

# CURSO DE COSMOLOGIA 2013B

## PARTE I AULA 6

MARTÍN MAKLER  
CBPF

ICRA



CBPF

MCTI





# Parte Id

## O Universo perturbado

Radiação C3smica de Fundo e  
Estrutura em Grande Escala

# Perturbações Lineares





# Perturbações Lineares

- Perturbações dentro do raio de Hubble:  
Análise newtoniana



# Perturbações Lineares

- Perturbações dentro do raio de Hubble: Análise newtoniana
- Fora do raio de Hubble: tratamento relativístico



# Perturbações Lineares

- Perturbações dentro do raio de Hubble: Análise newtoniana
- Fora do raio de Hubble: tratamento relativístico
- Antes do desacoplamento: equações de Boltzmann



# Perturbações Lineares

- Perturbações dentro do raio de Hubble: Análise newtoniana
- Fora do raio de Hubble: tratamento relativístico
- Antes do desacoplamento: equações de Boltzmann
- Após: basicamente gravitação



# Teoria de formação de estruturas

- Limite newtoniano

- Equações de fluido

- Conservação da massa: 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0.$$

- Conservação do momentum (eq. de Euler):

- Equação de Poisson

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} \phi - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p.$$

- Relativístico

- Perturbar a métrica

- Perturbar as “equações de movimento”





# Teoria de perturbação relativística

- O ponto de partida da teoria de perturbação cosmológica é a métrica de Robertson-Walker perturbada:

$$\begin{aligned} ds^2 &= \left[ g_{\mu\nu}^{(0)} + g_{\mu\nu}^{(1)} \right] dx^\mu dx^\nu \\ &= a^2(\tau) \left[ -d\tau^2 + \gamma_{ij}(\vec{x}) dx^i dx^j + h_{\mu\nu}(\vec{x}, \tau) dx^\mu dx^\nu \right] , \end{aligned}$$

- Desacoplamento entre os modos no regime linear
- Perturbações escalares:

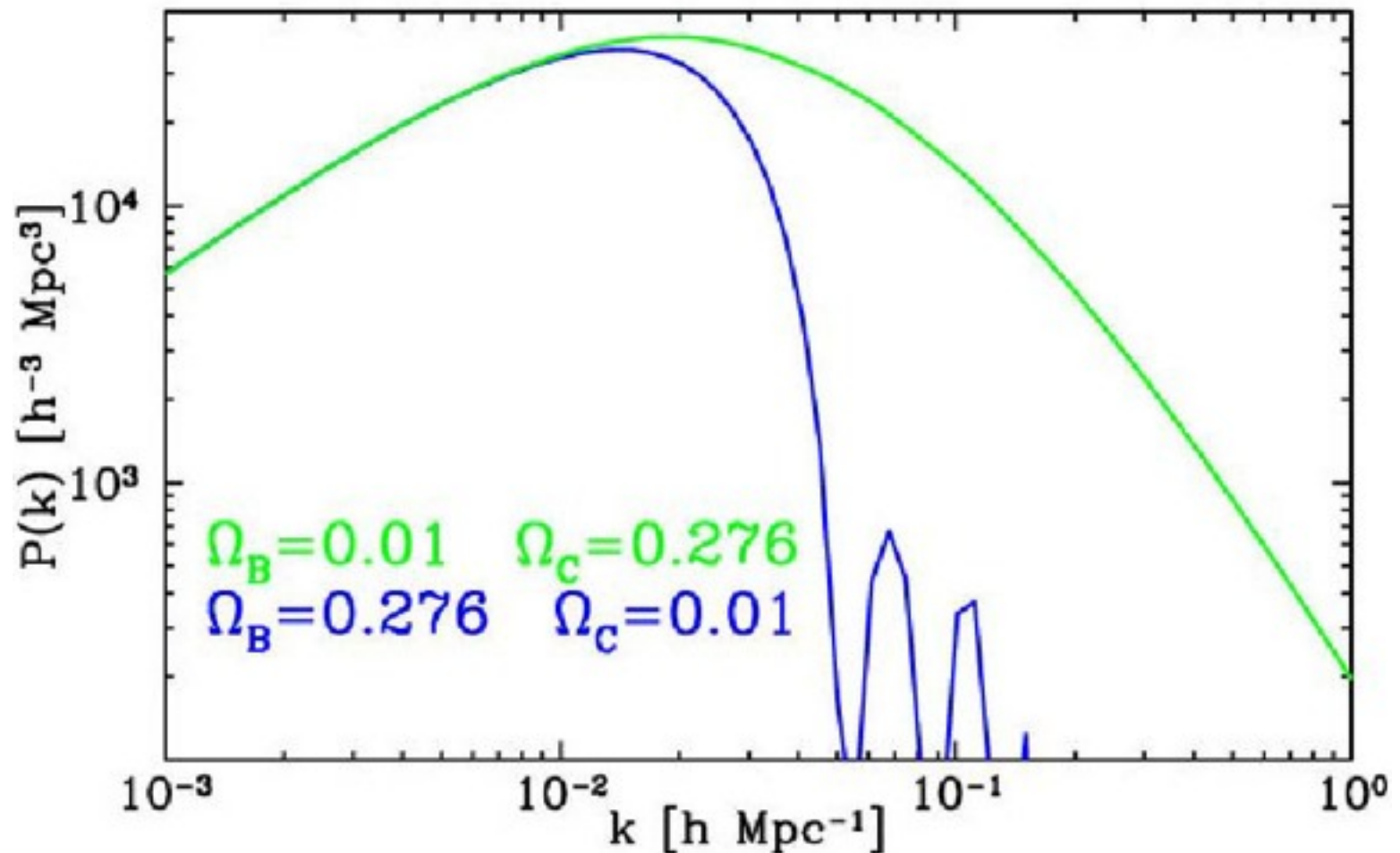
$$ds^2 = a^2(\tau) \left[ -(1 + 2\Psi)d\tau^2 + (1 - 2\phi)\gamma_{ij} dx^i dx^j \right]$$

(para um fluido perfeito  $\phi = \Psi$ )



# Resultados da análise linear

## Necessidade de Matéria Escura





# Resultados da análise linear

## Necessidade de Matéria Escura

- Matéria bariônica: só pode se aglomerar depois de  $t_{\text{dec}}$  ( $\sim 380.000$  anos) e para  $r > \lambda_J$
- CDM se aglomera a partir de  $t_{\text{eq}}$  ( $\sim 56.000$  anos)
- Bárions seguem os poços de potencial da matéria escura
- Amortecimento de Silk diminui amplitude de perturbações nos bárions

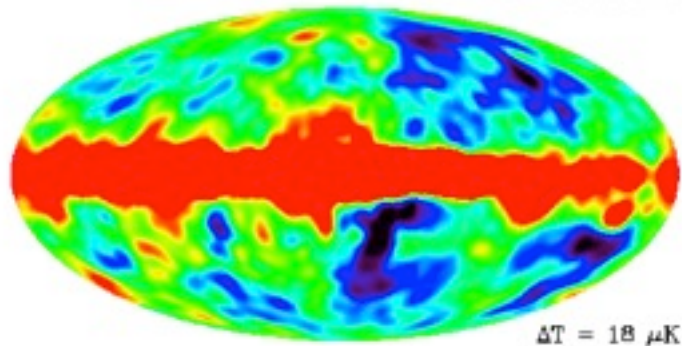
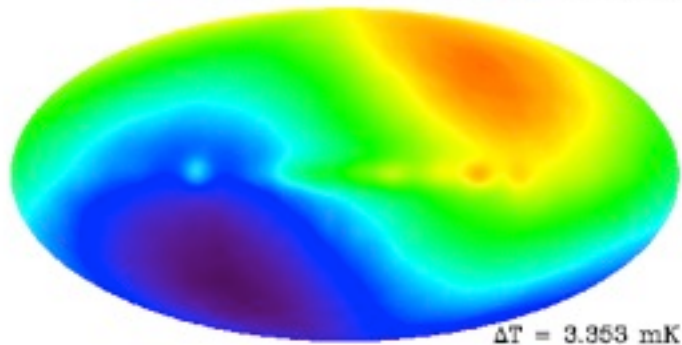


# Flutuações na radiação cósmica de fundo

## Anisotropias



# Anisotropias na Radiação C3smica de Fundo

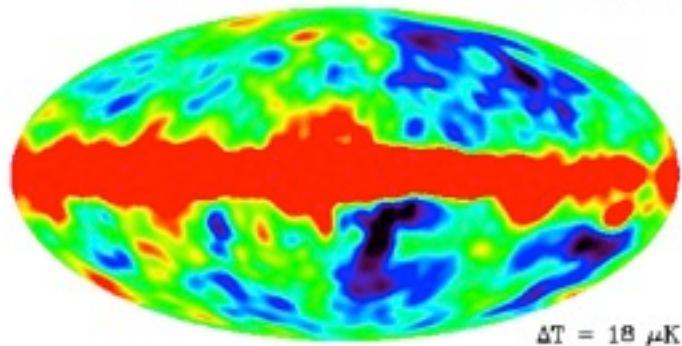
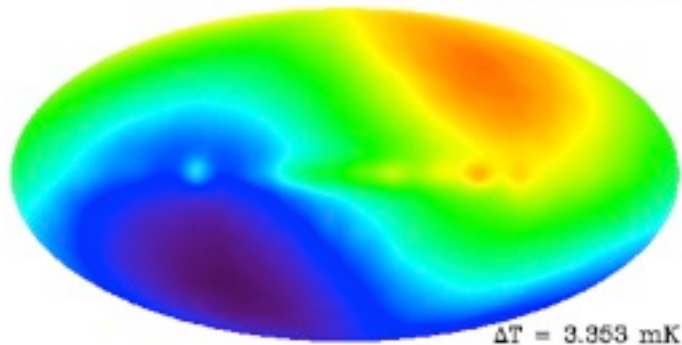
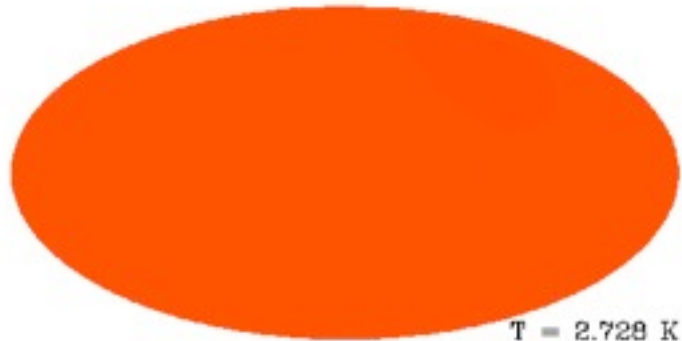


- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$ . Desvio para o vermelho,  $z = 1089$
- Universo primordial altamente homog4neo
- Dipolo:  
 $\Delta T = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK}$   
 $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360 \text{ Km/s}$
- Flutua33es de temperatura:

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



# Anisotropias na Radiação C3smica de Fundo



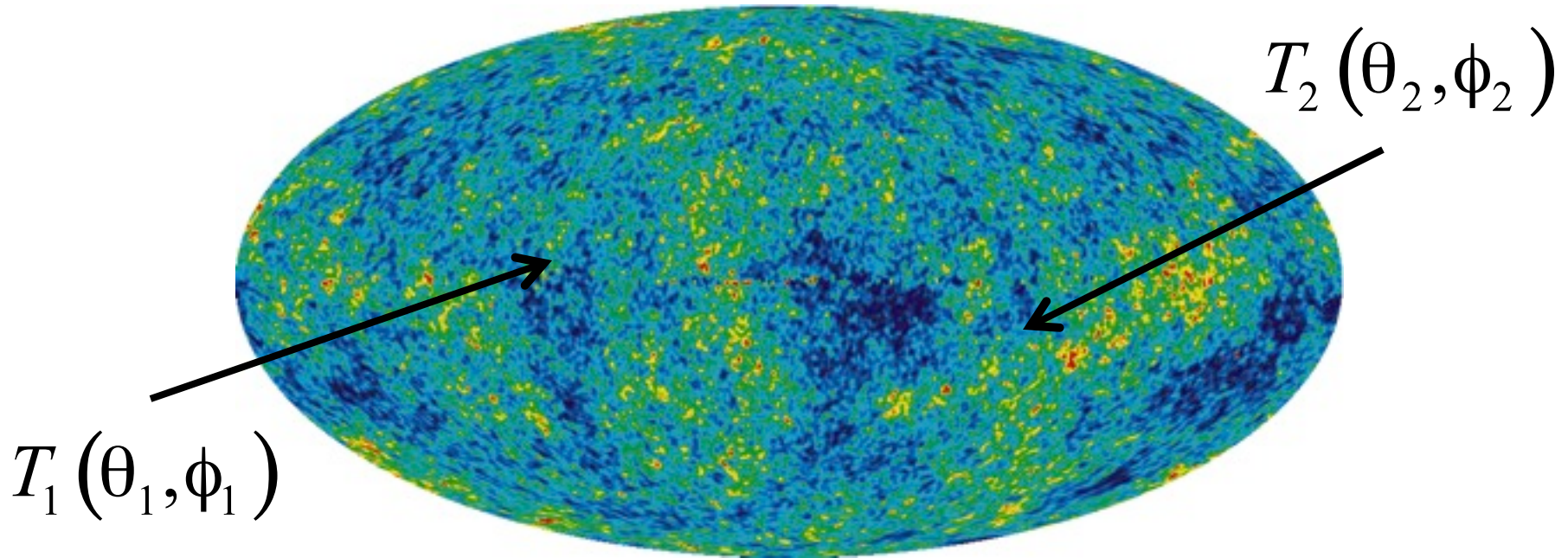
- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$ . Desvio para o vermelho,  $z = 1089$
- Universo primordial altamente homog4neo
- Dipolo:  
 $\Delta T = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK}$   
 $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360 \text{ Km/s}$
- Flutua33es de temperatura:

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

**Pr4emios Nobel: 1978, 2006**



# Espectro de Potência da Radiação Cós mica de Fundo



$$\langle T_1 T_2 \rangle = \sum a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$\left\langle |a_{lm}|^2 \right\rangle^{1/2} \equiv C_l$$

WMAP2008



# Anisotropias na RCF

- Anisotropias primárias

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ \Psi - \hat{r} \cdot \vec{v} + \frac{1}{3} \delta_m \right]_{\eta_{ls}}$$





# Anisotropias na RCF

- Anisotropias primárias

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ \Psi - \hat{r} \cdot \vec{v} + \frac{1}{3} \delta_m \right]_{\eta_{ls}}$$

↑  
Efeito  
Doppler



# Anisotropias na RCF

- Anisotropias primárias

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ \Psi - \hat{r} \cdot \vec{v} + \frac{1}{3} \delta_m \right]_{\eta_{ls}}$$

Efeito Doppler

Flutuação intrínseca de temperatura



# Anisotropias na RCF

- Anisotropias primárias

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ \Psi - \hat{r} \cdot \vec{v} + \frac{1}{3} \delta_m \right]_{\eta_{ls}}$$

Efeito Sachs-Wolfe

Efeito Doppler

Flutuação intrínseca de temperatura



# Anisotropias na RCF

- Anisotropias primárias

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ \Psi - \hat{r} \cdot \vec{v} + \frac{1}{3} \delta_m \right]_{\eta_{ls}}$$

Efeito Sachs-Wolfe

Efeito Doppler

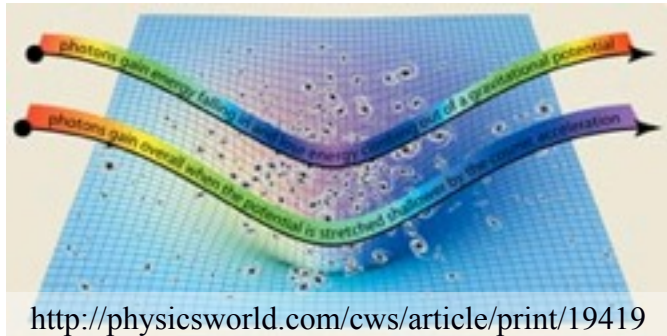
Flutuação intrínseca de temperatura

- Em grandes escalas  $\delta_m \simeq 2\Psi$   
→ Sachs-Wolfe plateau
- Em pequenas escalas:  
oscilações acústicas de bárions



# Efeito Sachs-Wolfe Integrado

- Efeito acumulado dos desvios gravitacionais:

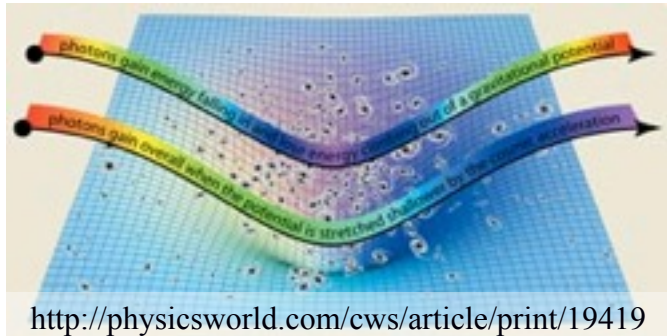


$$\frac{\delta T_{ISW}}{T} = 2 \int_{\tau_{dec}}^{\tau_0} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\tau$$



# Efeito Sachs-Wolfe Integrado

- Efeito acumulado dos desvios gravitacionais:



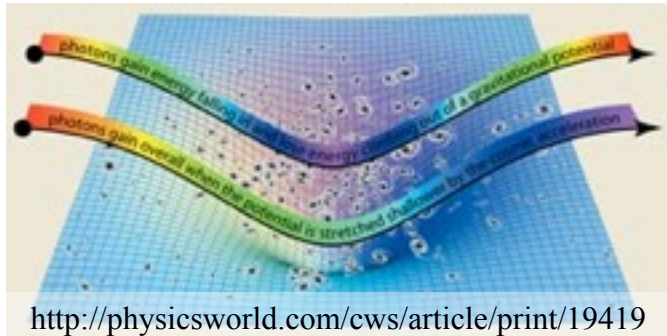
$$\frac{\delta T_{ISW}}{T} = 2 \int_{\tau_{dec}}^{\tau_0} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\tau$$

- Evolução linear,  $\Omega_M = 1 \rightarrow \phi = const.$



# Efeito Sachs-Wolfe Integrado

- Efeito acumulado dos desvios gravitacionais:



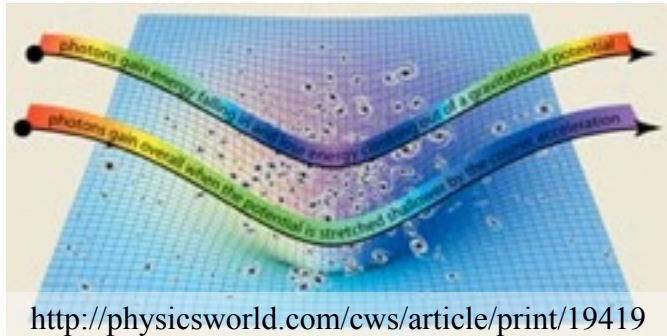
$$\frac{\delta T_{ISW}}{T} = 2 \int_{\tau_{dec}}^{\tau_0} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\tau$$

- Evolução linear,  $\Omega_M = 1 \rightarrow \phi = const.$
- Efeito tardio:
  - Correlação entre radiação cósmica de fundo e estrutura em grande escala!



# Efeito Sachs-Wolfe Integrado

- Efeito acumulado dos desvios gravitacionais:



$$\frac{\delta T_{ISW}}{T} = 2 \int_{\tau_{dec}}^{\tau_0} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\tau$$

- Evolução linear,  $\Omega_M = 1 \rightarrow \phi = const.$
- Efeito tardio:
  - Correlação entre radiação cósmica de fundo e estrutura em grande escala!



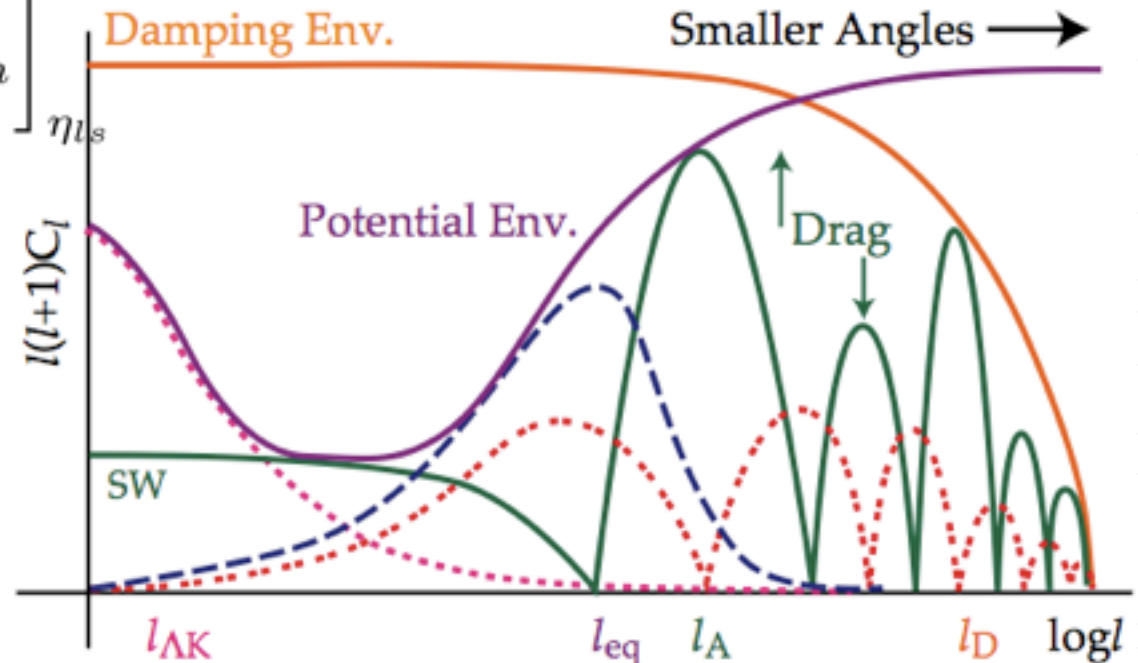
**Energia escura**





# Combinando as contribuições

$$\frac{\Delta T}{T} = \left[ \Psi - \hat{r} \cdot \vec{v} + \frac{1}{3} \delta_m \right]_{\eta_{ls}} + 2 \int_{\tau_{dec}}^{\tau_0} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} d\tau$$

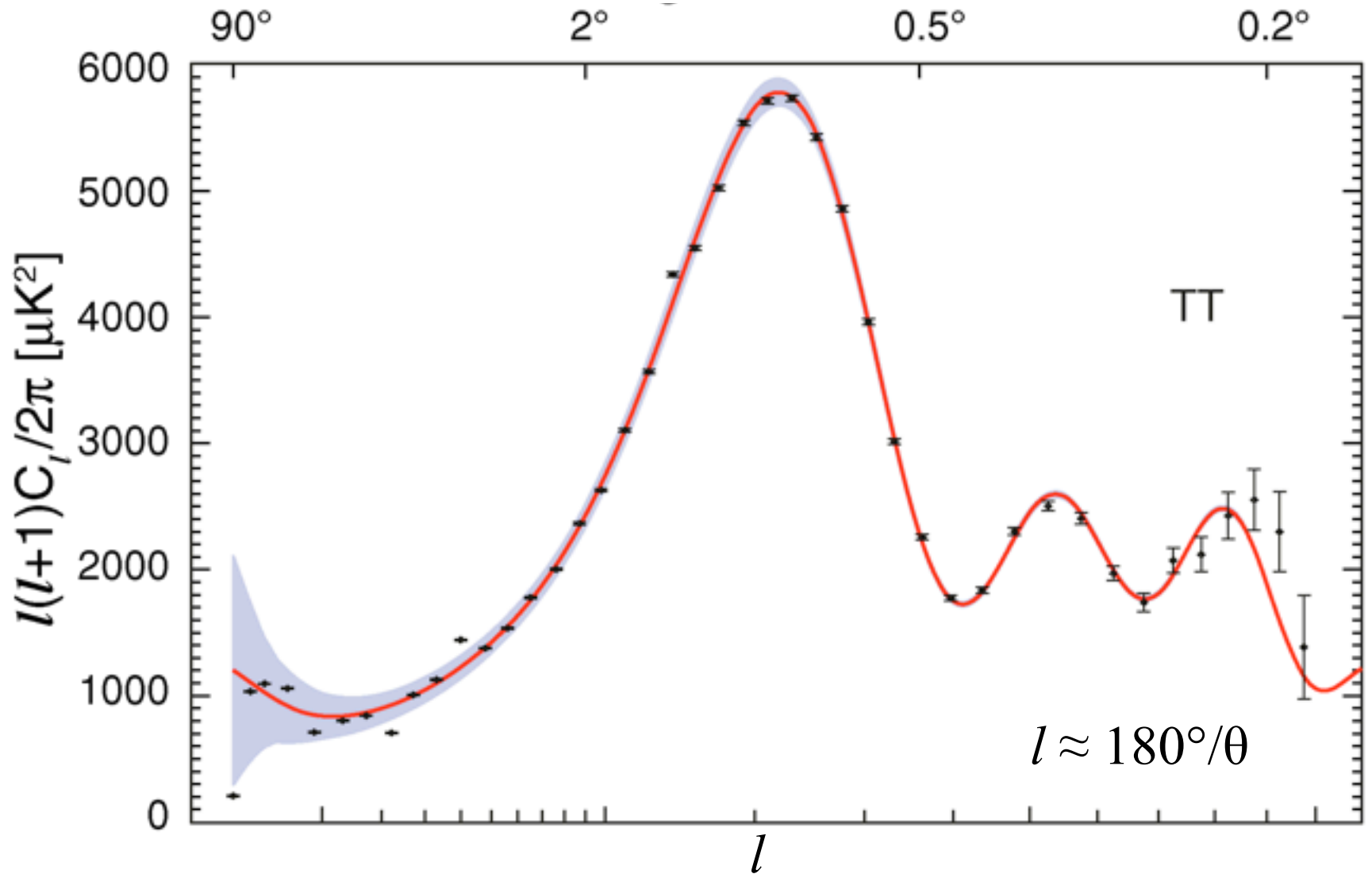


- **Amortecimento:**

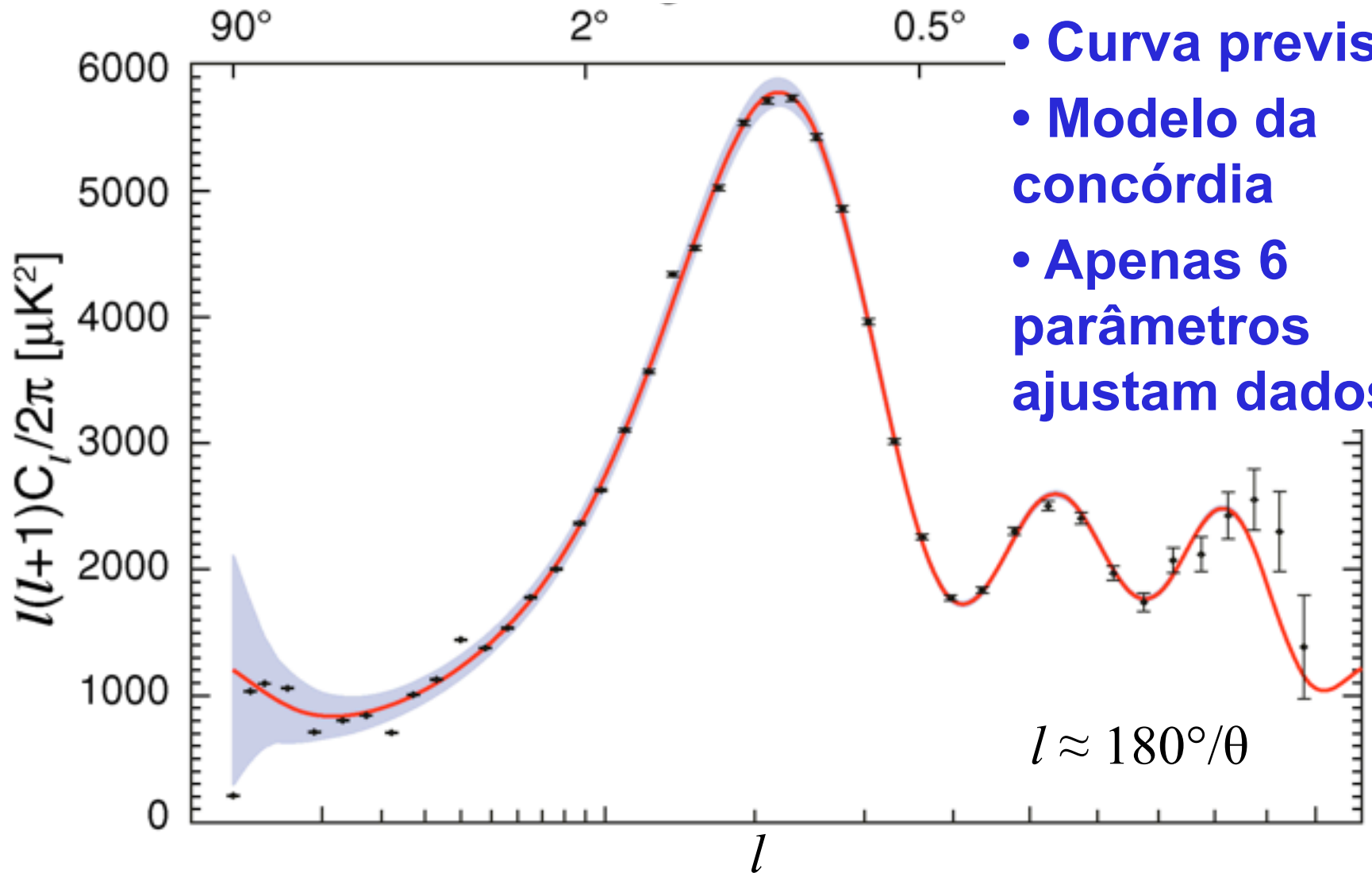
- Difusão dos fótons em regiões quentes (Silk damping)
- Espessura finita da superfície de último espalhamento

	$\Omega_K$	$\Omega_\Lambda$	$\Omega_0 h^2$	$\Omega_B h^2$	
$l_{\Lambda K}$	↑	↑	●	●	●·····● Late ISW
$l_{eq}$	↑	↓	↑	●	●- - - - ● Early ISW
$l_A$	↑	↓	↓	↑	●- - - - ● Eff. Temp.
$l_D$	↑	↓	↓	↑	●·····● Doppler

# Espectro de Potência Segundo o WMAP5



# Espectro de Potência Segundo o WMAP5



- Curva prevista
- Modelo da concórdia
- Apenas 6 parâmetros ajustam dados!



# Picos na Radiação C3smica de Fundo

Escala angular do horizonte ac3stico no desacoplamento:

$$\theta_A = \frac{r_s(z_{dec})}{d_A(z_{dec})}$$

Horizonte ac3stico

$$r_s = \int_0^{\tau_{dec}} c_s d\tau$$

onde

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{3 \left( 1 + \frac{3}{4} \frac{\rho_b}{\rho_\gamma} \right)}}$$

Dist4ncia Di4metro Angular

$$d_A = c(1+z)^{-1} \frac{1}{\sqrt{|1-\Omega_0|}} S \left( \sqrt{|1-\Omega_0|} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right)$$



# Picos na Radiação C3smica de Fundo

Escala angular do horizonte ac3stico no desacoplamento:

$$\theta_A = \frac{r_s(z_{dec})}{d_A(z_{dec})}$$

Horizonte ac3stico

$$r_s = \int_0^{\tau_{dec}} c_s d\tau$$

R3gua  
Padr3o

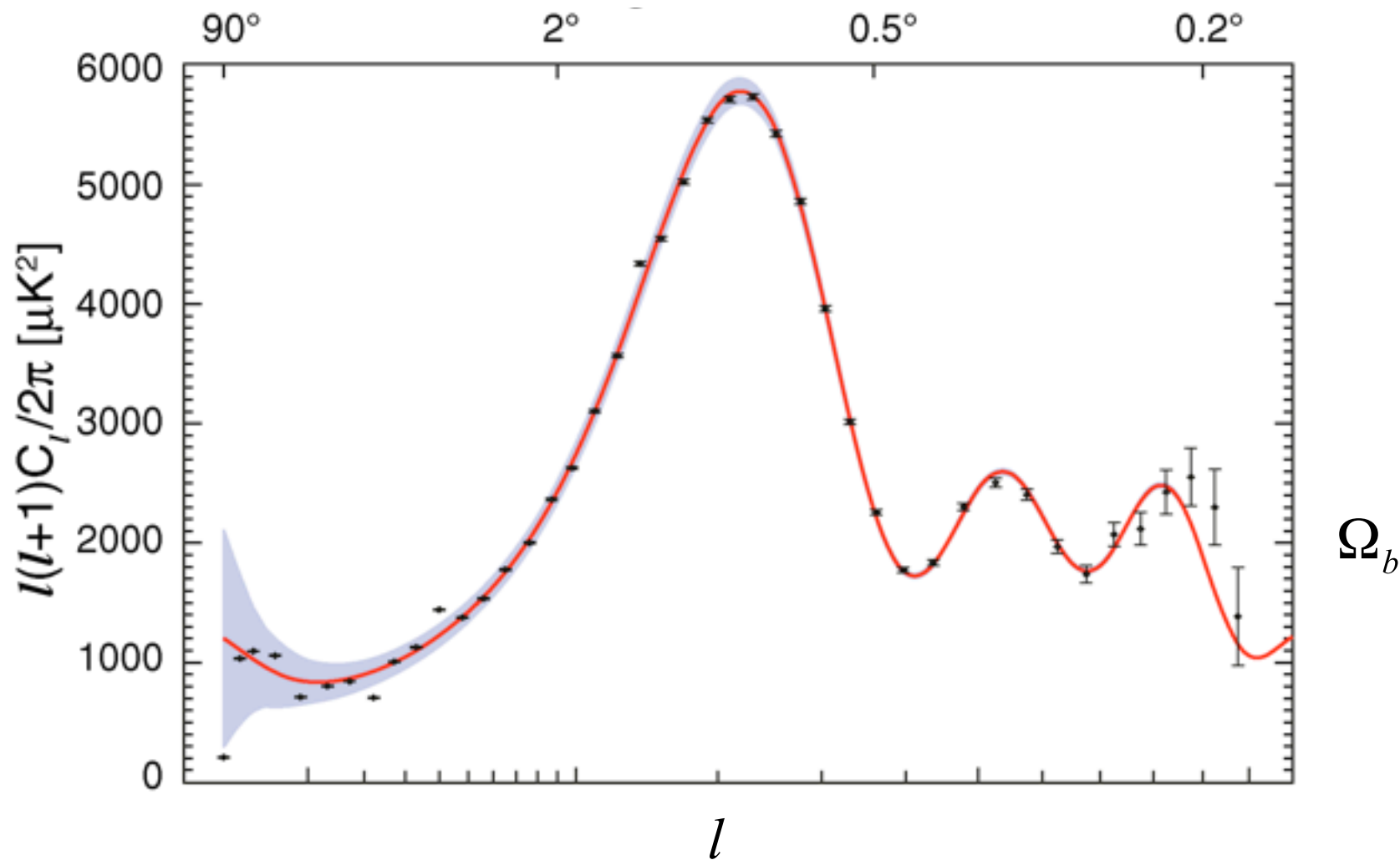
onde

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{3 \left( 1 + \frac{3}{4} \frac{\rho_b}{\rho_\gamma} \right)}}$$

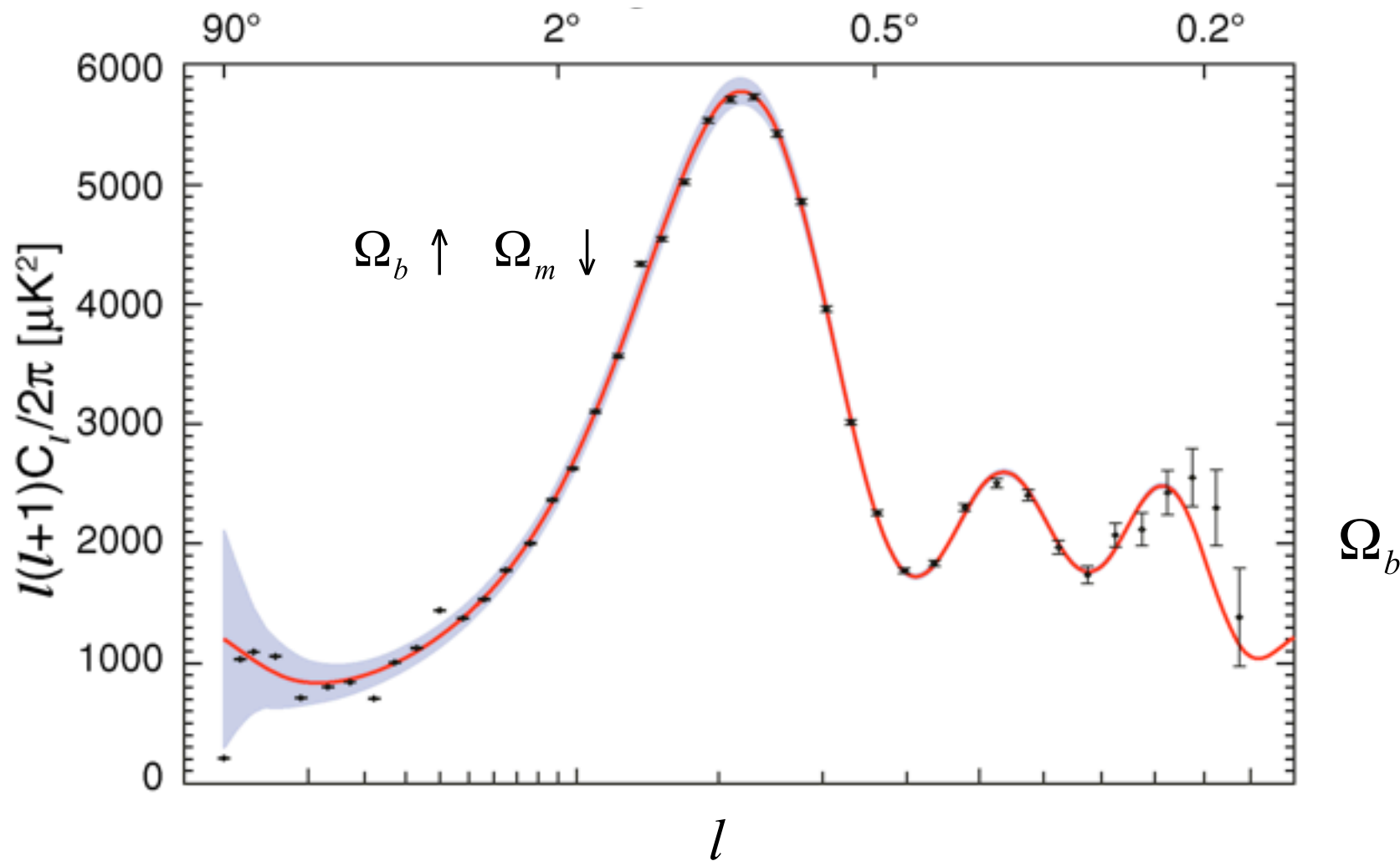
Dist4ncia Di4metro Angular

$$d_A = c(1+z)^{-1} \frac{1}{\sqrt{|1-\Omega_0|}} S \left( \sqrt{|1-\Omega_0|} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right)$$

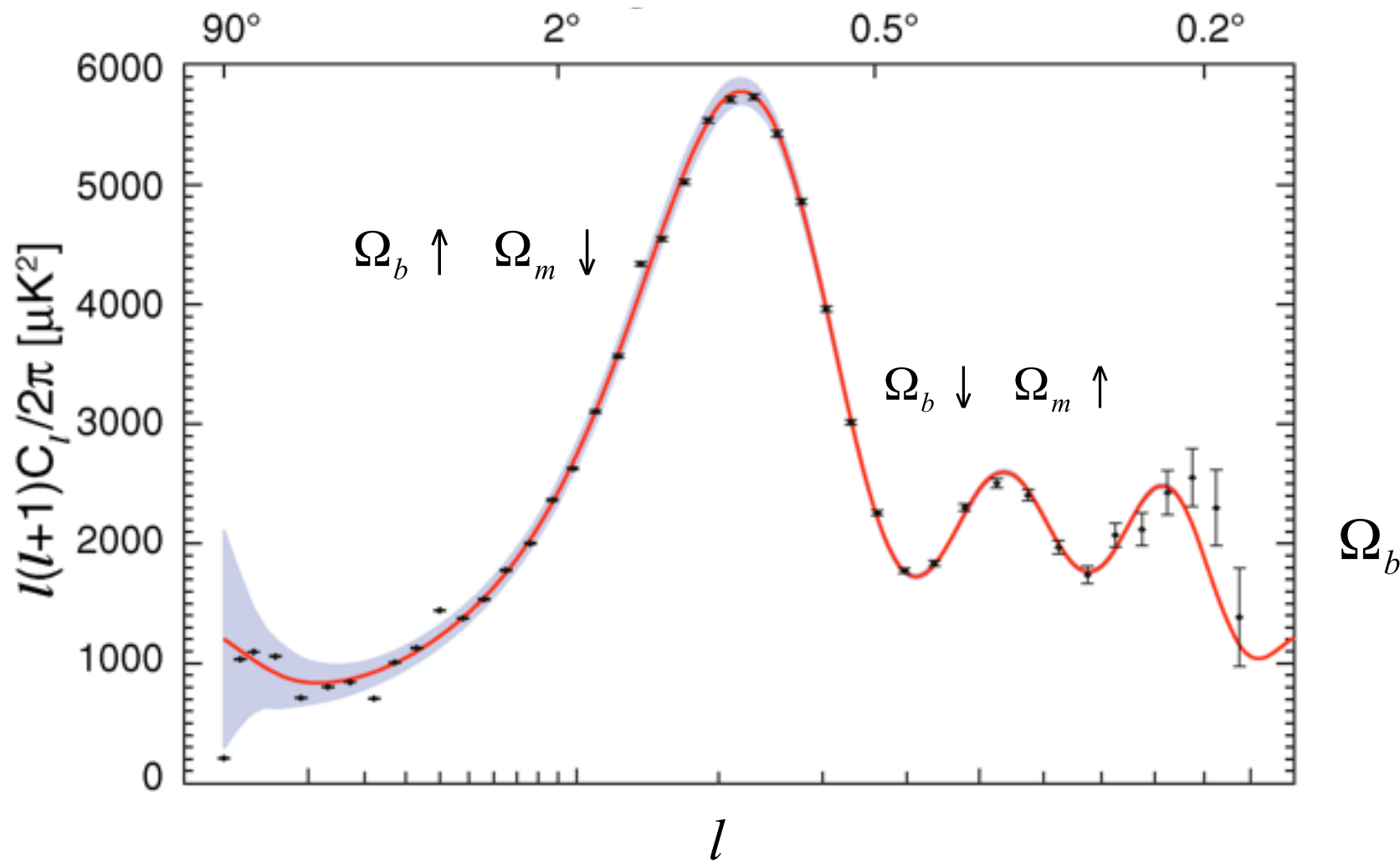
# Espectro de Potência Segundo o WMAP5



# Espectro de Potência Segundo o WMAP5

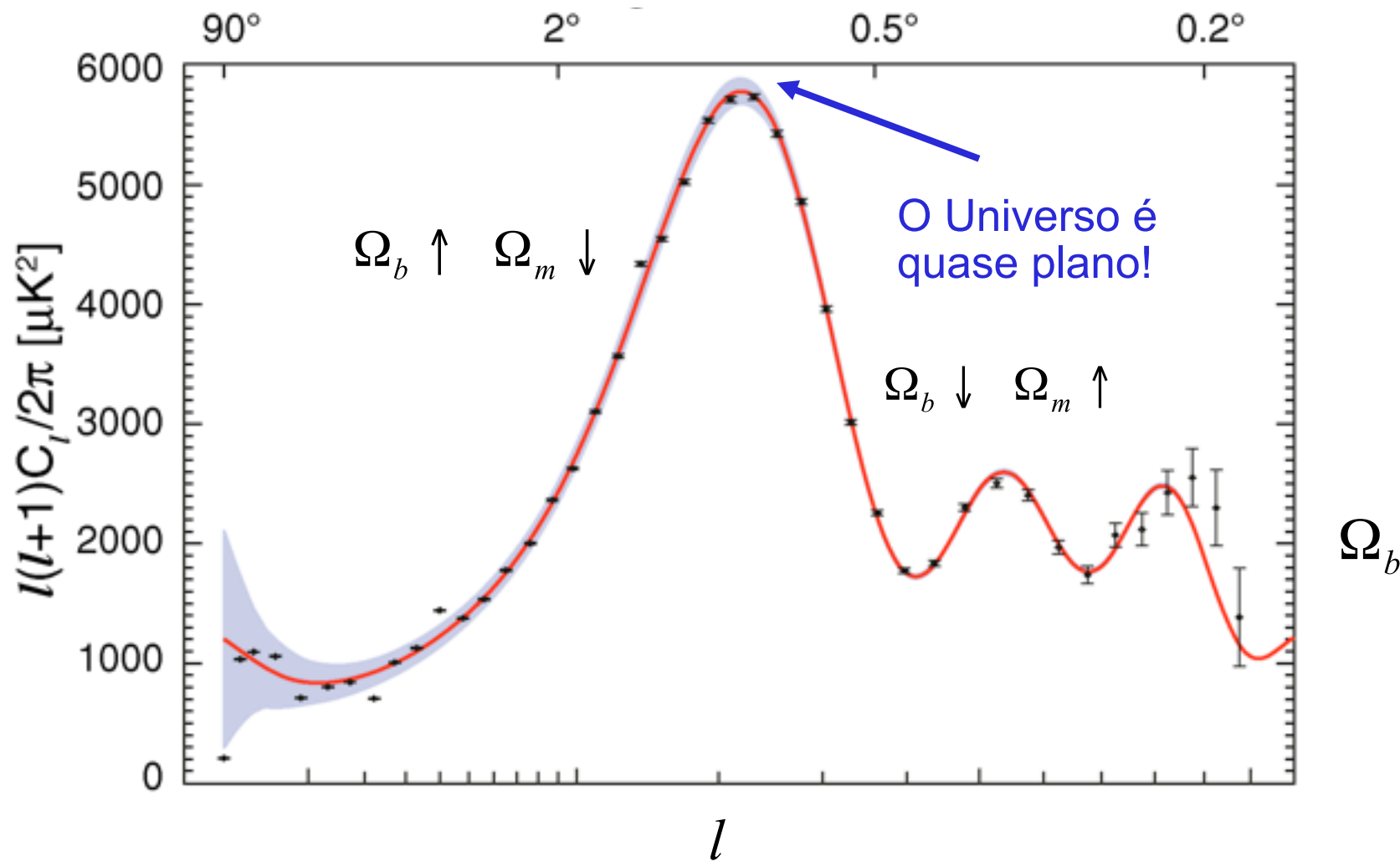


# Espectro de Potência Segundo o WMAP5

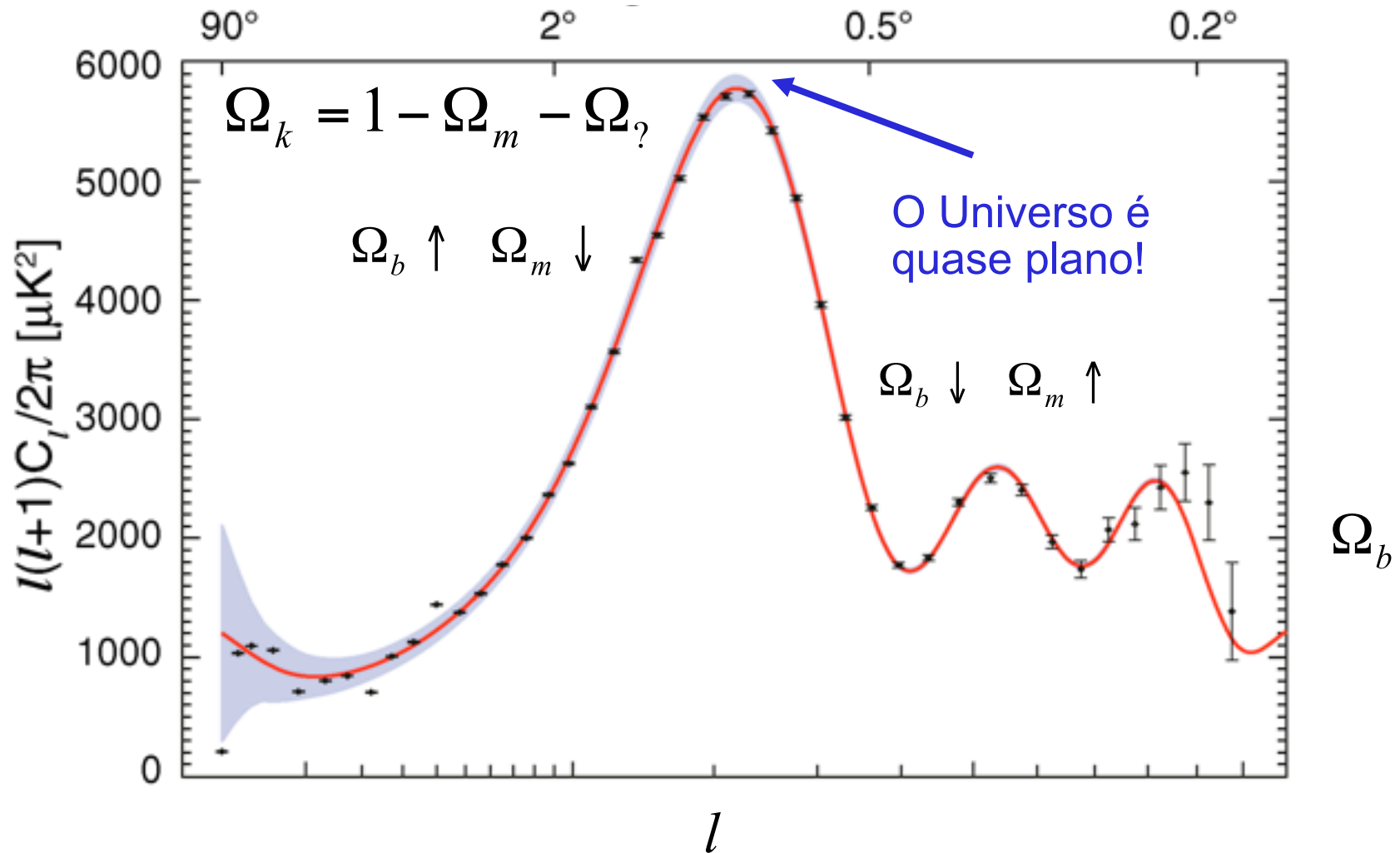




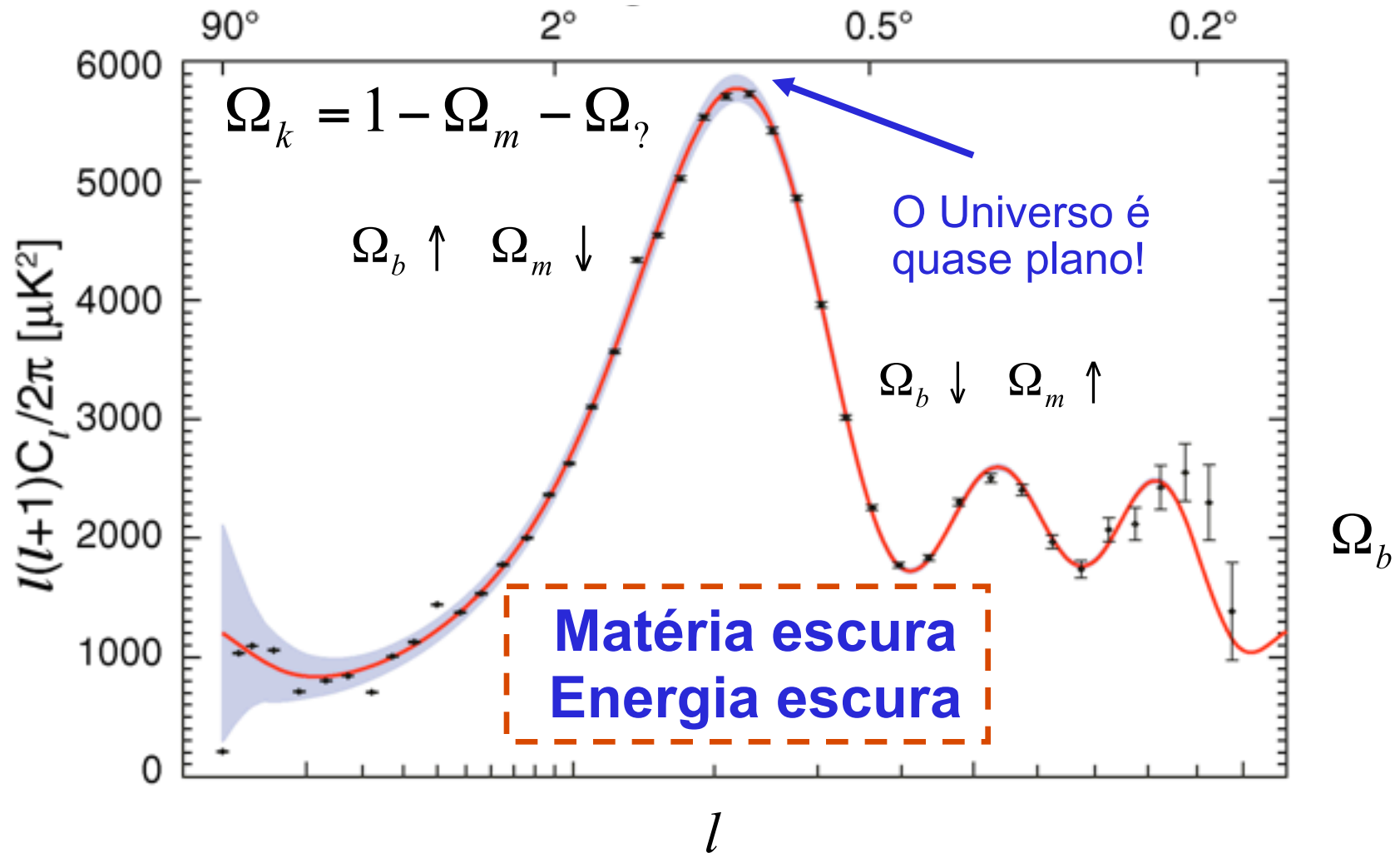
# Espectro de Potência Segundo o WMAP5



# Espectro de Potência Segundo o WMAP5

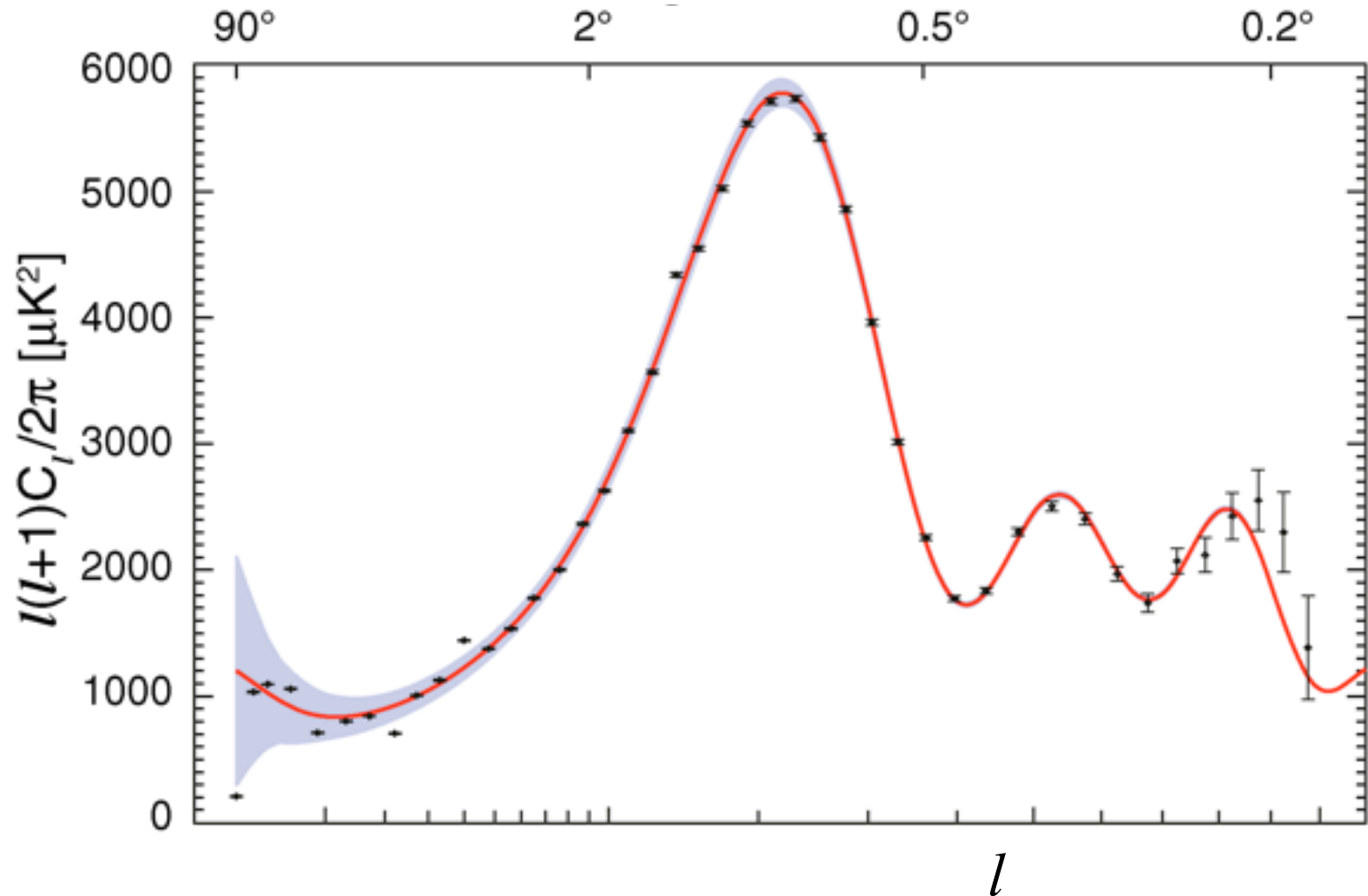


# Espectro de Potência Segundo o WMAP5



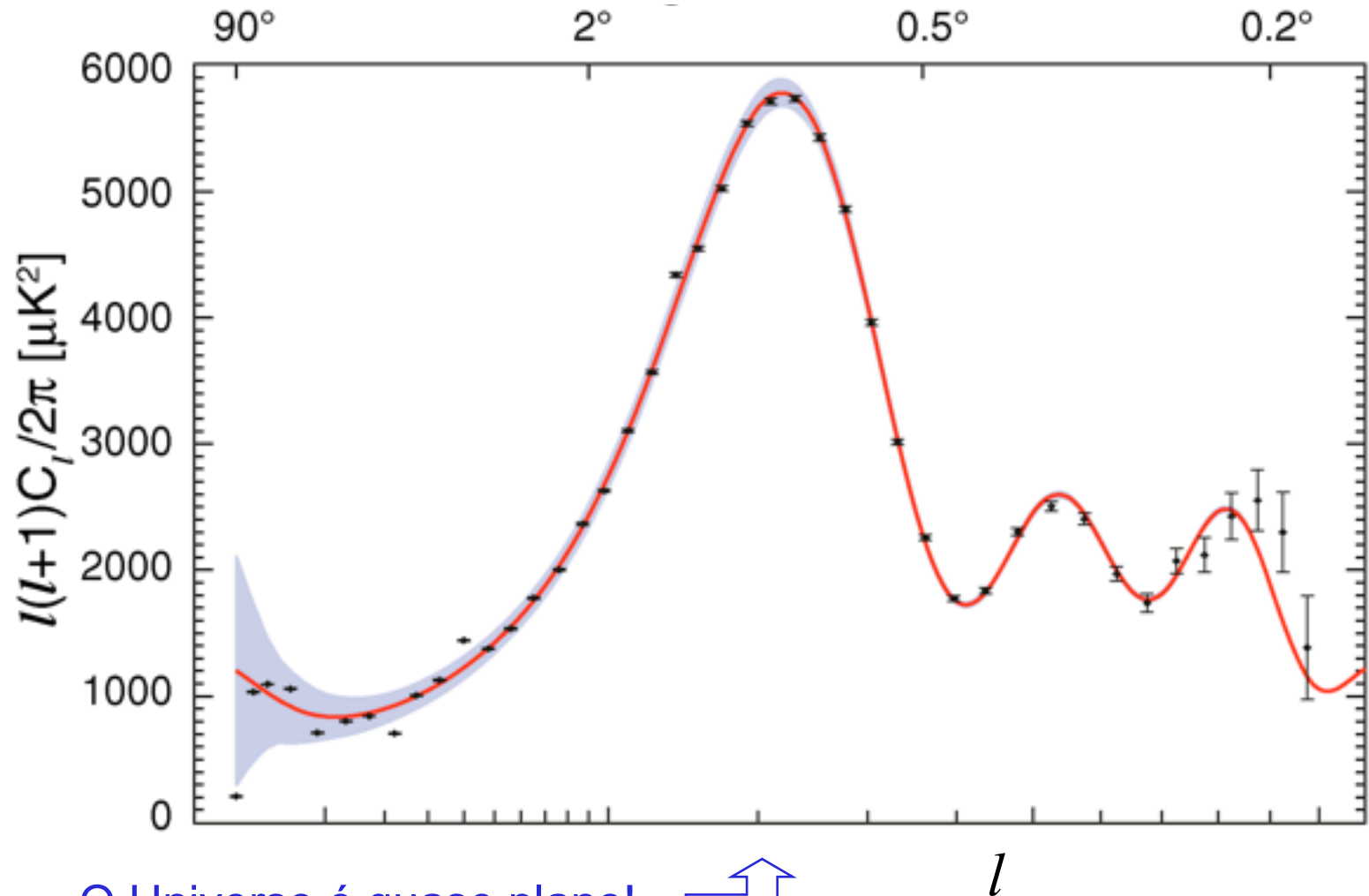
# Informações preciosas sobre o Universo

## “O Graal da Cosmologia”



# Informações preciosas sobre o Universo

## “O Graal da Cosmologia”



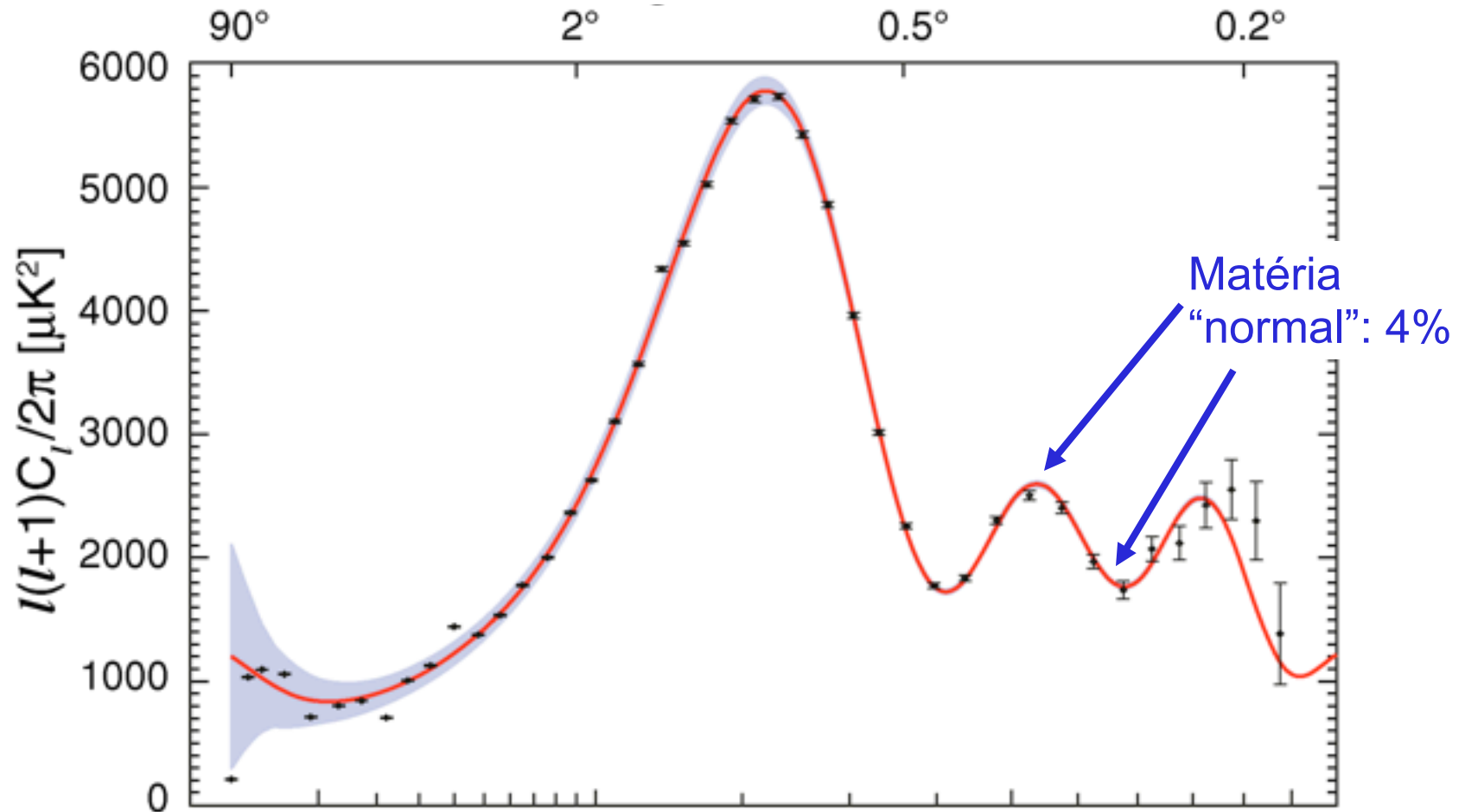
O Universo é quase plano!



$l$

# Informações preciosas sobre o Universo

## “O Graal da Cosmologia”



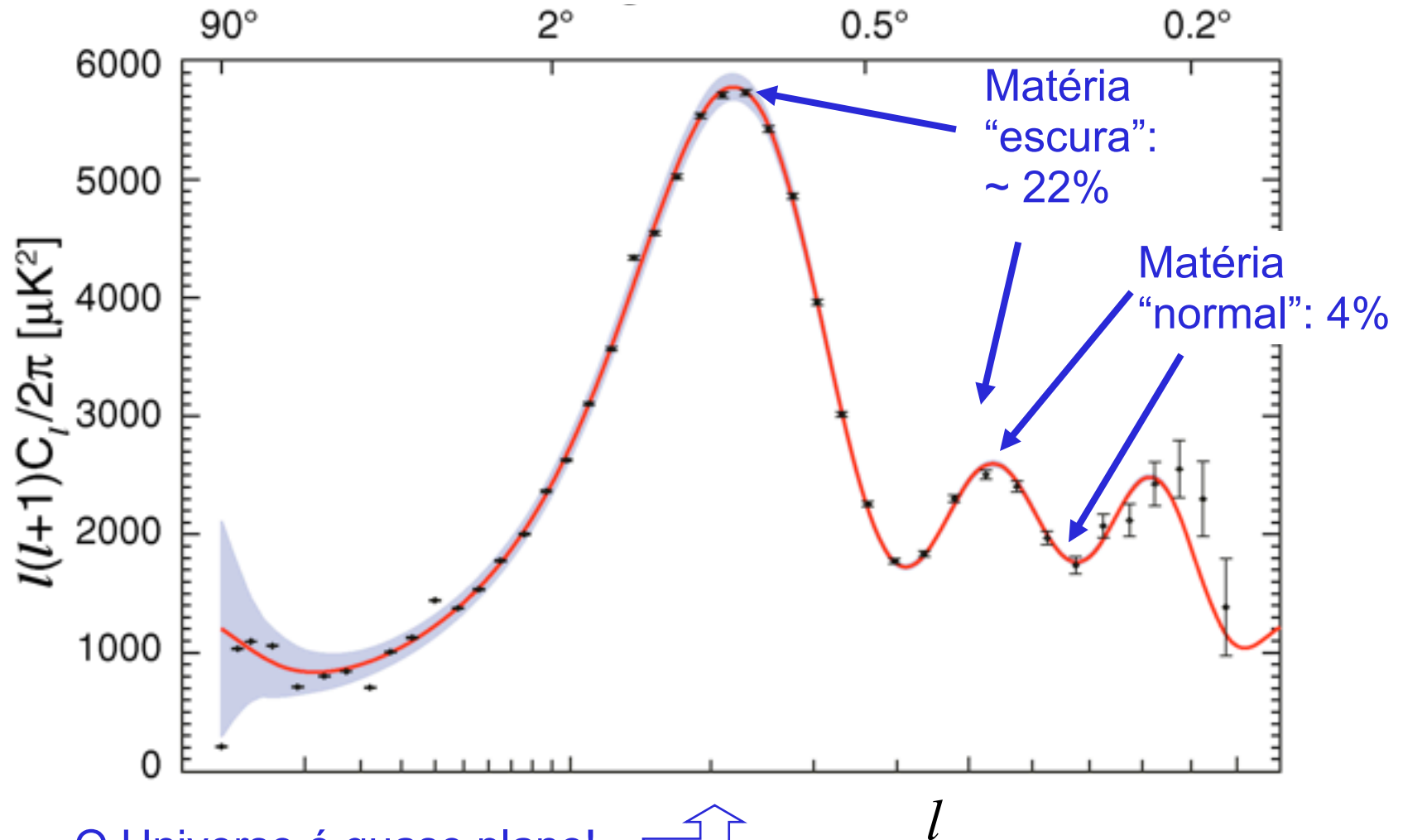
O Universo é quase plano!



$l$

# Informações preciosas sobre o Universo

## “O Graal da Cosmologia”

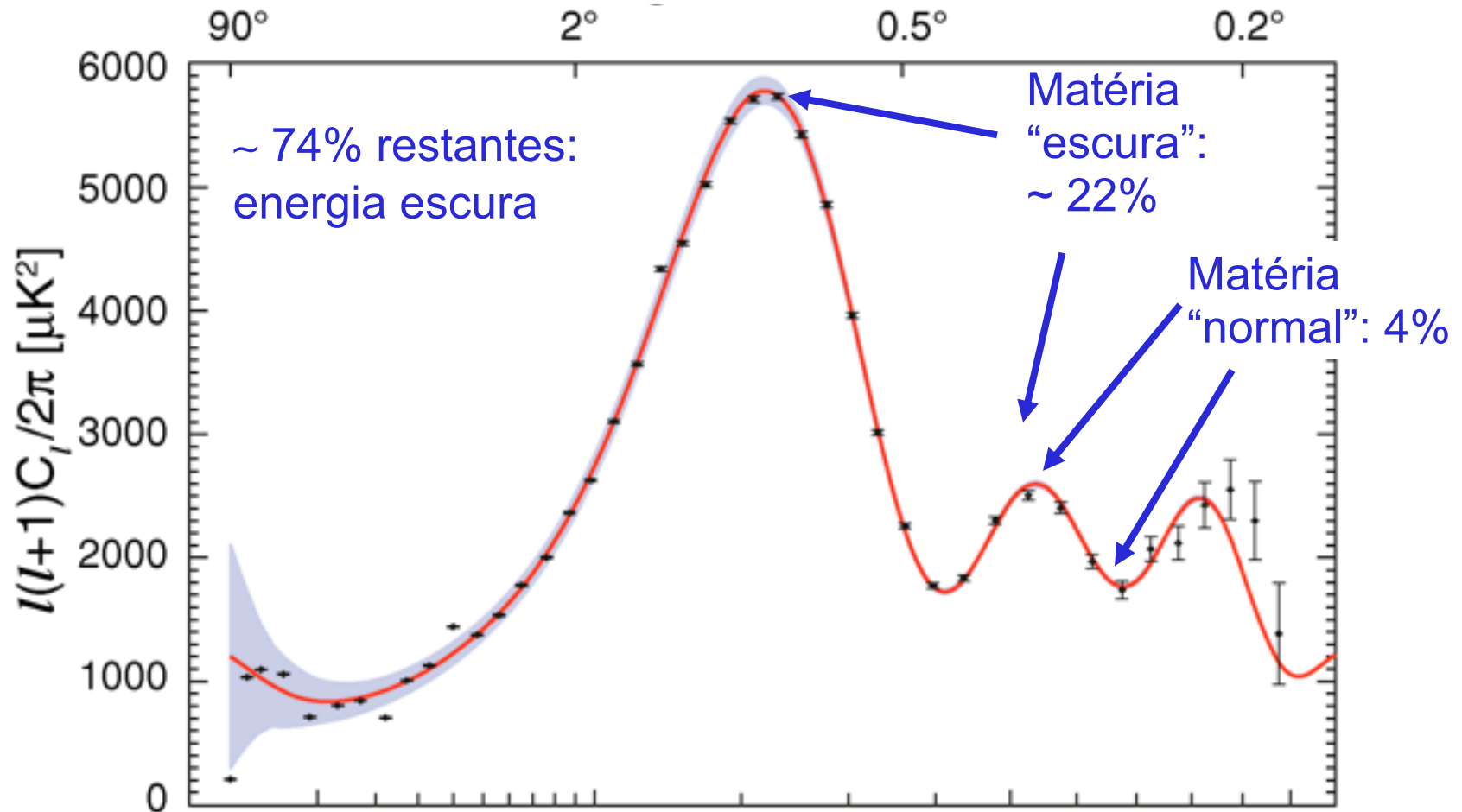


O Universo é quase plano!



# Informações preciosas sobre o Universo

## “O Graal da Cosmologia”



O Universo é quase plano!

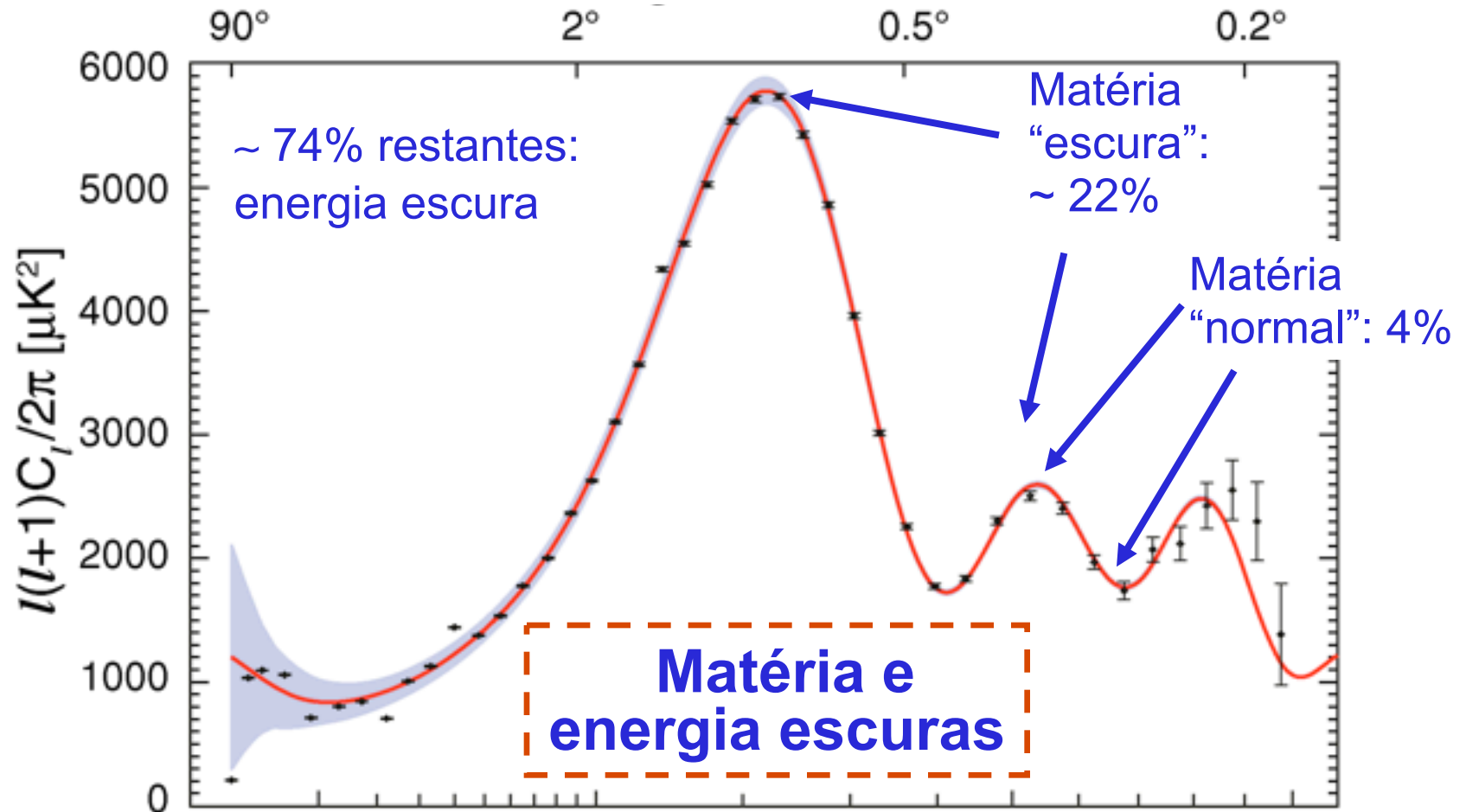


$l$



# Informações preciosas sobre o Universo

## “O Graal da Cosmologia”



O Universo é quase plano!

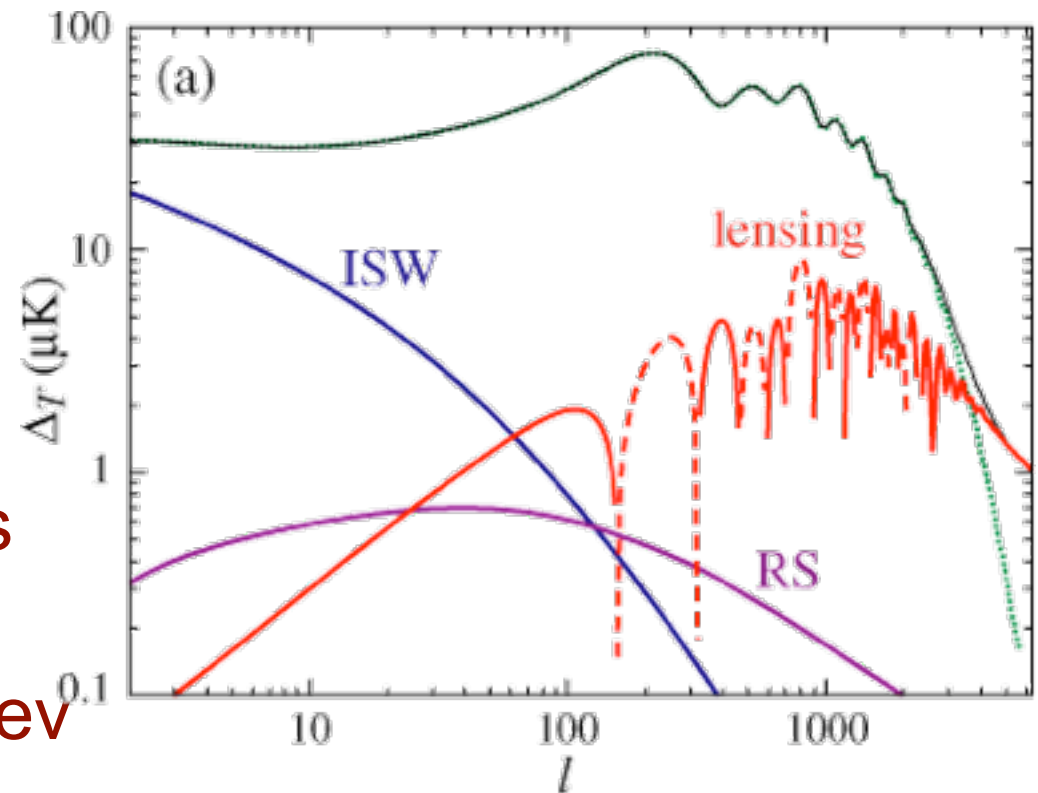


$l$

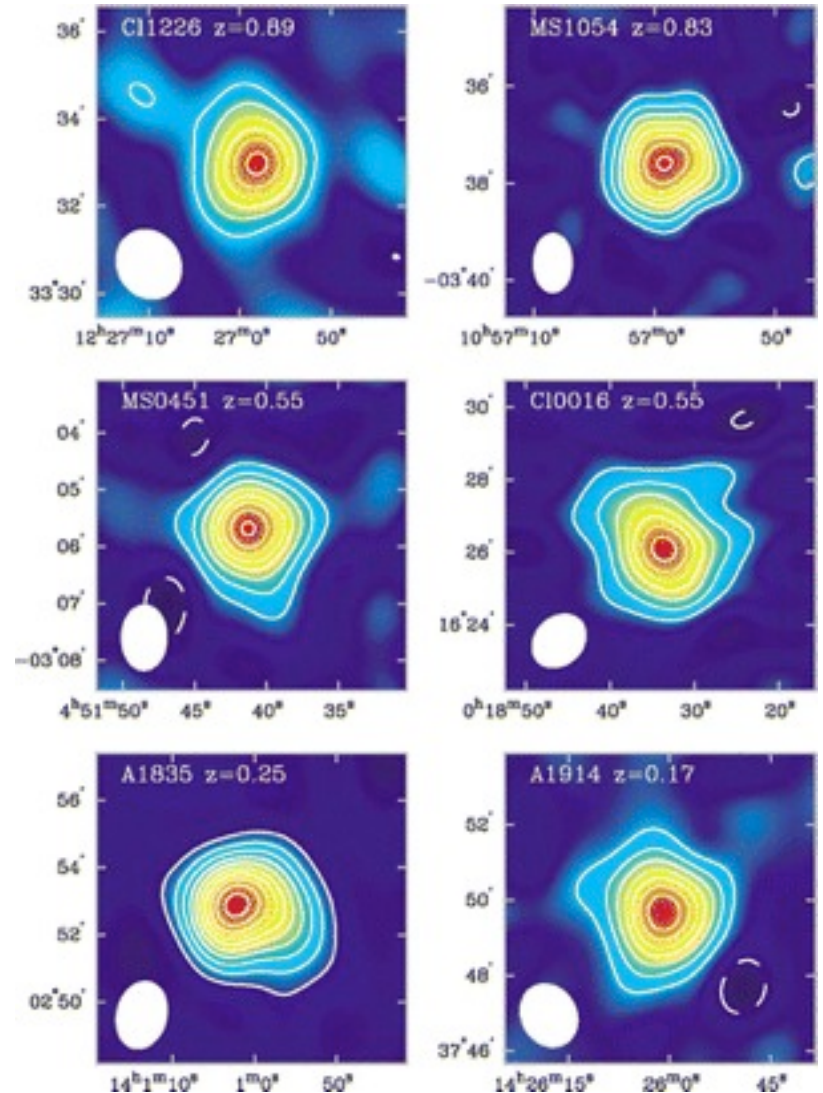
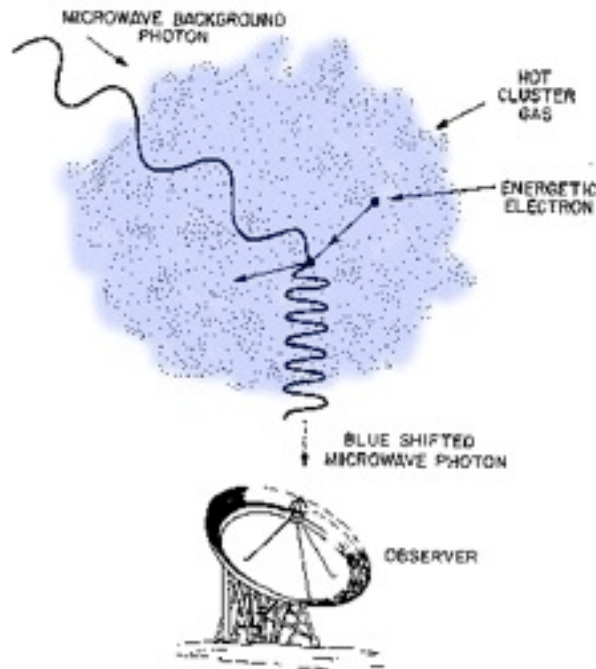
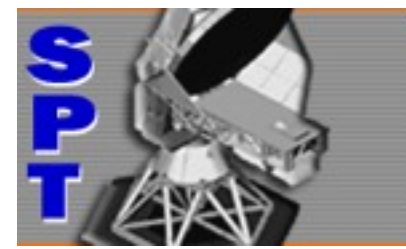


# Anisotropias secundárias

- Efeito Sachs-Wolfe integrado
- Lenteamento gravitacional
- Efeito Rees-Sciama
- Ondas gravitacionais
- Espalhamento: reionização e Sunyaev Zel'dovich

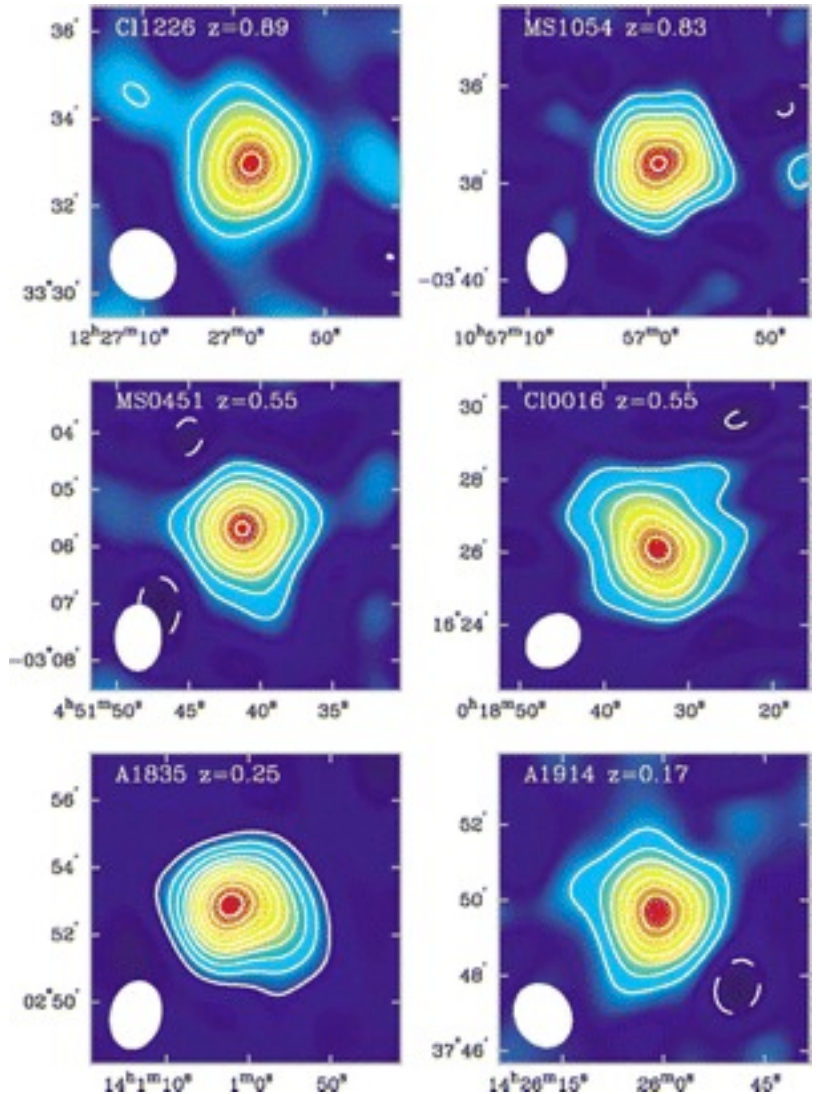
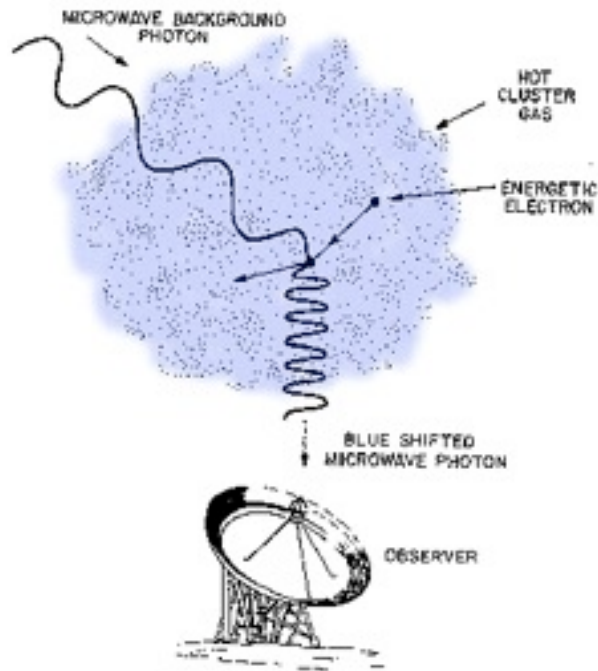
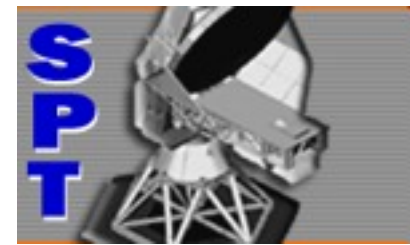


# Efeito Sunyaev Zel'dovich



- Efeito Compton inverso
- Distorção da RCF em escalas de arcmin
- Independente de  $z$

# Efeito Sunyaev Zel'dovich

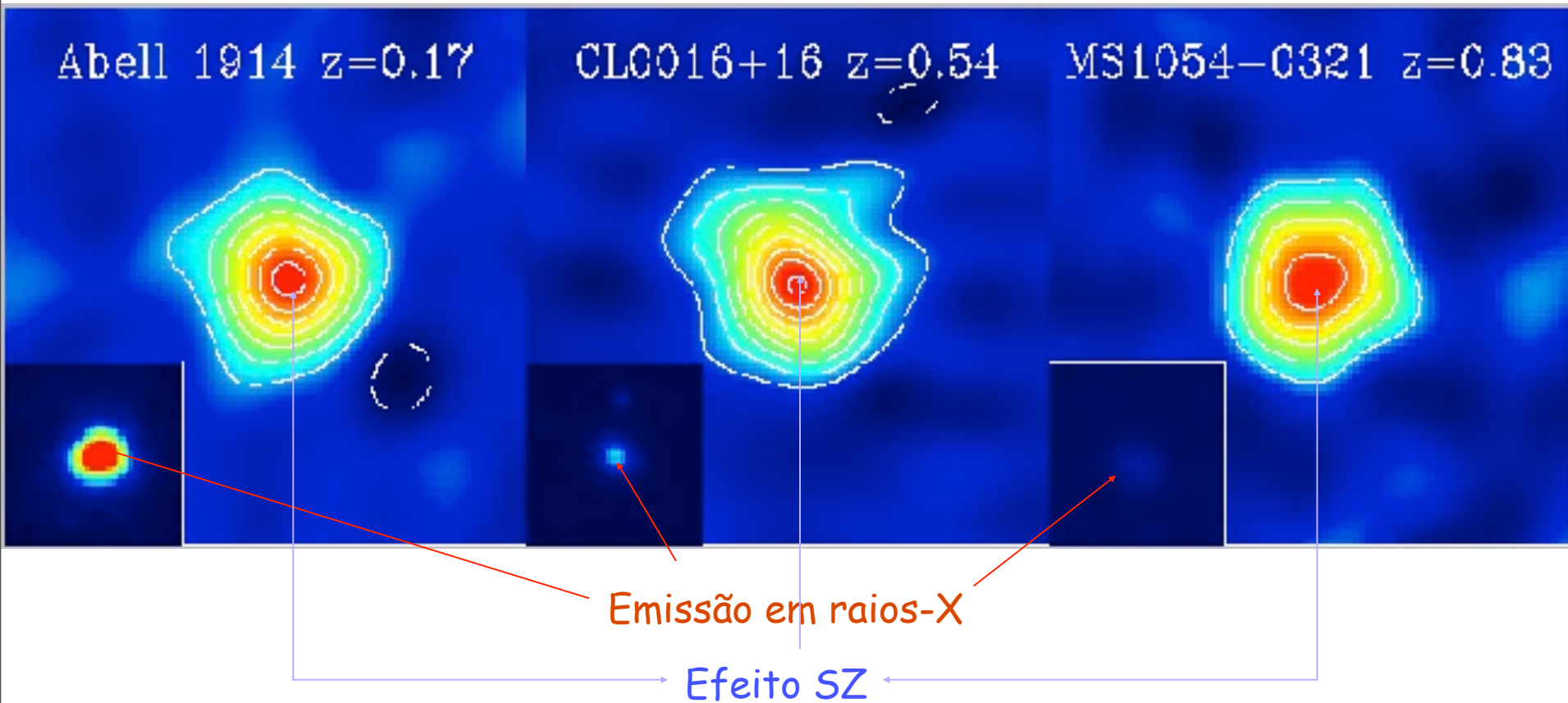






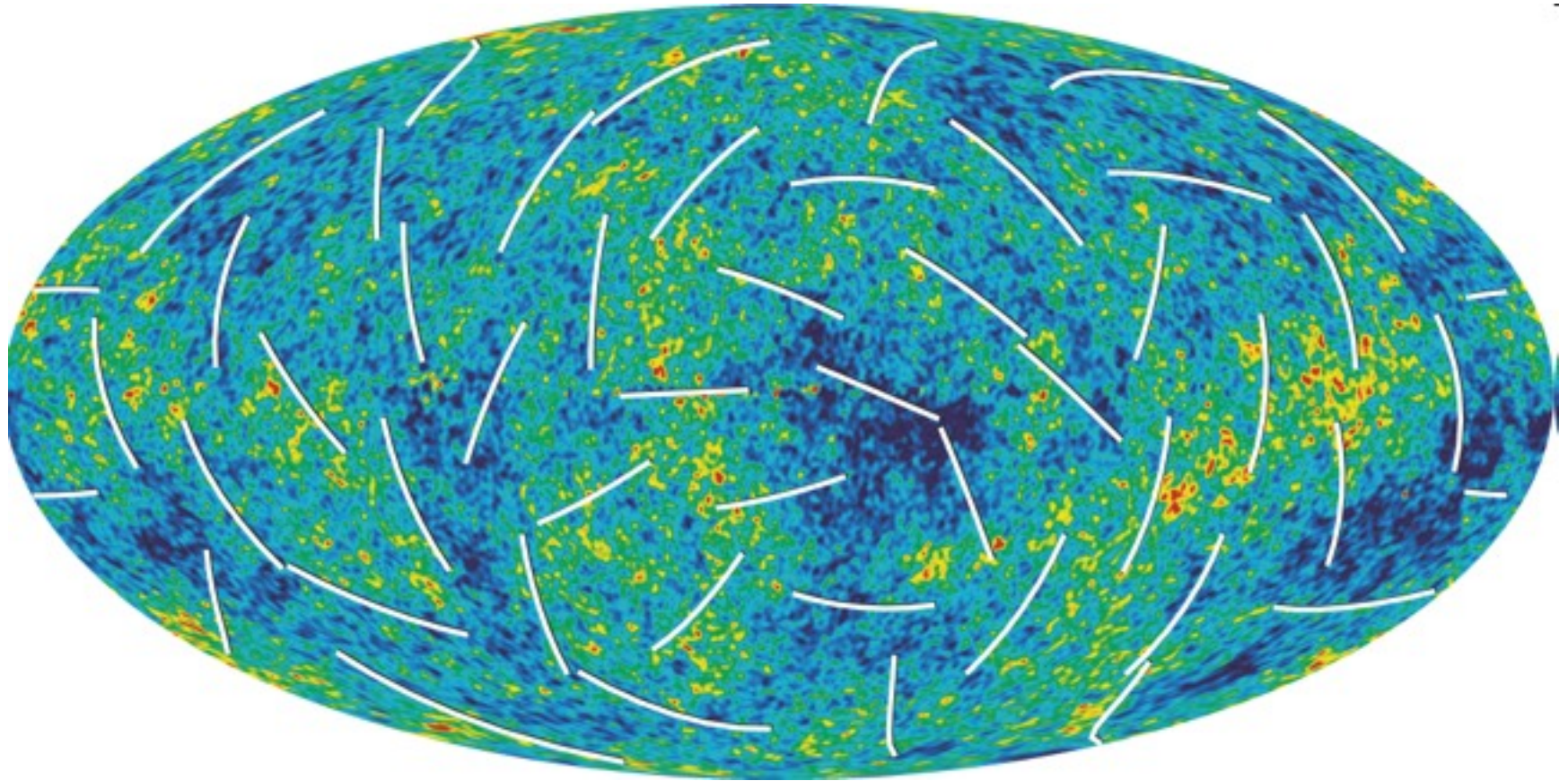
# Vantagem do efeito SZ

- Raios-x: fluxo cai com  $(1 + z)^{-4}$
- “Decremento” de SZ: independente de  $z$



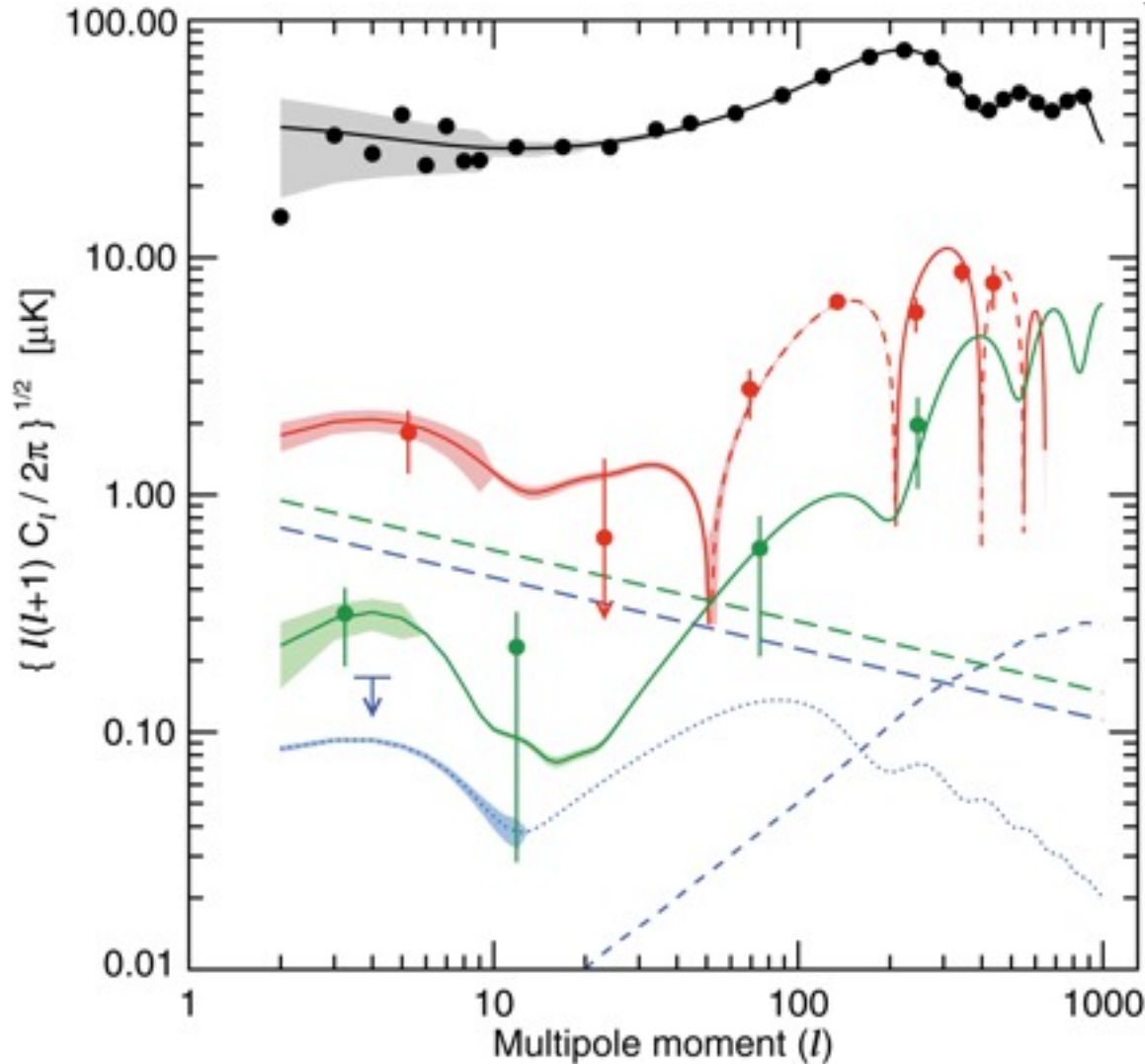


# Polarização da RCF





# Espectro da Polarização



- Componentes TE e EE
- Componente BB
- Ondas gravitacionais
- Sonda Planck
- Futuro?