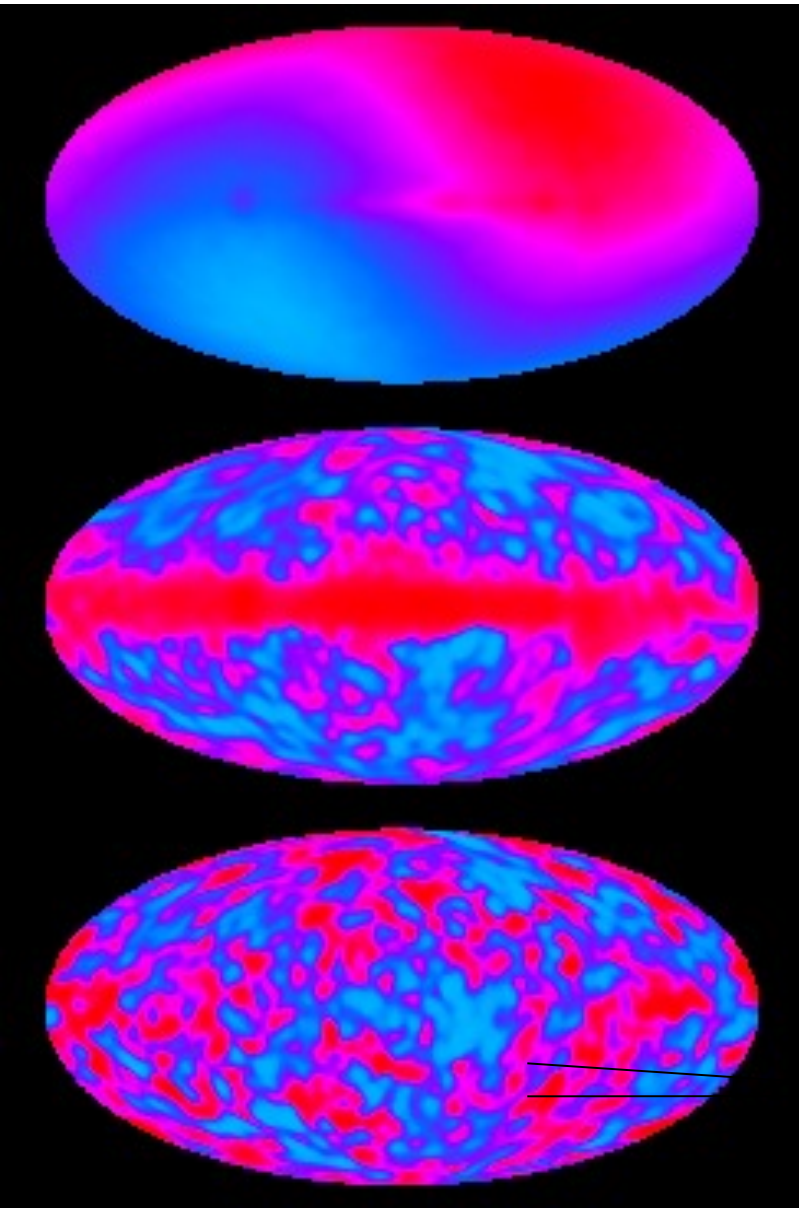


# Observações do espectro da RCFM





# RCF - distribuição angular



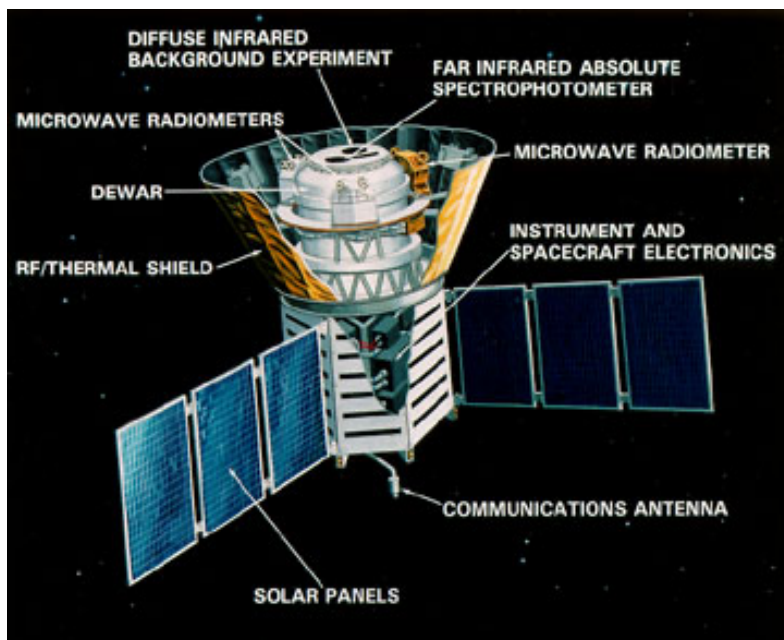
- Mapa 1: dipolo + galáxias + flutuações
- Mapa 2: galáxia + flutuações
- Mapa 3: flutuações de temperatura de 1 parte em 10000...

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi) \approx 10^{-5}$$

Escala angular: 7°

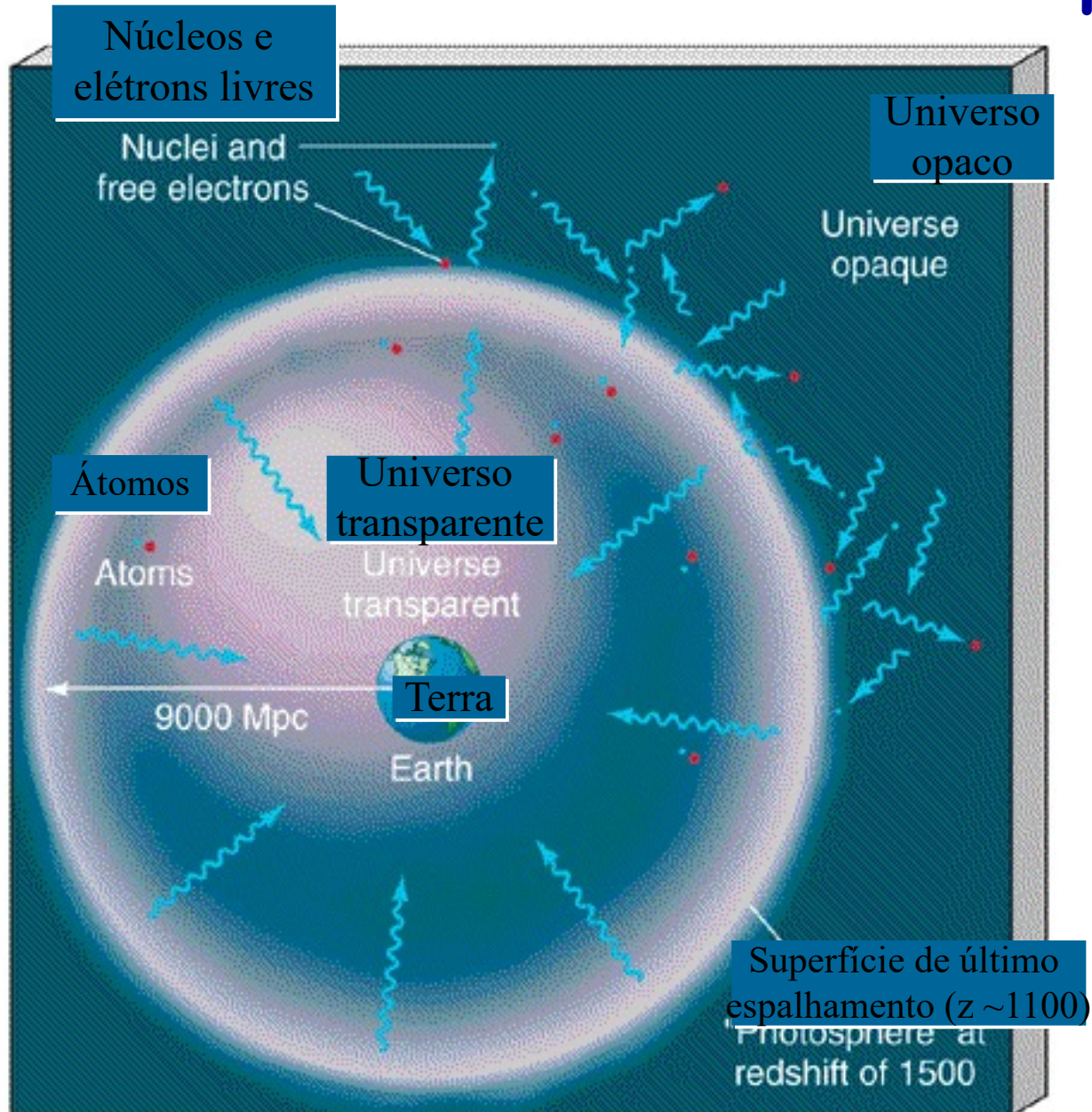


# Resultados do Satélite COBE





# O efeito de dipolo







# O efeito de dipolo

Radiação Isotrópica



Desvio para o vermelho

Sem desvio



Desvio para o azul

Sem desvio



# Como estudar a distribuição angular?

- Descrição teórica para o estudo da distribuição angular da RCF: expansão em harmônicos esféricos

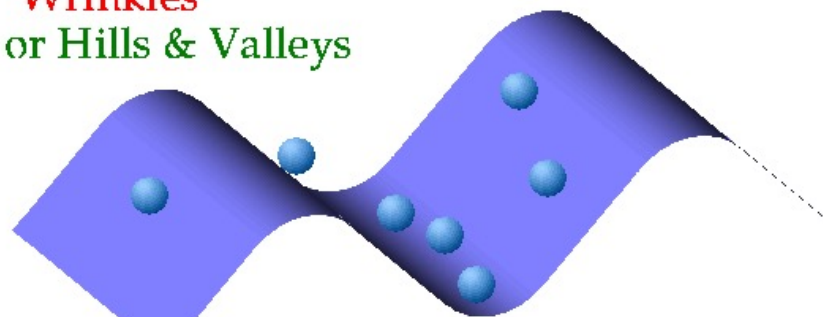
$$\frac{\Delta T(\theta, \varphi)}{T} = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

- Condições iniciais supostamente gaussianas (inflação)
- $a_{lm}$ : variáveis estocásticas com média zero e variância  $C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$

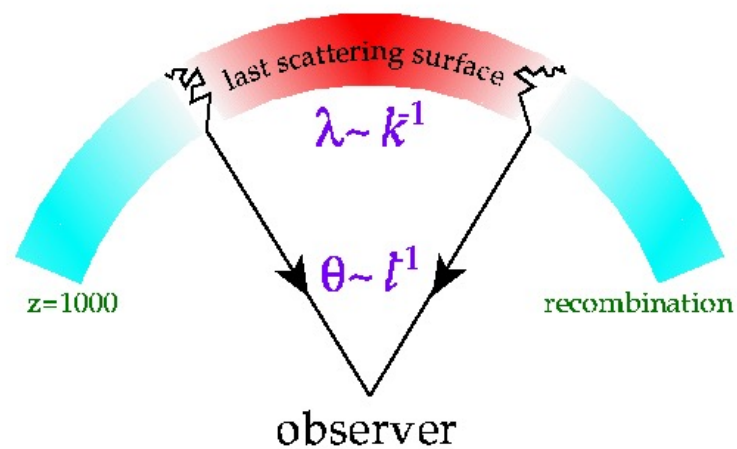
$$\chi_{2l+1}^2 \Rightarrow \frac{\Delta C_l}{C_l} = \sqrt{\frac{2}{2l+1}} \quad l \sim \frac{\pi}{\theta}$$



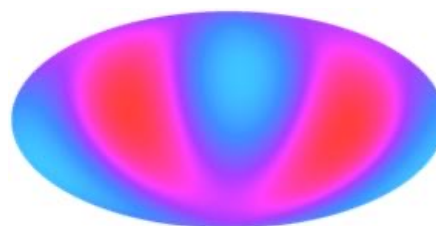
"Wrinkles"  
or Hills & Valleys



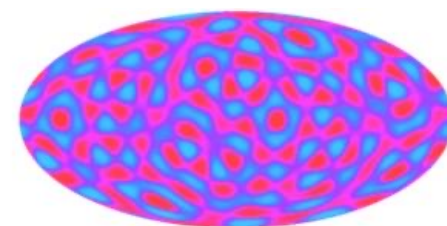
Accumulation in Valleys



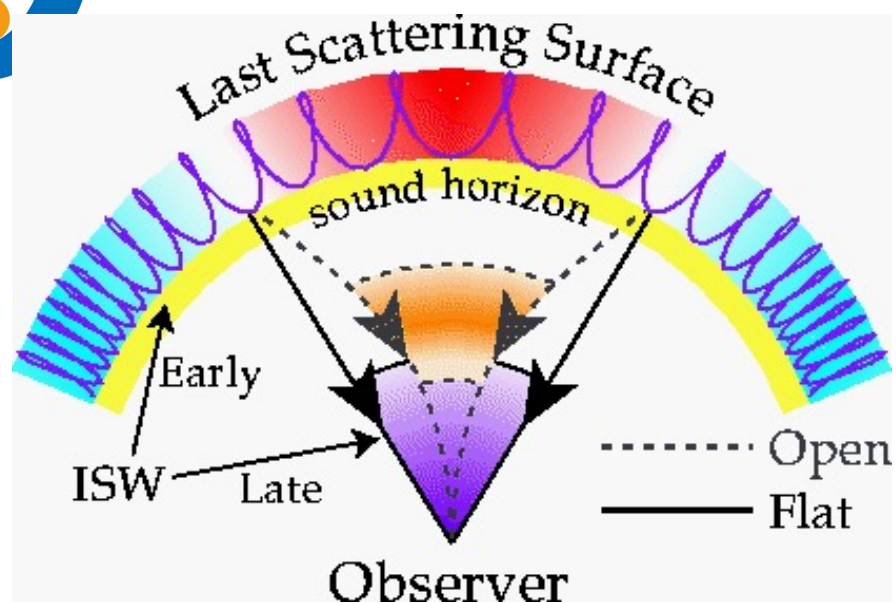
"Top View"



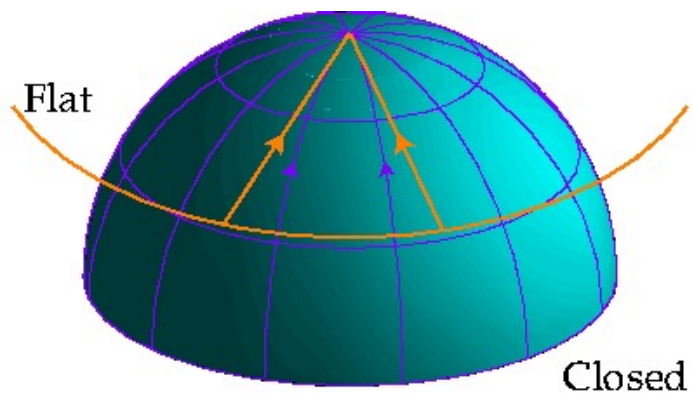
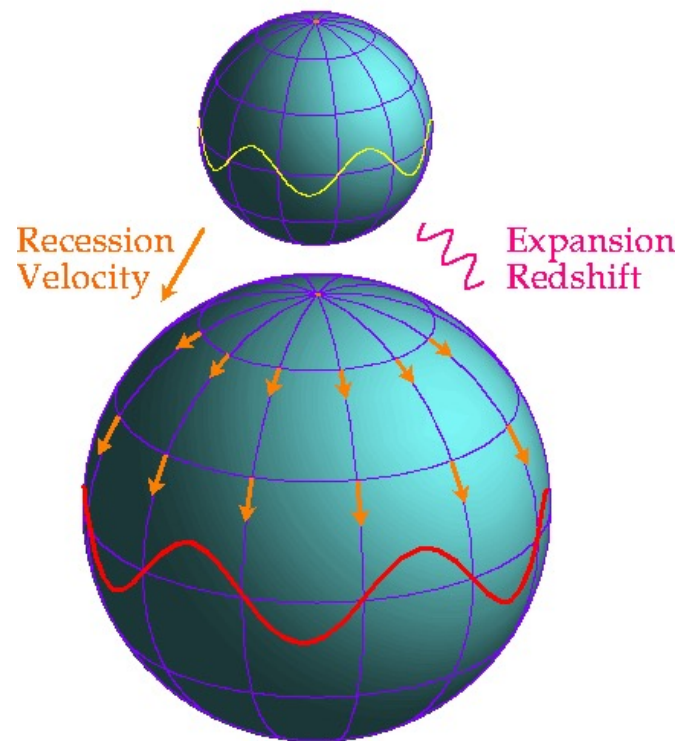
$l=2$



$l=16$



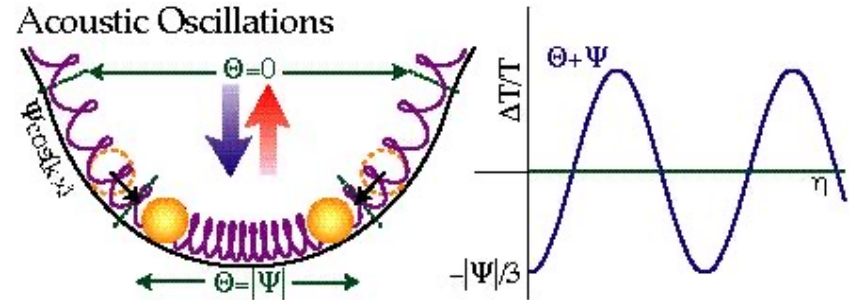
### Cosmological Expansion





# Universo: fluido composto de fótons e bárions

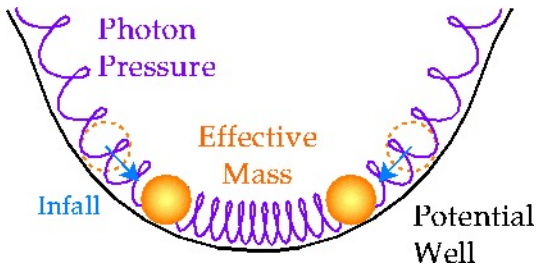
Competição entre gravidade e expansão  
⇒ oscilações ⇒ ondas acústicas



**Matéria:** pequeno oscilador harmônico

**Bárions:** massa → colapso

**Fótons:** resistência ao colapso

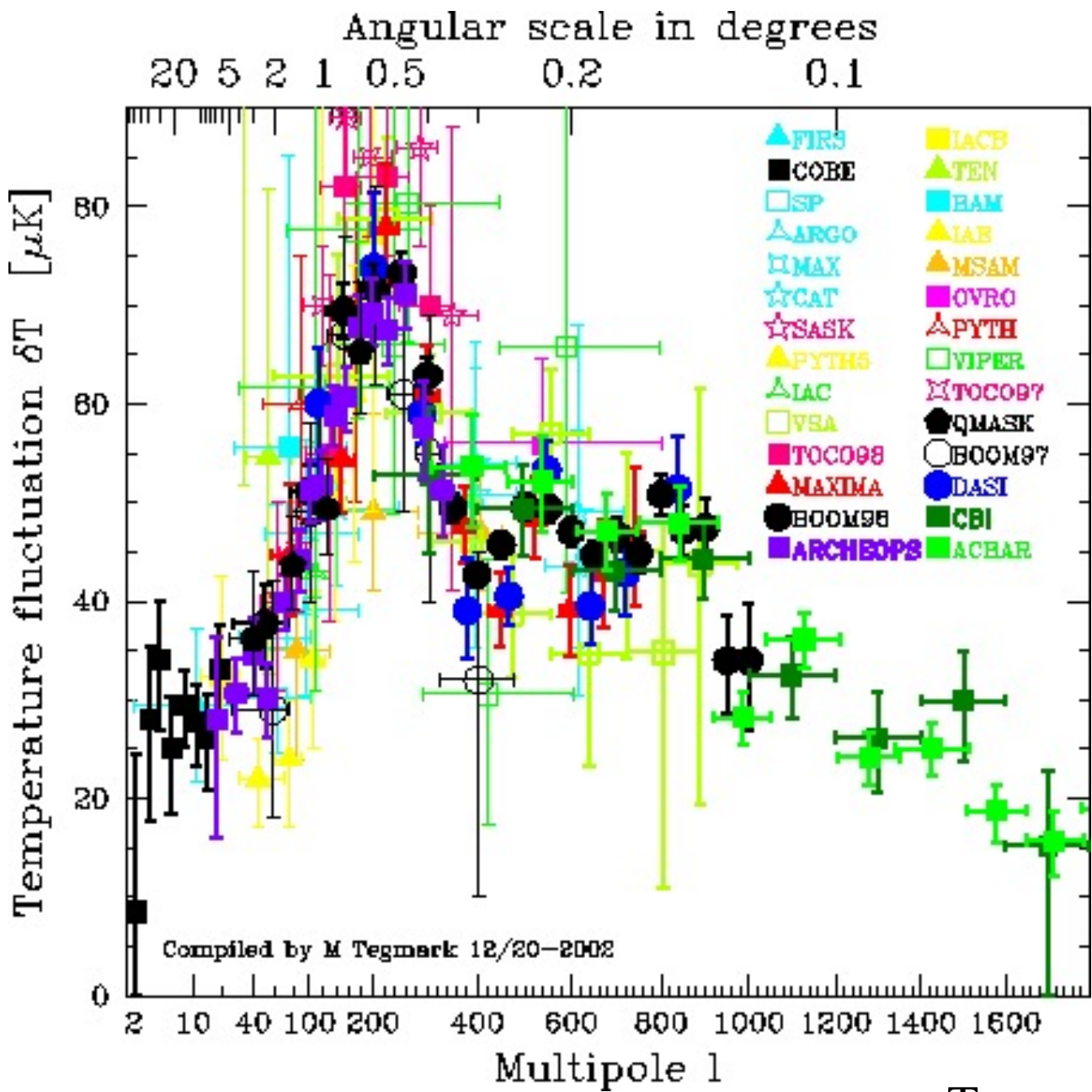


## Oscilador harmônico amortecido

**Densidade** (não deslocamento): variável

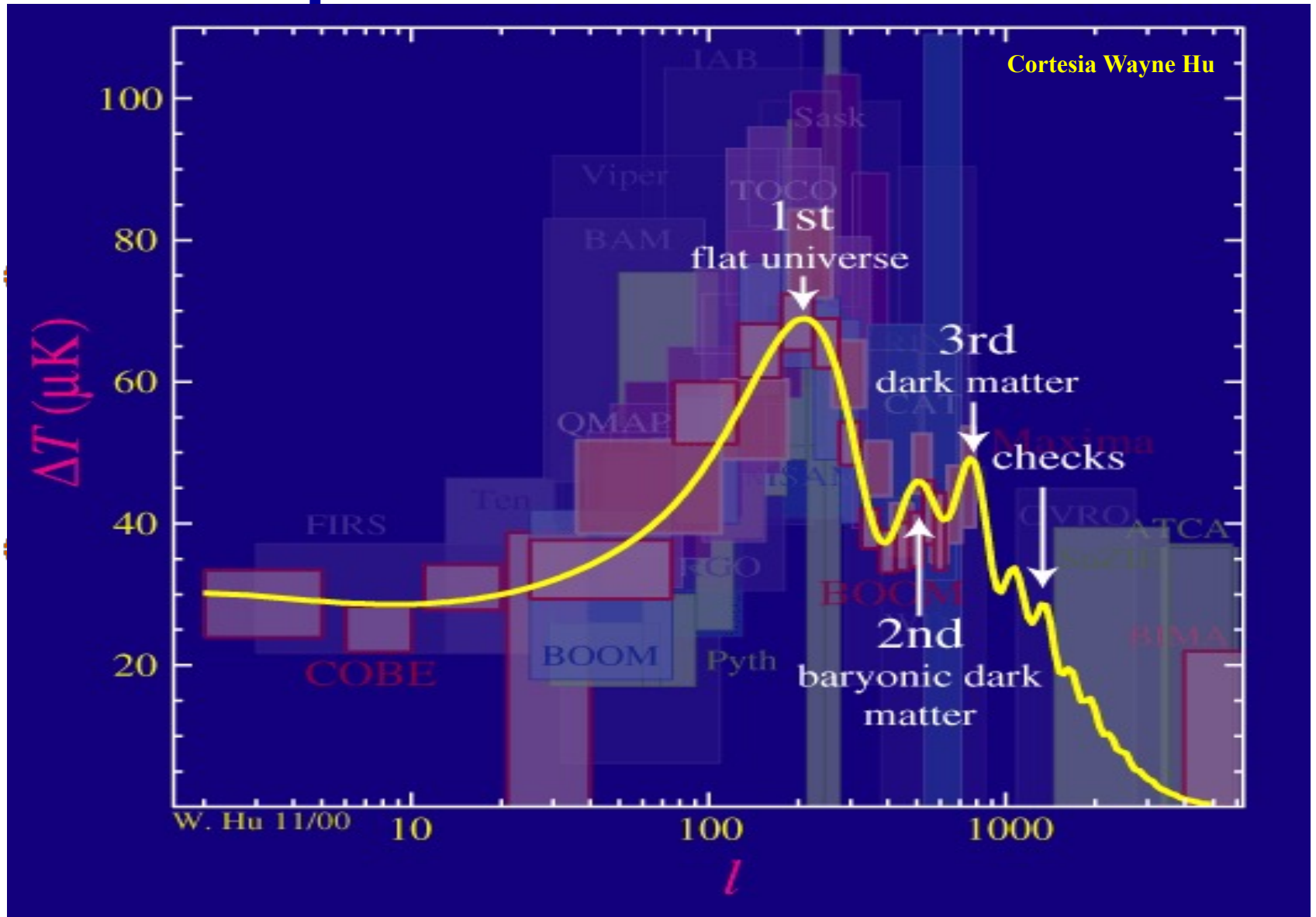
**Expansão ( $H_0$ ):** termo de amortecimento

**Gravidade:** força



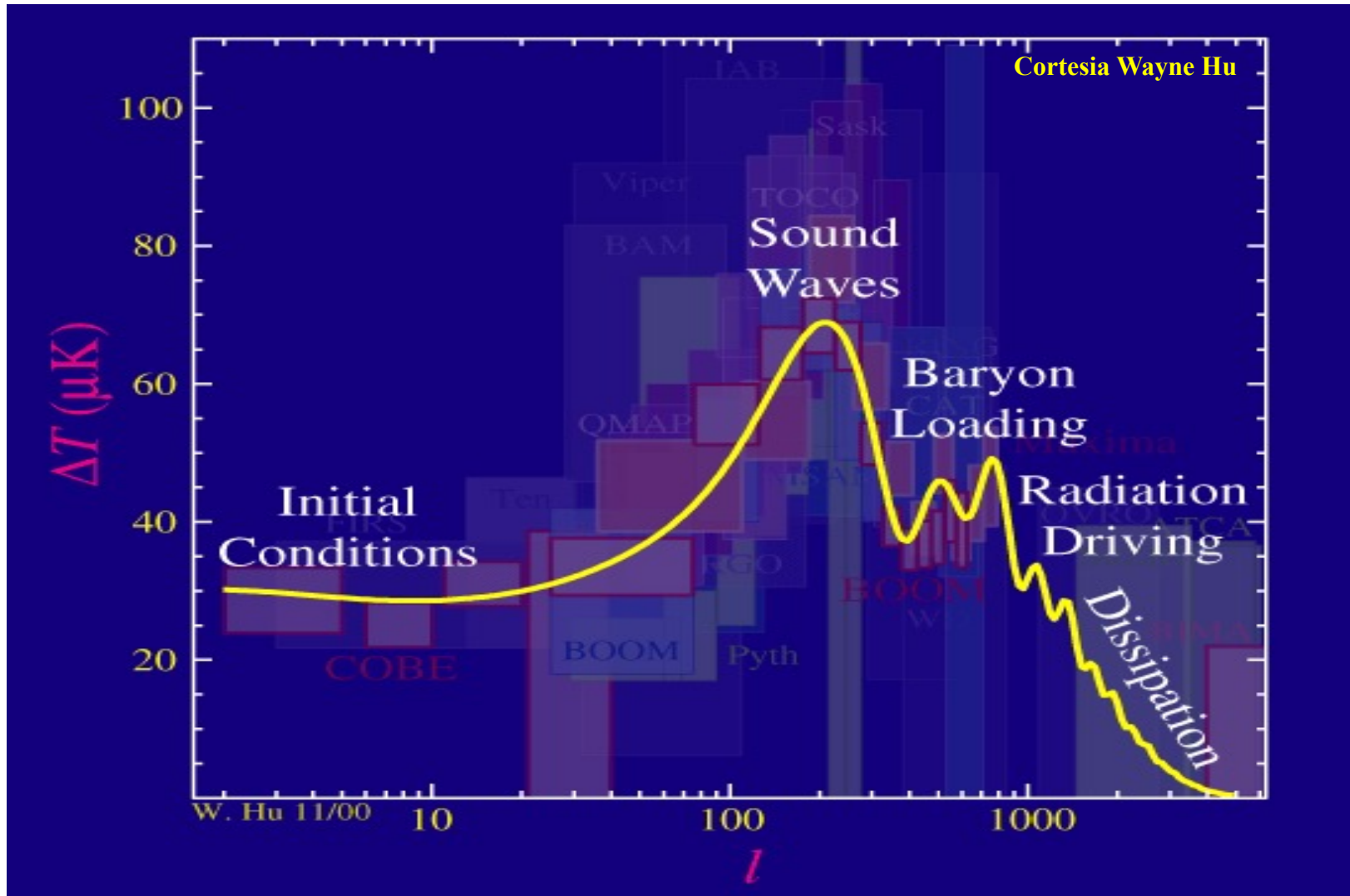


# Espectro de Potência



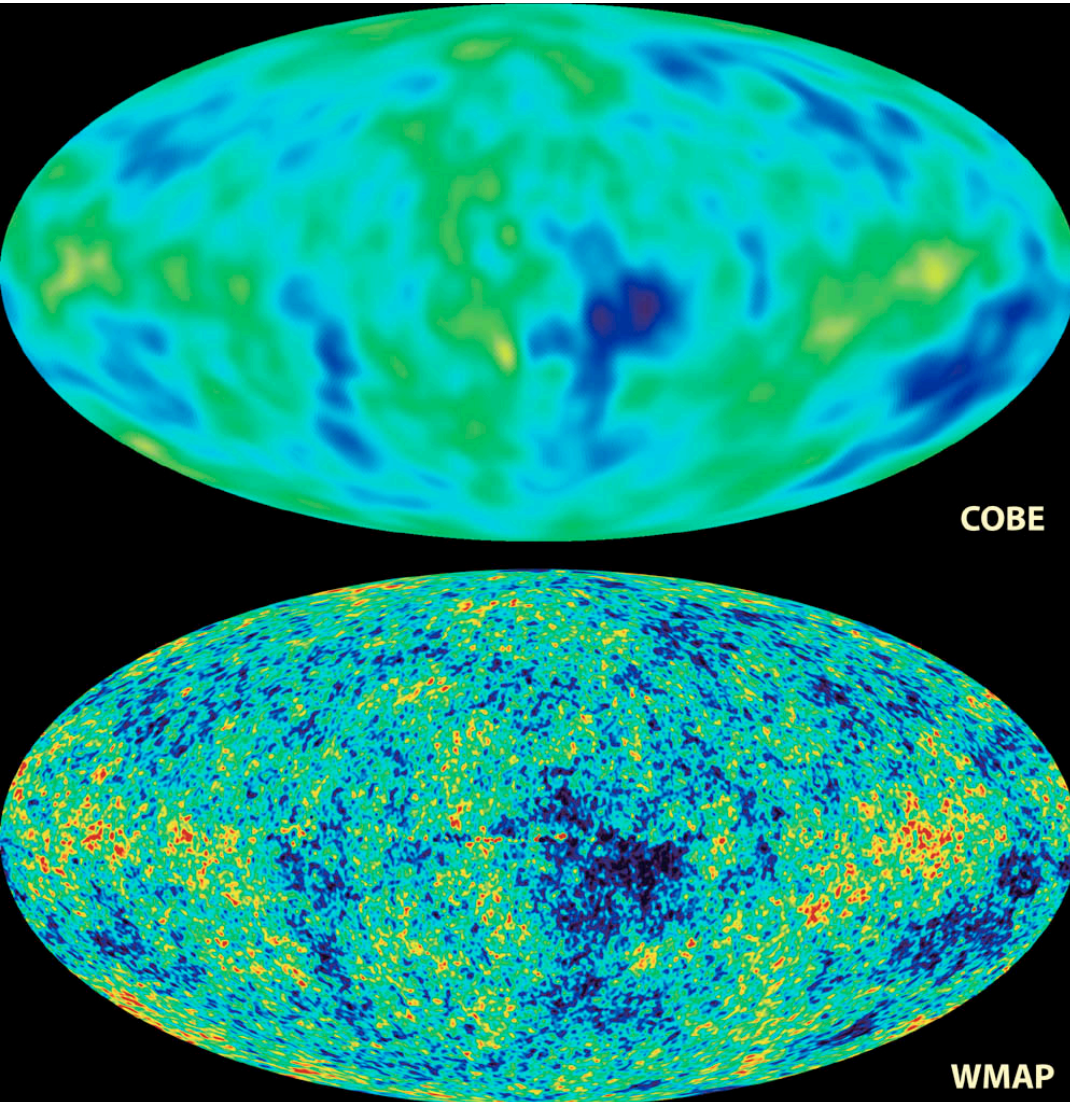


# Que informação podemos extrair do espectro?





# Resultados WMAP

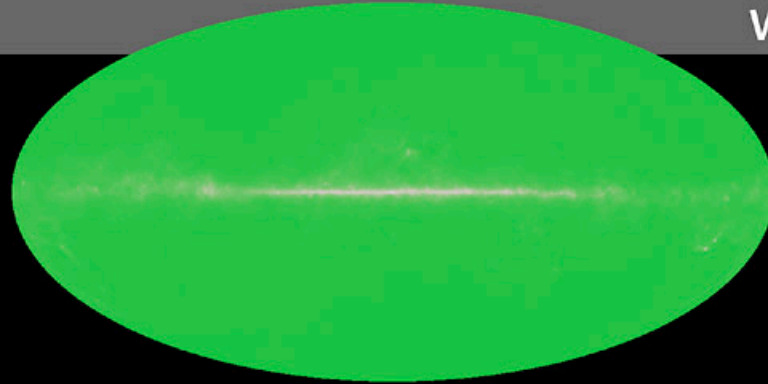
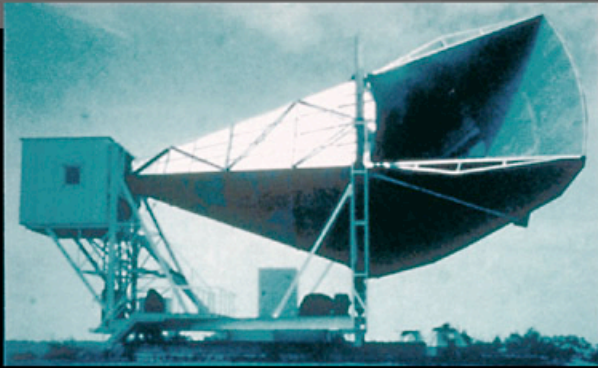


- Resolução angular pelo menos 7 vezes melhor que o COBE ( $7^\circ$  versus  $0,93^\circ$ )
- 5 frequências de observação (22, 30, 40, 60, 90 GHz), versus 3 do COBE (31, 53 e 90 GHz)
- Órbita mais distante.

1965

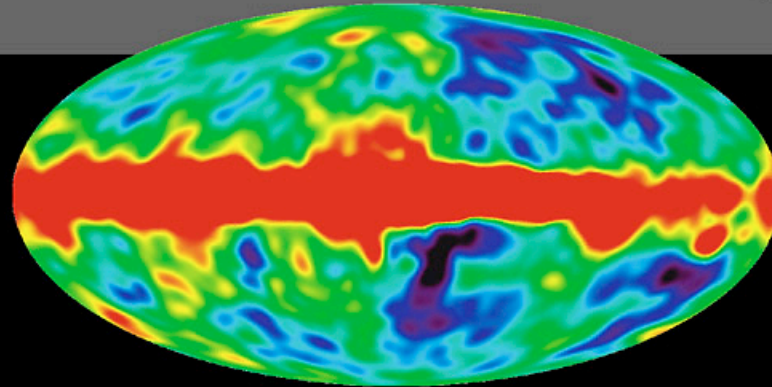
Fonte: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map>

Penzias and  
Wilson



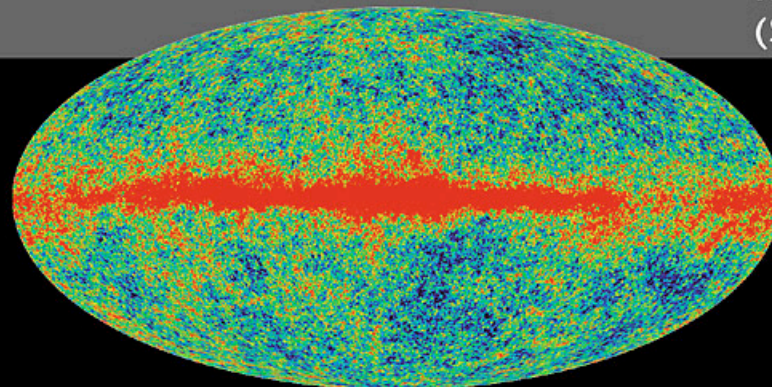
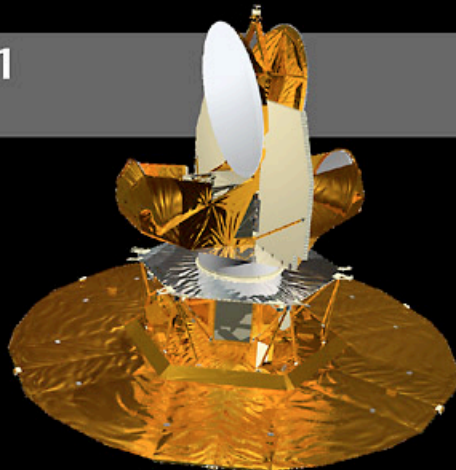
1992

COBE



2001

MAP  
(Simulated)

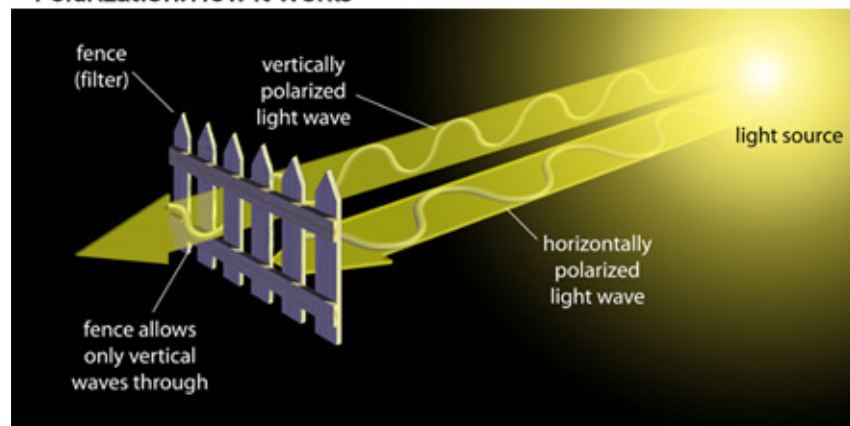




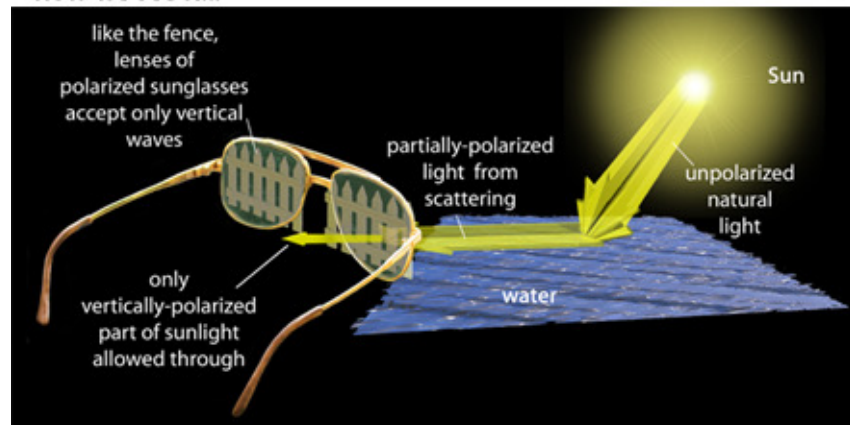
# Polarização da RCFM

- Medida importante para definir a época de formação das primeiras estrelas
- Um dos tipos de polarização (tensorial) pode trazer informações sobre as ondas gravitacionais primordiais

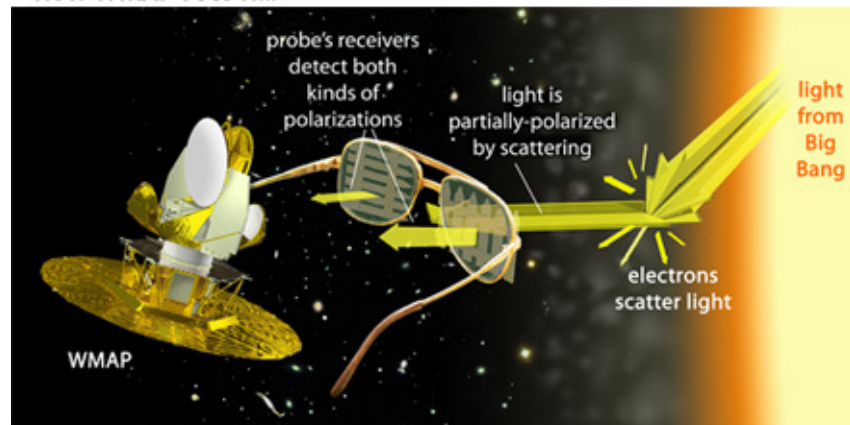
Polarization: How It Works



how we see it...



how WMAP sees it...





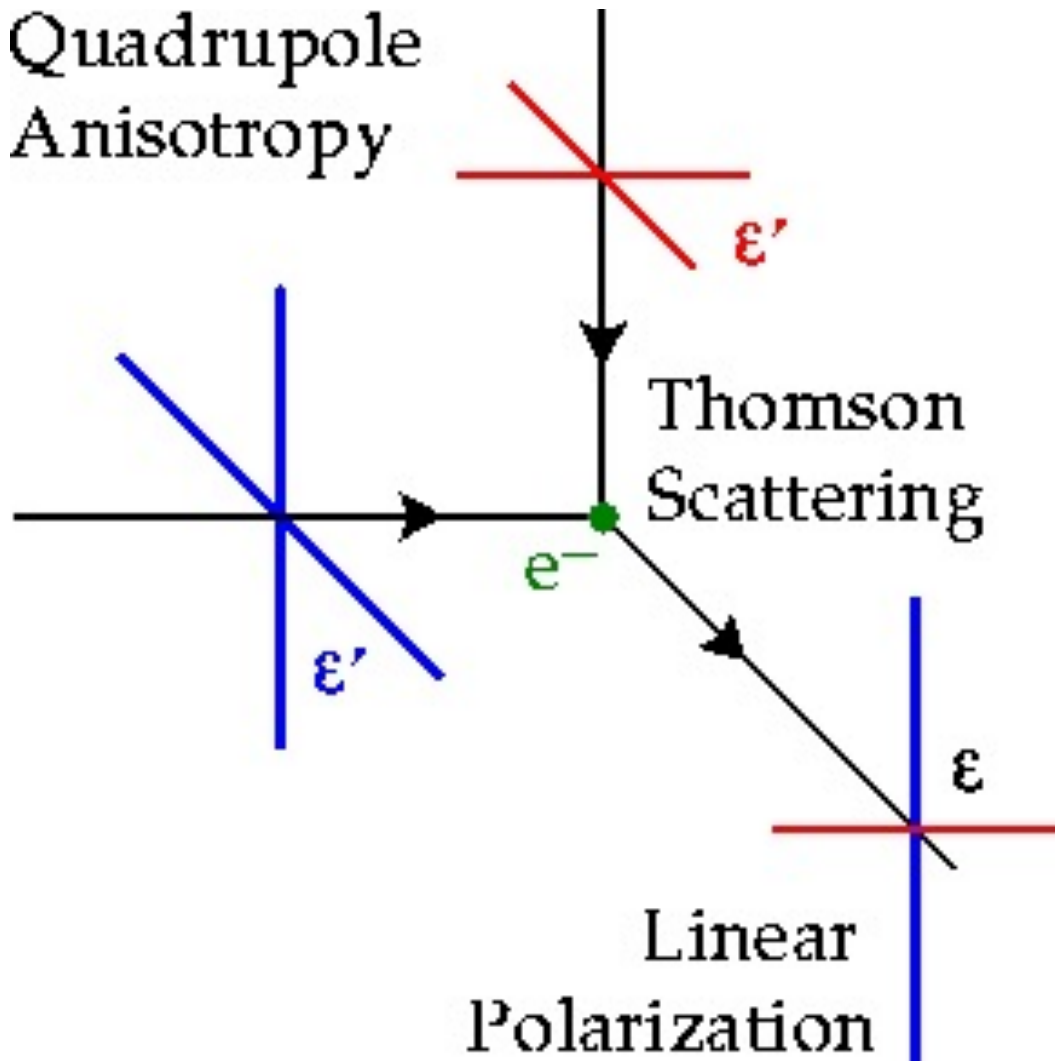
# Por que a RCFM deve ser polarizada?

- ✿ Radiação espalhada  $\Rightarrow$  POLARIZAÇÃO!
- ✿ Processo típico  $\Rightarrow$  espalhamento Thomson
- ✿ Descrição em termos dos parâmetros de Stokes e harmônicos esféricos (intensidade espalhada)



# Por que a RCFM deve ser polarizada?

Quadrupole  
Anisotropy



Somente  
flutuações  
de quadrupolo  
geram  
polarização!

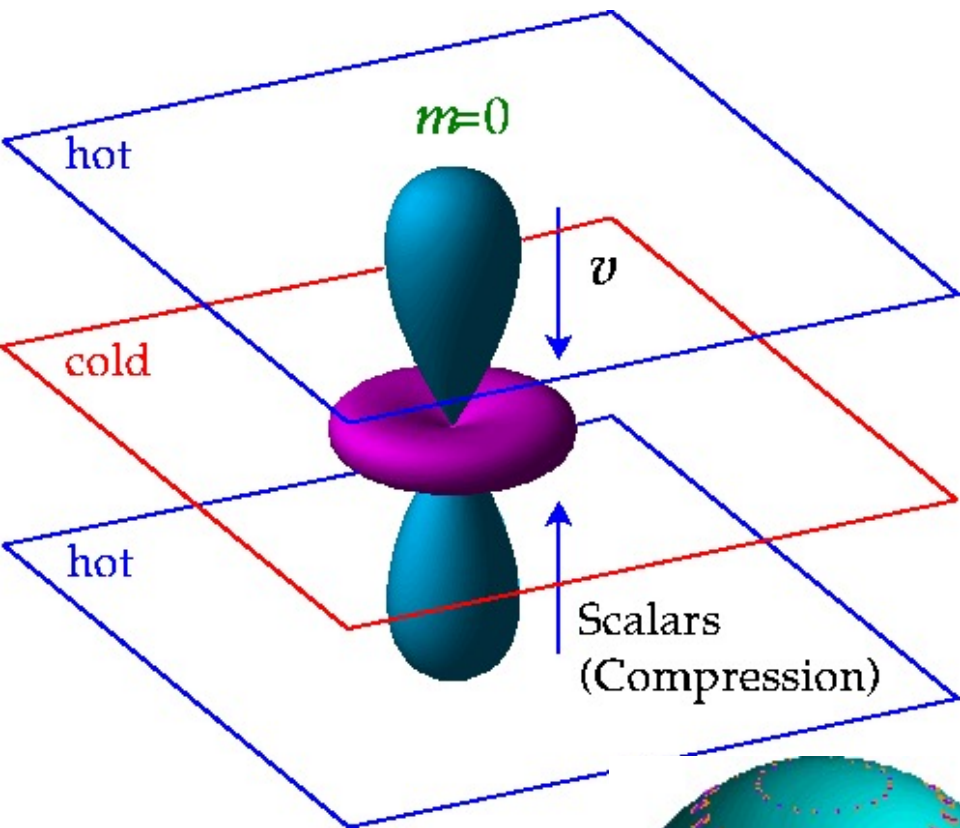


# Que tipo de polarização esperamos medir?

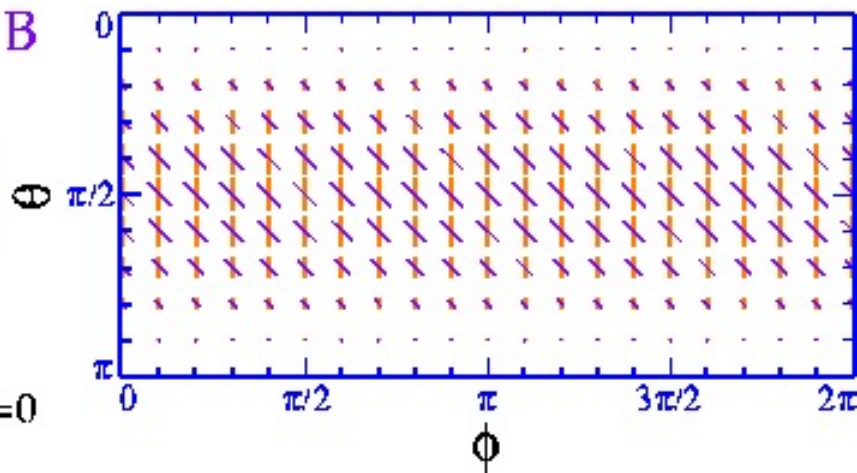
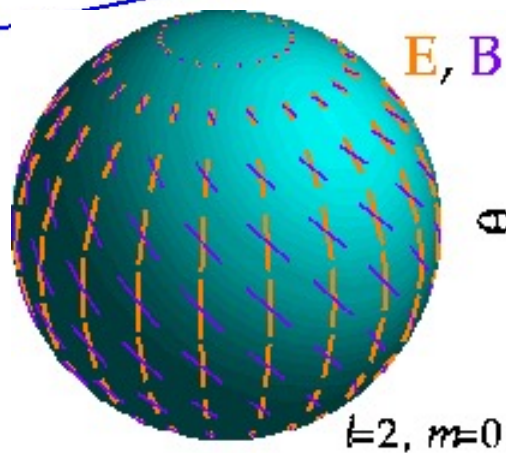
- Amplitudes:  $\sim 1 - 10 \mu\text{K}$  ( $\theta \leq 1-2^\circ$ ) e  $< 0,1 \mu\text{K}$  ( $\theta \geq 2^\circ$ )
- Modos escalares, vetoriais e tensoriais devem dar origem a observáveis no modo E (divergente), modo B (rotacional),  $T \otimes E$  (modo cruzado com a temperatura)



# Polarização escalar

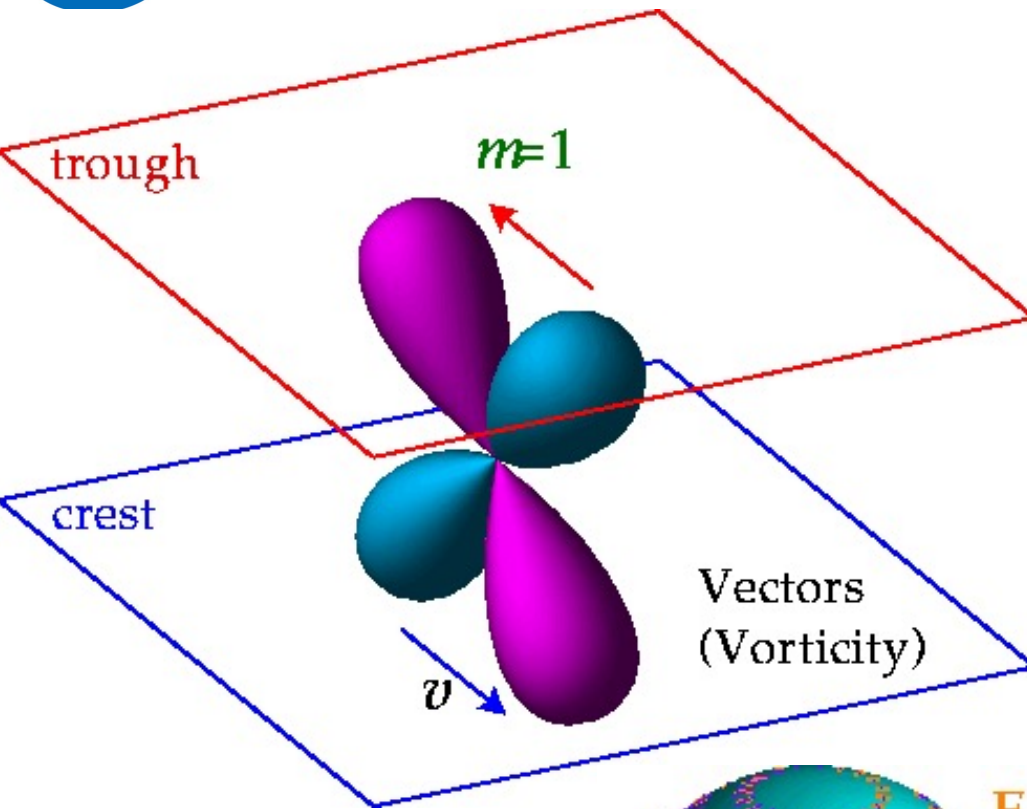


$$\odot l = 2, m = 0$$

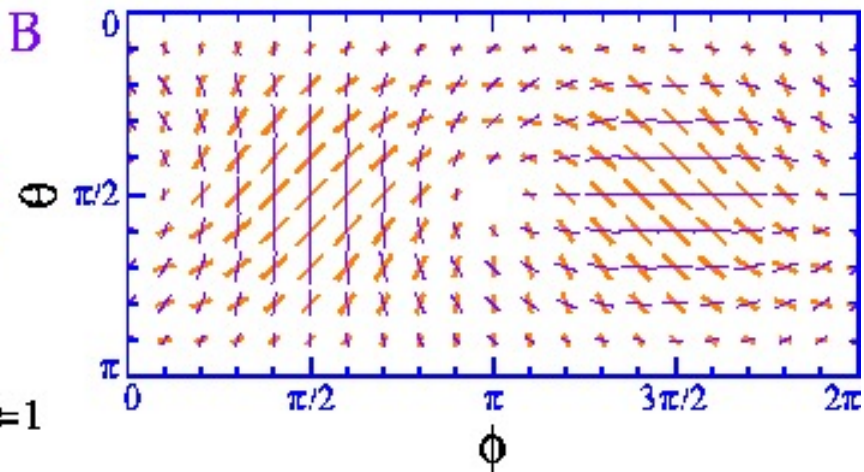
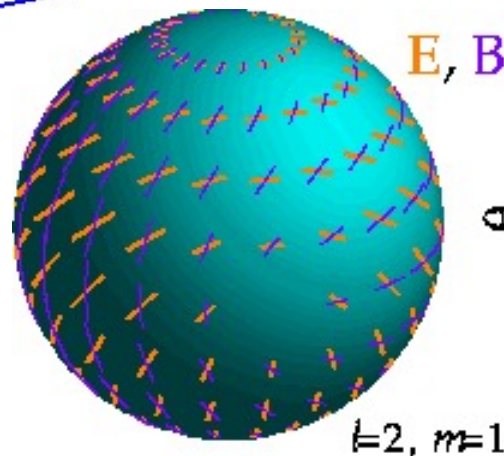




# Polarização vetorial



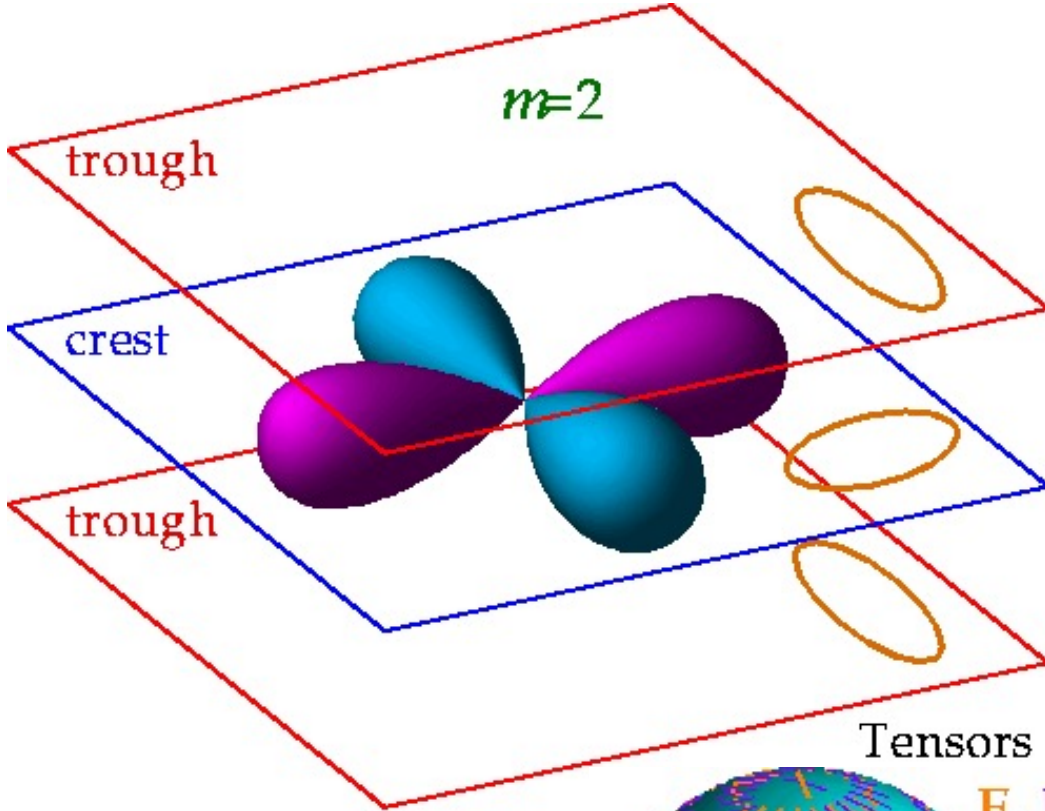
$$\odot L=2, m=\pm 1$$





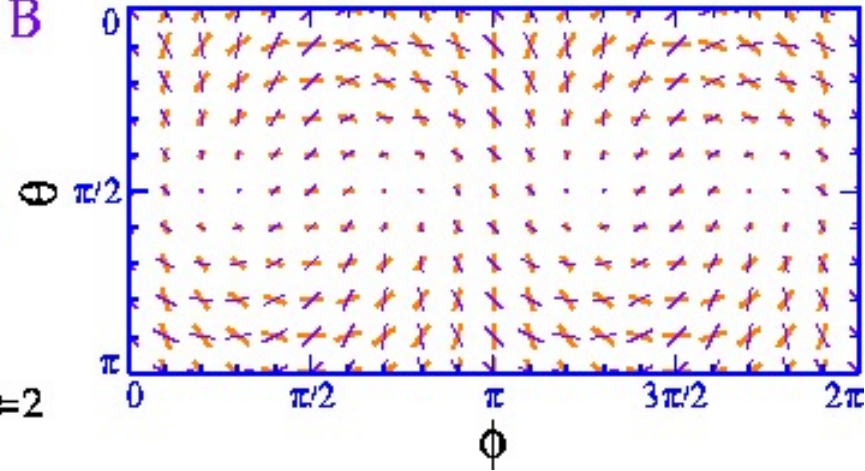
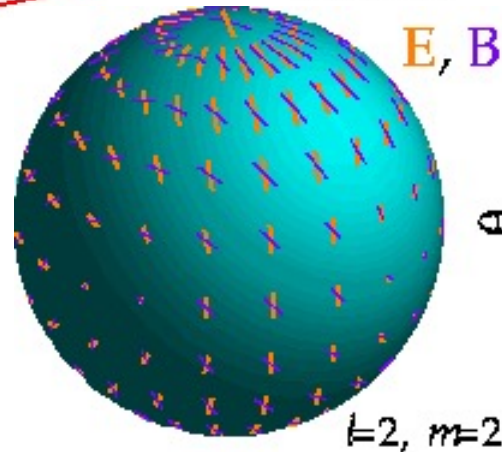


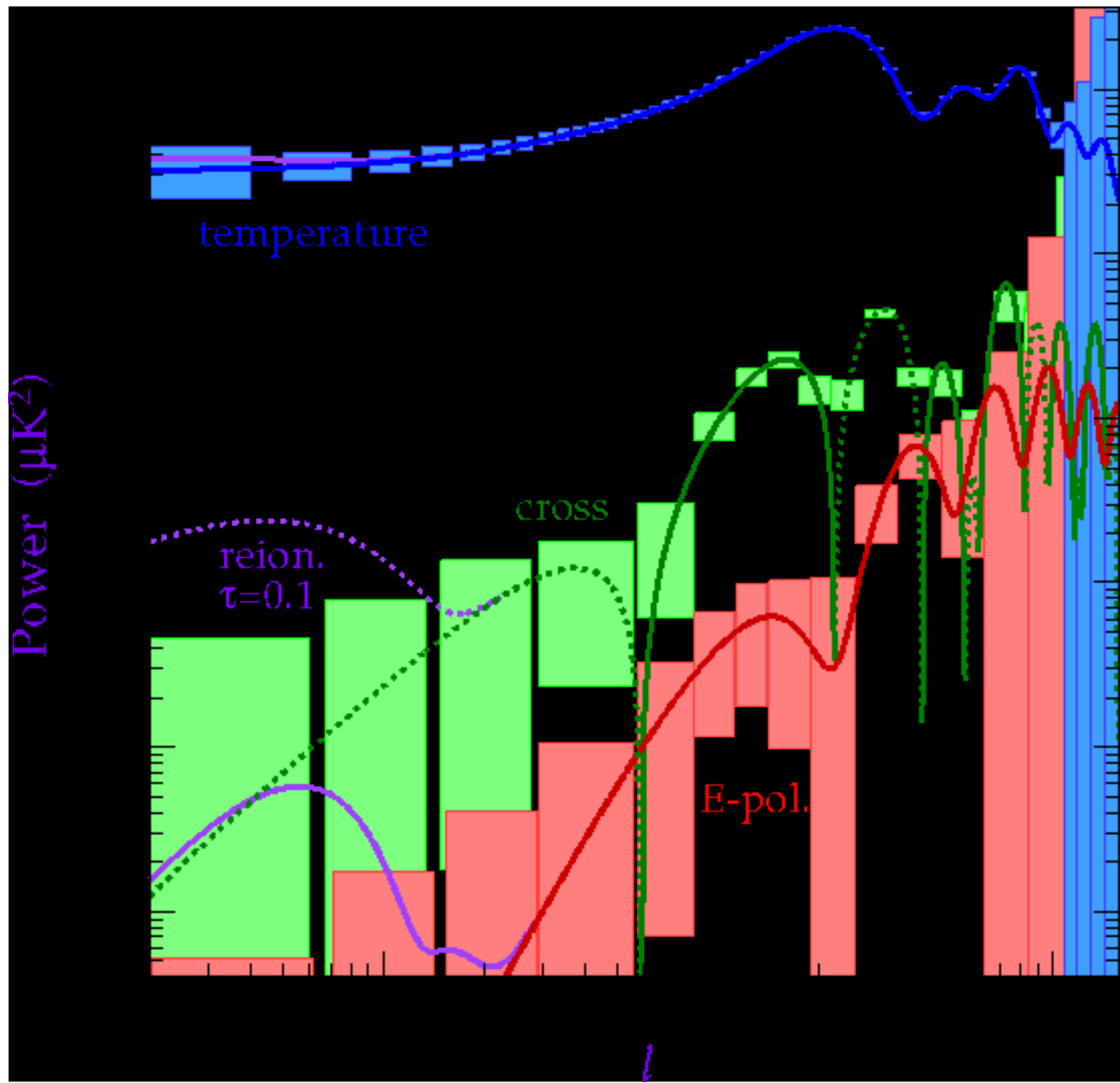
# Polarização tensorial



$$\oplus L=2, m=\pm 2$$

Tensors







# Observações

## ⊕ Grande número de experimentos:

⊕ Satélites: COBE, WMAP, **Planck**, DICES

⊕ Balão: FIRS, ARGO, MAX, MSAM, BAM, QMAP, BOOMERanG, MAXIMA, Top Hat, **HACME\***, **BEAST\***, **ACE\***, Archeops

⊕ Solo: **UCSB/SP\***, Saskatoon, Tenerife, CAT, Python, IAC/Bartol, White Dish, CAT, OVRO, ATCA, SuZIE, COLD, CG, Viper, COBRA, Jodrell Bank, Ryle, Brown/Wisc Polarization, MAT, DASI, VSA, VLA, VCA, CBI, POLAR, Polatron, ACBAR, **WMPol\***

\* INPE



# Cosmologia com a RCF no séc XXI

- ⊕ Polarização
- ⊕ Observações multifrequência em escalas  $< 1^\circ$
- ⊕ RCF "Deep Field"
- ⊕ Contaminantes
- ⊕ Efeito Sunyaev-Zel'dovich
  
- ⊕ Nova física?



# A RCFM e o INPE

- Início da pesquisa na área em 1982
- Colaborações atuais com:
  - Universidade da Califórnia, Santa Bárbara (EUA)
  - Jet Propulsion Lab (EUA)
  - Universidade de Illinois, Urbana-Champaign (EUA)
  - Universidade de Roma (Itália)
  - Universidade de Milão (EUA)

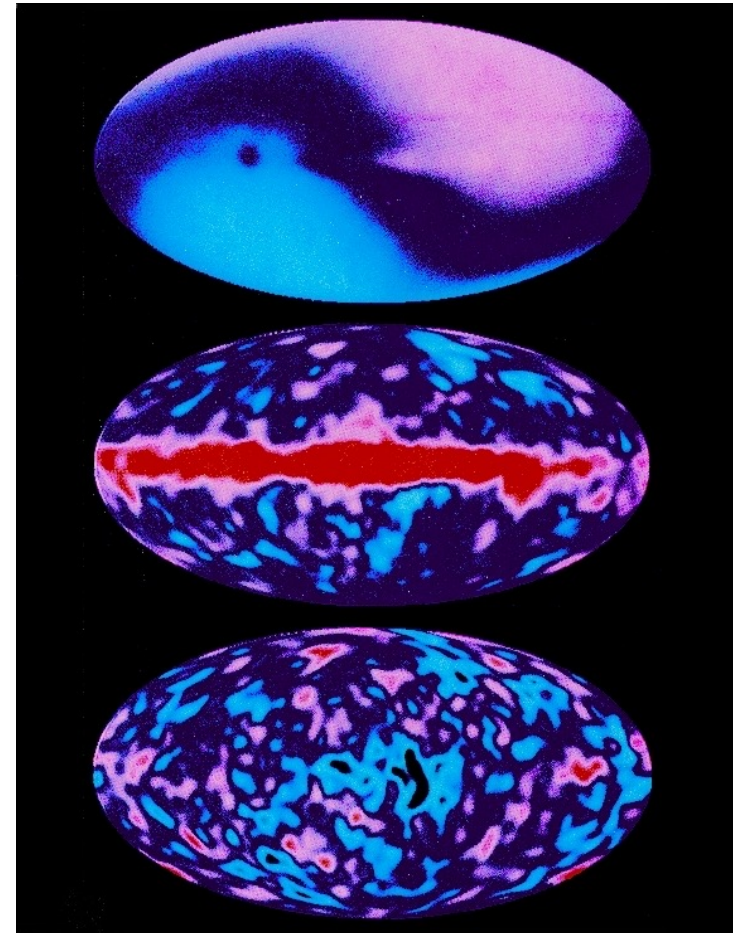
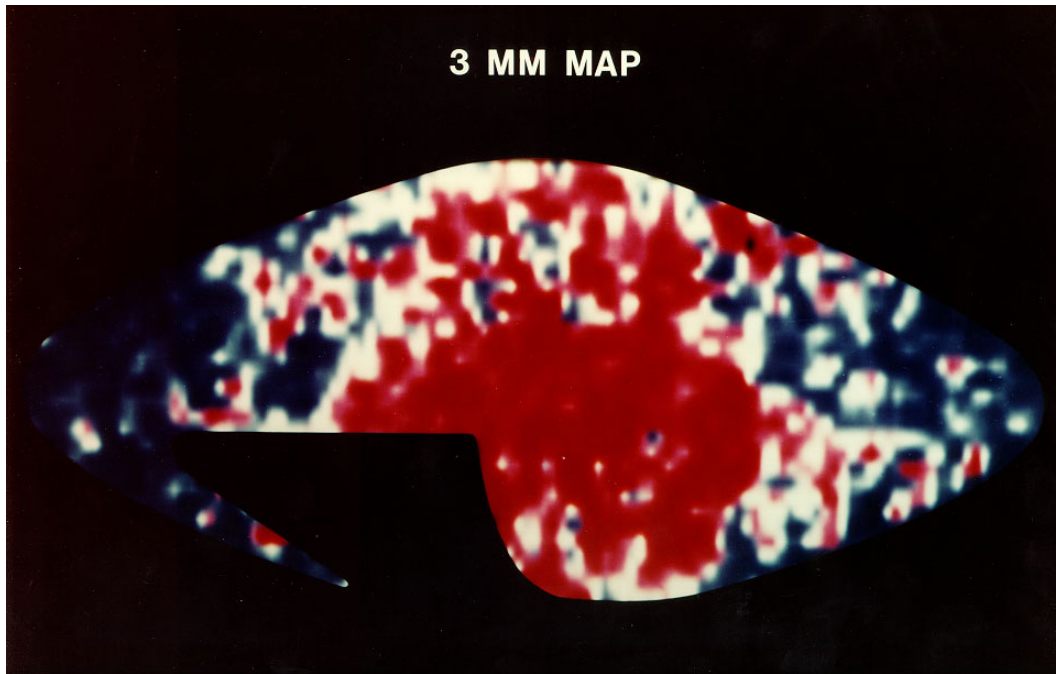


# *Experimentos realizados*

- Mapeamento do céu em 3 mm (1982-1986)
- ACME-SP (1989-1995)
- ACME-MAX (1990-1996)
- HACME (1996-2000)
- B EAST (2000-2005)

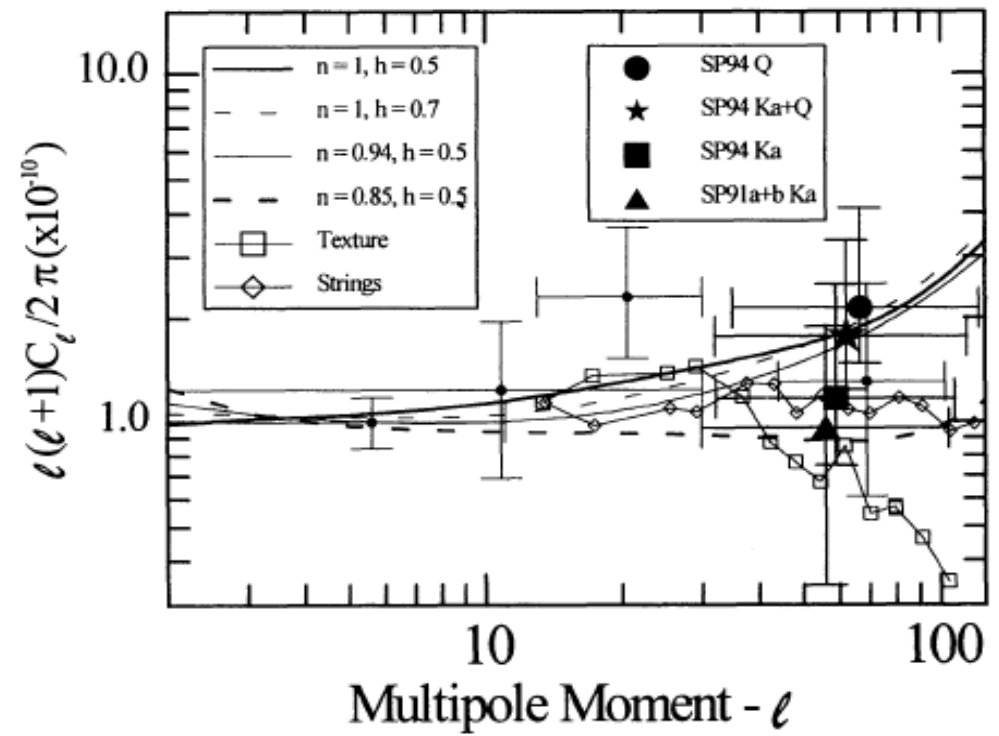


# Histórico: 1965 - 1992



Smoot et al. 92

# ACME-SP: 1991 - 1995



Logo após o COBE, experimentos foram realizados no Pólo Sul para medir a RCF em escalas angulares intermediárias (entre 30' e 2°).

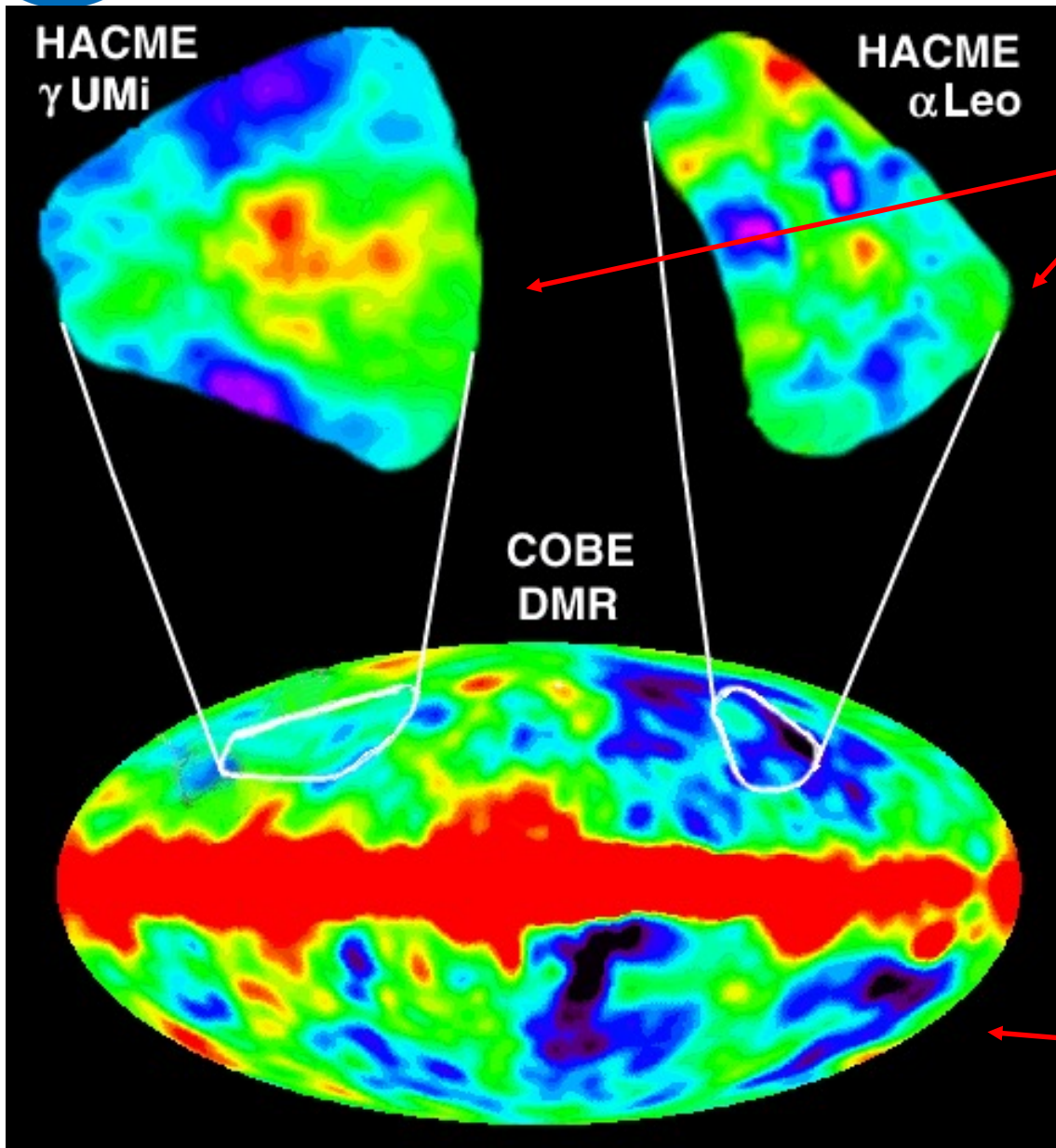
Os resultados obtidos pelo **A**dvanced **C**osmic **M**icrowave **E**xplorer (ACME-SP) representaram uma das primeiras estimativas do espectro de potência da RCF nas escalas acima mencionadas.





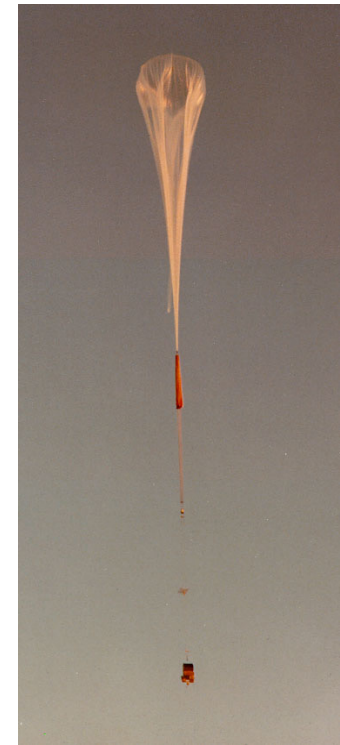


# HACME (vôo de balão – 7 horas)



**Tegmark et al. 2000**

**Staren et al. 2000**

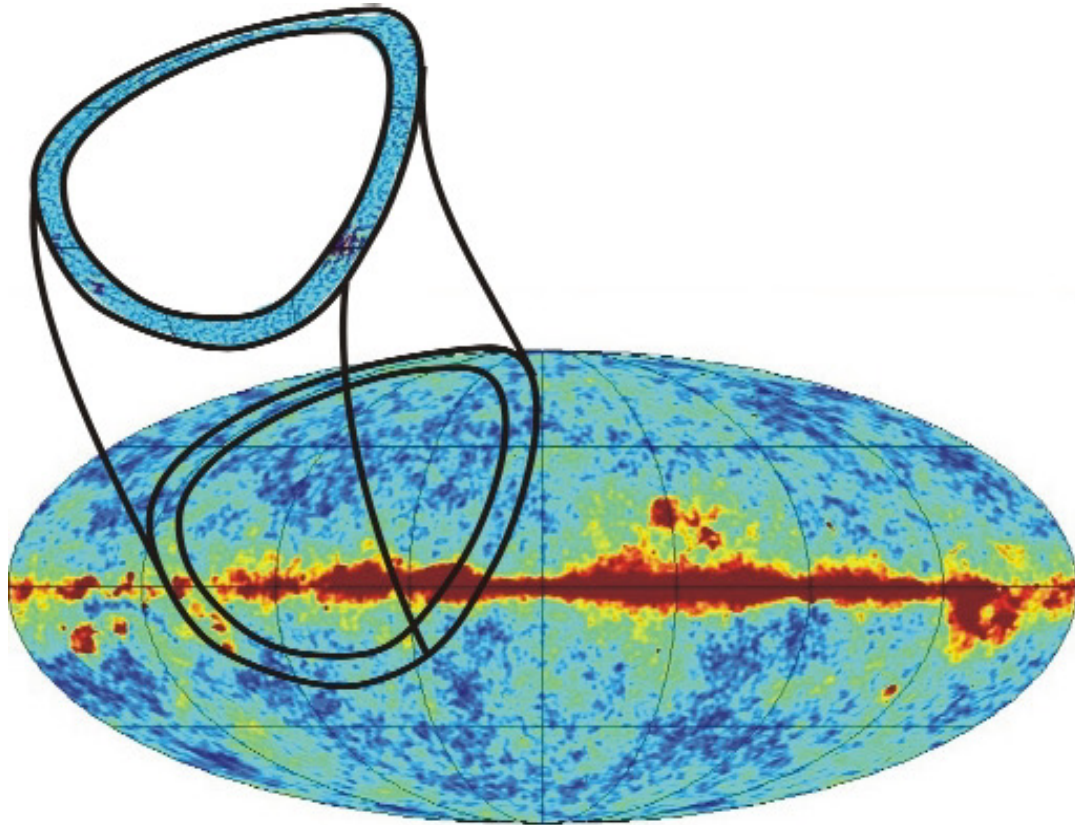


**Bennett et al. 1996**



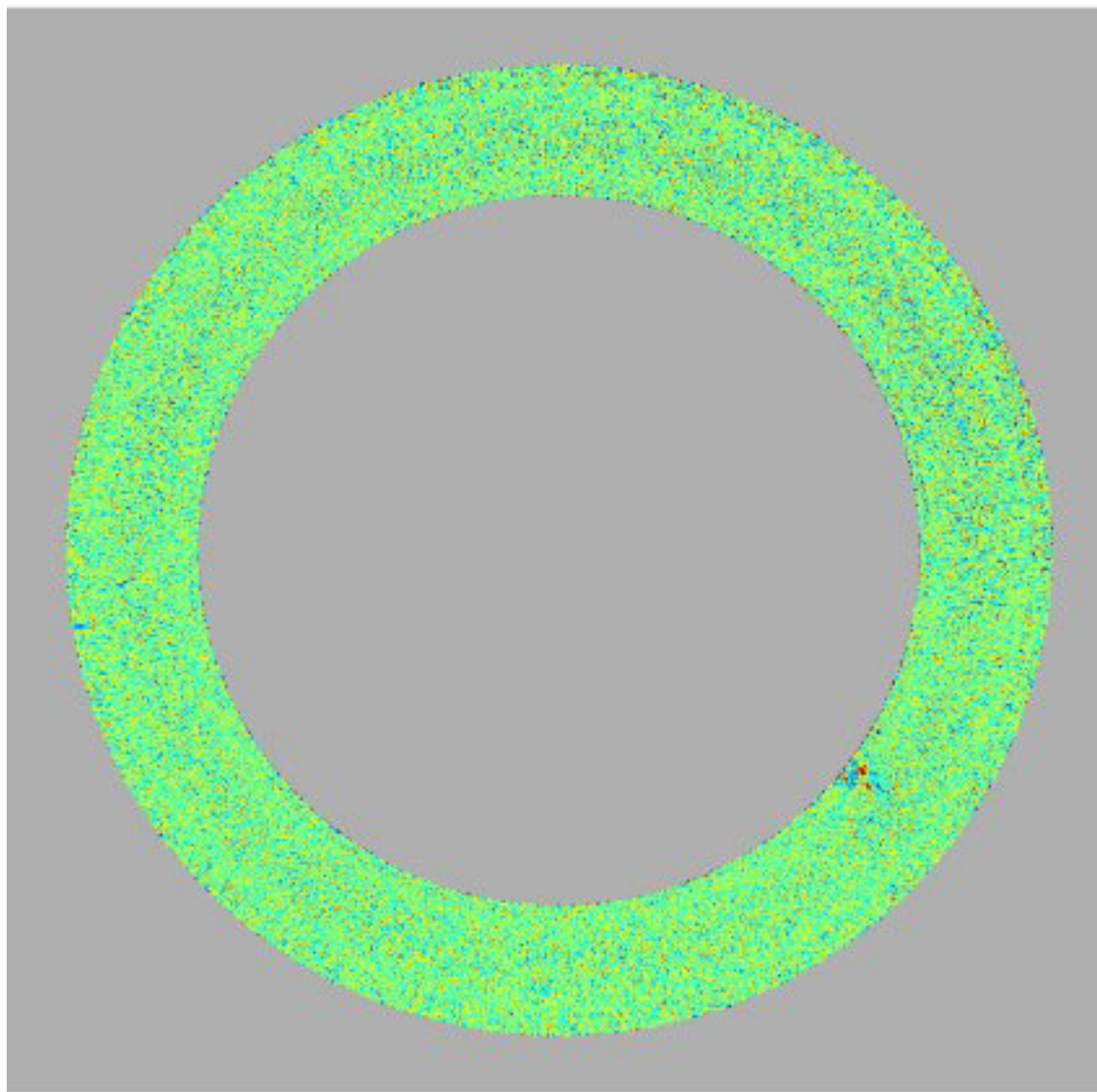
# O experimento BEAST (2000-2005)

**B**ackground **E**mission **A**nisotropy **S**canning  
**T**elescope





# Q band jackknife difference map



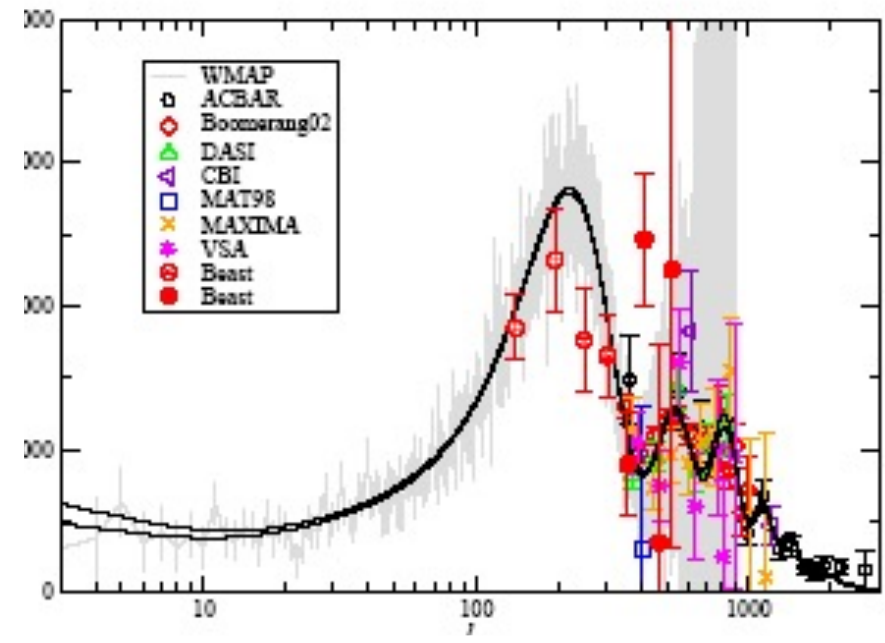
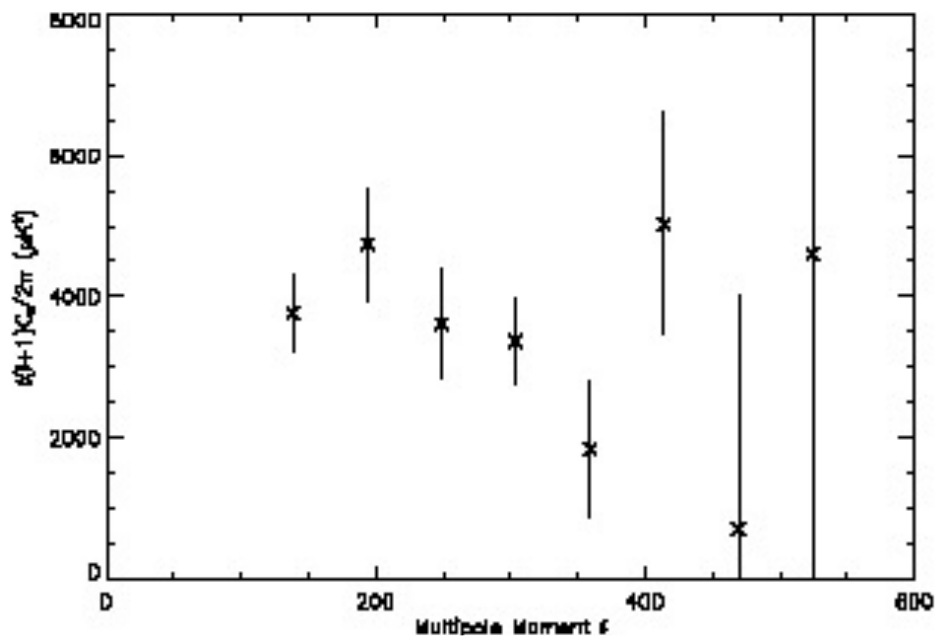
-1.00e-003  1.00e-003

(0.0, 90.0) Equatorial



# Espectro de potência

- 16 -



O'Dwyer et al. (Colaboração BEAST)

## COSMOLOGICAL PARAMETER ESTIMATES

Parameter	BEAST + Others
$\Omega_k$ .....	$-0.014 \pm 0.011$
$\Omega_{\text{CDM}}h^2$ .....	$0.094 \pm 0.012$
$\Omega_b h^2$ .....	$0.024 \pm 0.002$
$h$ .....	$0.727 \pm 0.048$
$n_s$ .....	$1.002 \pm 0.052$
$\tau$ .....	$0.154 \pm 0.074$
$Y_p$ .....	$0.249 \pm 0.001$



# *Contatos*

✪ Email:

[alex@das.inpe.br](mailto:alex@das.inpe.br)

✪ Home page:

<http://www.das.inpe.br/~alex>



# Formação de estruturas no Universo

