



Universidade Federal do ABC

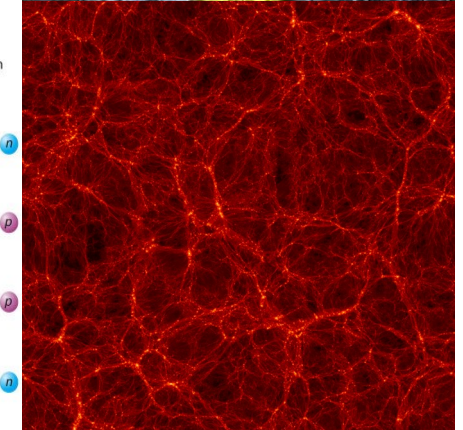
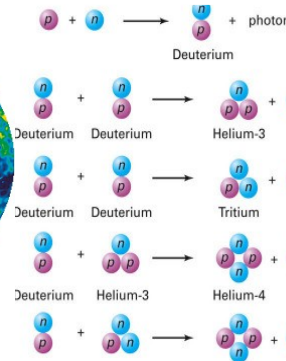
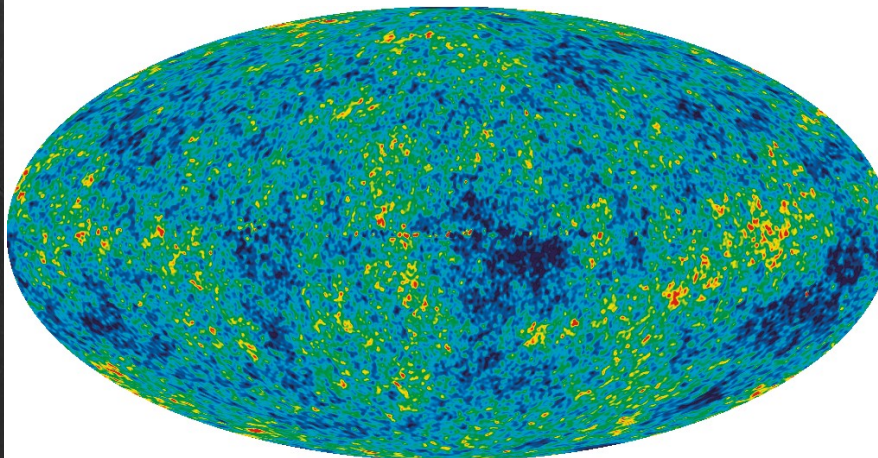
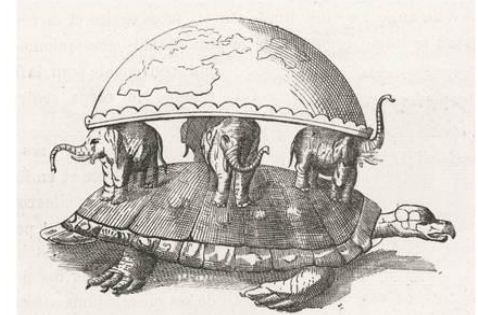
# Introdução à Cosmologia

## 13. Radiação Cósmica de Fundo II: Análise do Espectro Angular

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Cosmo.html>



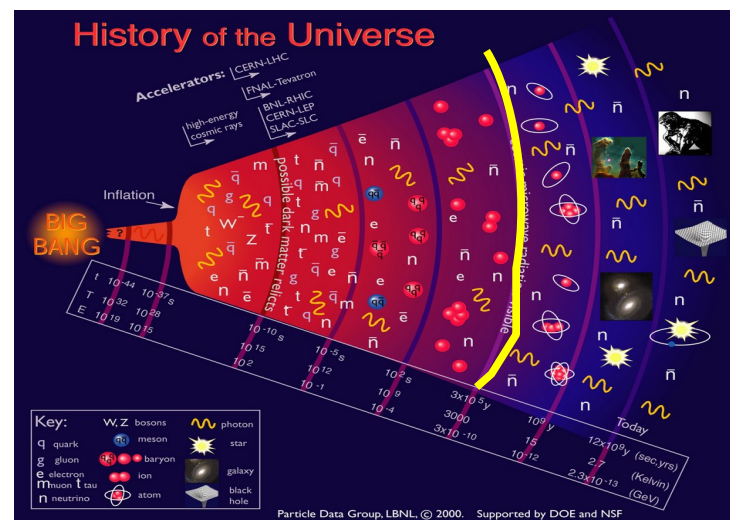
# Evidências

Uma das Evidências mais fortes para o Modelo  $\Lambda$ CDM é a

## Radiação Cós mica de Fundo

(RCF ou, frequentemente, CMB, do inglês *Cosmic Microwave Background*).

Lembrete: **Emitida** na época da "**re-combinação**" (formação de átomos a partir de núcleos e elétrons), quando o Universo tinha **~378 000 anos** de idade e **~3000 K** de temperatura



# Evidências

## Aula RCF I (1ª parte):

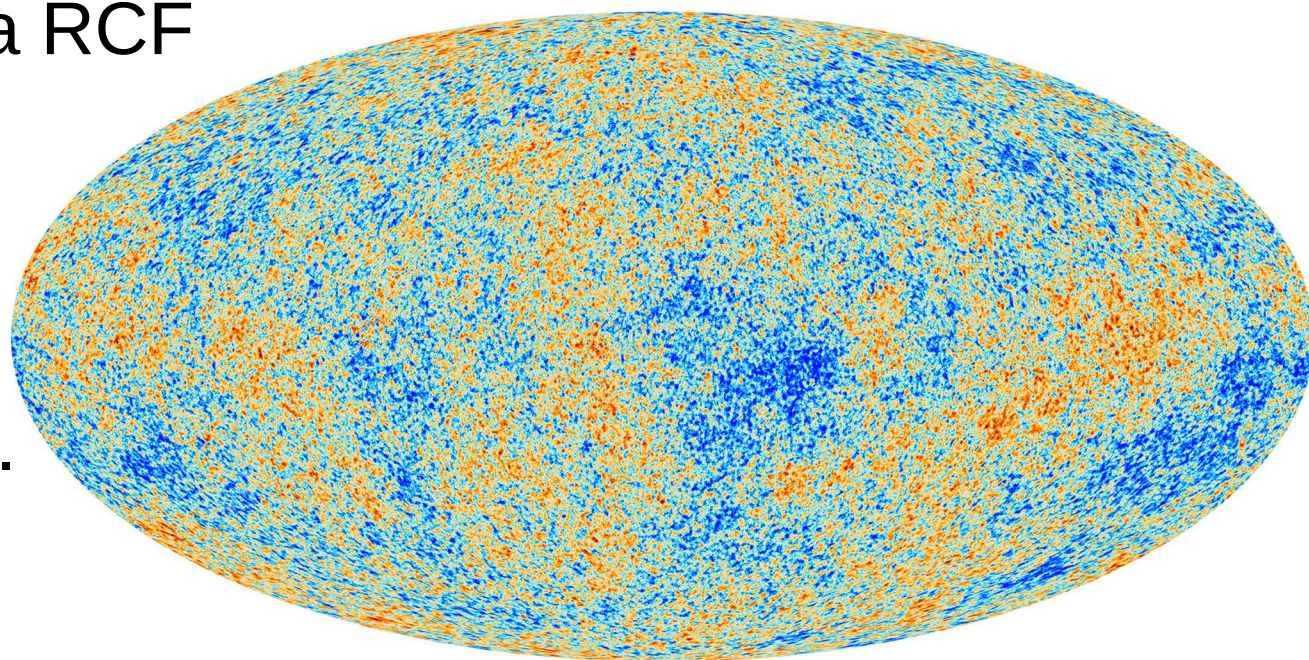
- **História:**
  - Previsão teórica: Gamov, Alpher e Hermann, 1948
  - Descoberta: Penzias e Wilson, 1964
  - Observada pelos satélites COBE, WMAP e Planck
- Espectro perfeito de **Corpo Negro** de 2.7 K
- **Momento dipolo** devido ao nosso **movimento peculiar** (relativo ao *Hubble Flow*)
- **Amplitude** das **flutuações** pequena demais (1:100 000) para explicar estruturas atuais  
=> Evidência para **Matéria Escura**  
(com sobredensidades maiores já na época da re-combinação)

# Radiação Cósmica de Fundo

Mas dá para tirar muito **mais informação** da Radiação Cósmica de Fundo.

Além do espectro podemos analisar a **distribuição** no **céu**, i.e. fazer um "mapa" da CRF no céu.

O melhor mapa da RCF disponível foi observado pelo satélite Planck (*Planck collaboration VI, 2020*).



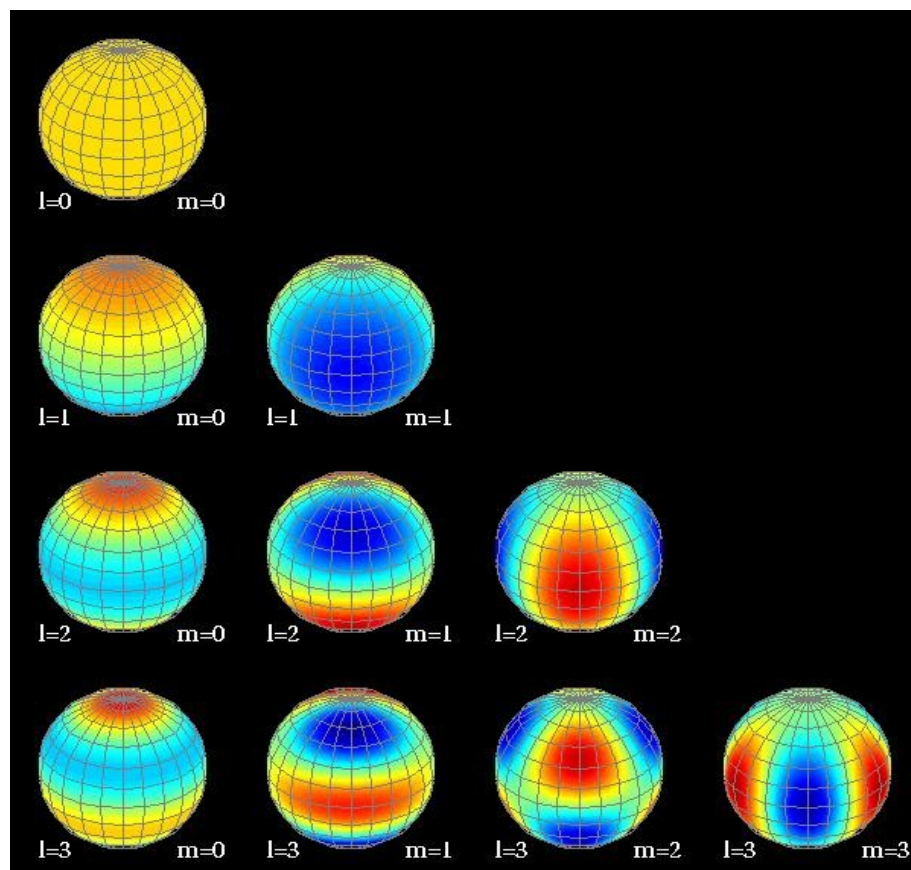
# Radiação C3smica de Fundo

## Espectro Angular

Al3m das **amplitudes** podemos tamb3m analisar os **tamanhos angulares** (no c3eu) destas estruturas no mapa da RCF.

Podemos fazer uma **expans3o multipolo**, **decompor** o mapa em fun33es **esf3ricas harm3nicas** (as mesmas que na fun33o de onda do 3tomo de H):

$$\frac{\delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell,m} Y_m^{\ell}(\theta, \phi)$$



# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

Para eliminar o efeito da escolha arbitrária da direção  $\varphi = 0$ , e juntar todas as contribuições devidas a estruturas do **mesmo tamanho** (do **mesmo valor de  $l$** ) podemos tomar uma média sobre todos os  $2l + 1$  valores de  $m$  ( $a_{l,m}^*$  é o complexo conjugado de  $a_{l,m}$ ):

$$C_l = \frac{1}{2l + 1} \sum_{-l}^l |a_{l,m}|^2 = \frac{1}{2l + 1} \sum_{-l}^l a_{l,m} a_{l,m}^*$$

O **espectro de potência angular** é definido como  $l(l+1)C_l/2\pi \geq 0$  e quantifica o **número de estruturas** com um certo **tamanho**, que depende de (diminui com)  $l$ .

# Radiação Cósmica de Fundo

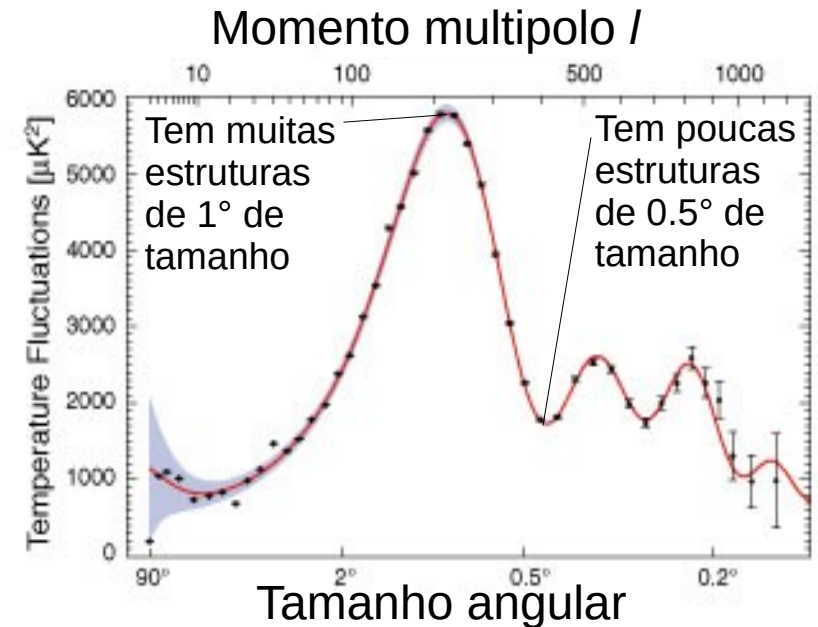
## Espectro Angular

- O **momento monopolo** ( $l = 0$ ) é **zero** por definição, já que  $a_{0,0}$  mede a soma de todas as flutuações em **relação à temperatura média**.
- O **momento dipolo** ( $l = 1$ ) também é **zero**, por que o momento dipolo que tinha (devido ao movimento peculiar do Sol) já foi subtraído.

# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

O **espectro** a partir de  $l = 2$  é, então, a distribuição dos **tamanhos angulares** das **estruturas** na Radiação de Fundo, ou seja, das **estruturas** ~**378 000 anos** depois do *Big Bang*.



# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

Será que dá para entender pelo menos o **primeiro** e mais alto **pico** deste espectro?

Para isto temos que nos dar conta, de que este mapa é uma **seção transversal** das **ondas sonoras** propagando-se pelo **plasma** de núcleos, elétrons e fótons na época da **re-combinação**, onde elas fizeram interseção com a superfície do último espalhamento.

As **maiores estruturas** correspondem às maiores estruturas que podem ter **respondido** como **um todo** a uma **onda** de **som**.

# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

Para isto, uma onda deve ter tido **tempo** para **atravessar** a **região** até o tempo do desacoplamento  $t_{\text{desac}} = 378\,000$  anos, distância chamada **horizonte sonoro**  $d_s$ .

A **velocidade** do **som** no **Universo jovem**, naquele os **fótons** fornecem a maior contribuição à **pressão**, é

$$v_s = \sqrt{\partial P / \partial \rho} = \sqrt{\partial (u_{\text{rel}}/3) / \partial \rho} = \sqrt{\partial (\rho_{\text{rel}} c^2 / 3) / \partial \rho} = c / \sqrt{3}$$

e o **horizonte sonoro**,

$$d_s(t) = ct\sqrt{3} = d_h(t)/\sqrt{3}$$

Para o **tempo** do **desacoplamento**:  $d_s(t_{\text{desac}}) = 201$  kpc

# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

Assim, o tamanho dos maiores estruturas na RCF é uma régua padrão, de  $D = 201$  kpc, e pode ser usado para determinar a curvatura  $k$  do Universo, e o parâmetro de densidade total

$$\Omega_0 = 1 + kc^2/H_0^2 = \Omega_{m,0} + \Omega_{rel,0} + \Omega_{\Lambda,0}$$

Usando das aulas sobre Cosmologia Relativística a distância própria até a RCF:

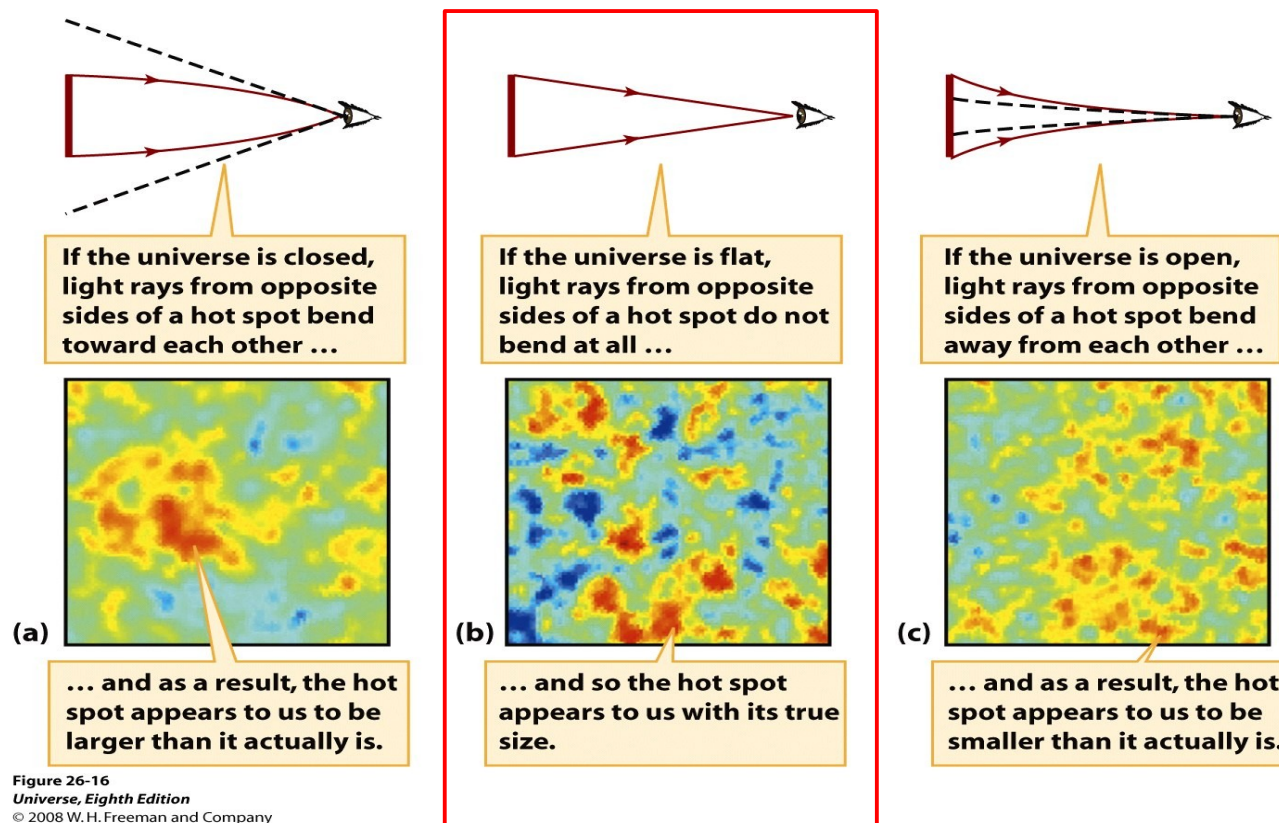
$$d_p(t_{desac}) = 3ct_0((t_{desac}/t_0)^{2/3} - (t_{desac}/t_0))$$

e que  $\theta = D/d_A = D/d_p$  (Universo plano,  $\Omega_0 = 1$ )  
 $> D/d_p$  (Universo fechado,  $\Omega_0 > 1$ )  
 $< D/d_p$  (Universo aberto,  $\Omega_0 < 1$ ),

onde  $d_A$  é a distância de diâmetro angular

# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular



e que  $\theta = D/d_A = D/d_p$   
 $> D/d_p$   
 $< D/d_p$

(Universo plano,  $\Omega_0 = 1$ )  
(Universo fechado,  $\Omega_0 > 1$ )  
(Universo aberto,  $\Omega_0 < 1$ )

# Radiação Cósmica de Fundo

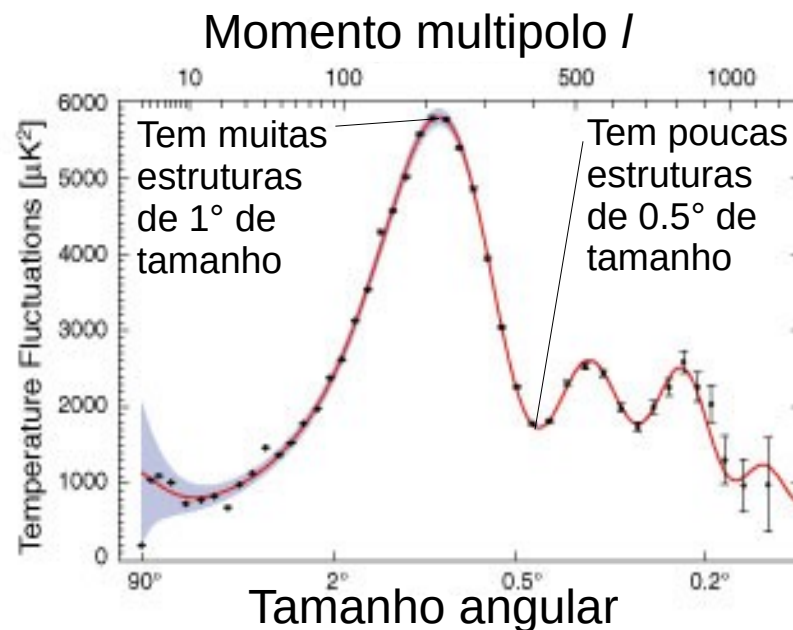
## Espectro Angular

O valor calculado para um **Universo plano**,  $\theta = 1^\circ$ , bate bem com a posição do **primeiro pico** do espectro angular.

=> **A densidade total é igual à densidade crítica.**

Como a densidade da matéria (visível + Escura) já foi determinada por outros meios, ~31% da densidade crítica, podemos dizer que a **densidade da Energia Escura** é ~69% de  $\rho_{\text{crit},0}$ .

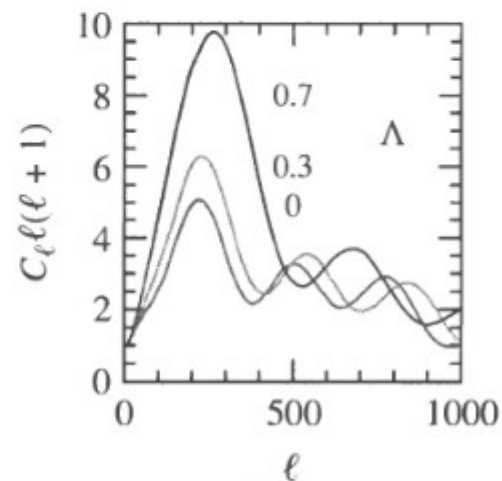
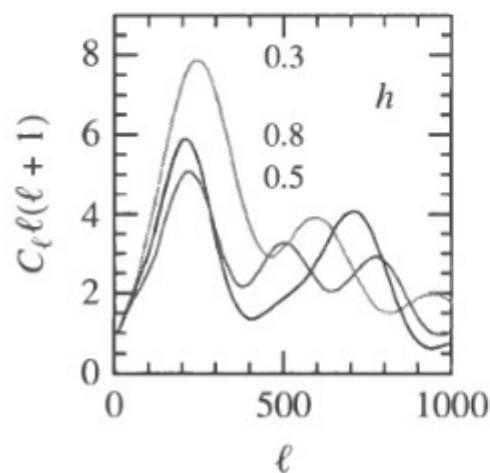
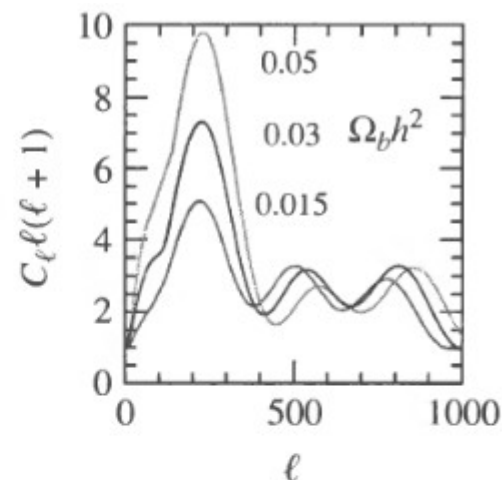
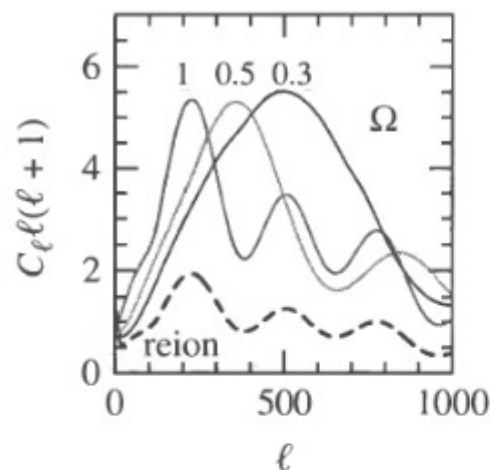
=> **Evidência (indireta) para a Energia Escura.**



# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

Cálculos mais sofisticados das **propriedades das ondas sonoras** em função dos **parâmetros cosmológicos** ( $H_0$ ,  $\Omega_{\text{tot}/m/b/\Lambda}$ ) conseguem prever a **forma exata** (posições e alturas dos demais picos) do **espectro angular** para diferentes **modelos cosmológicos**.



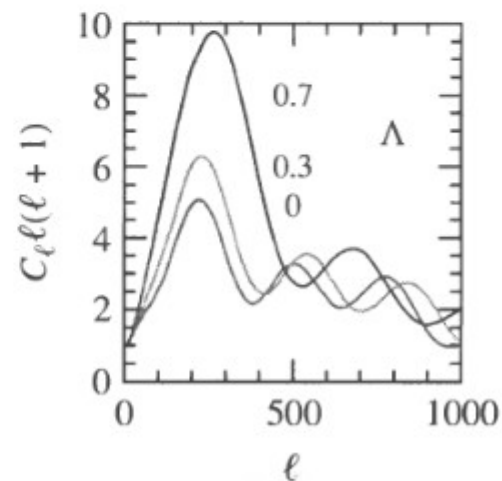
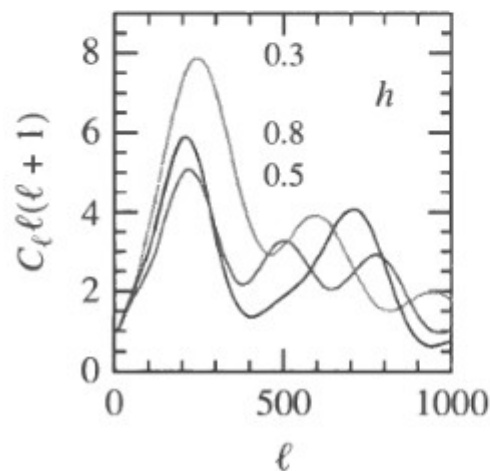
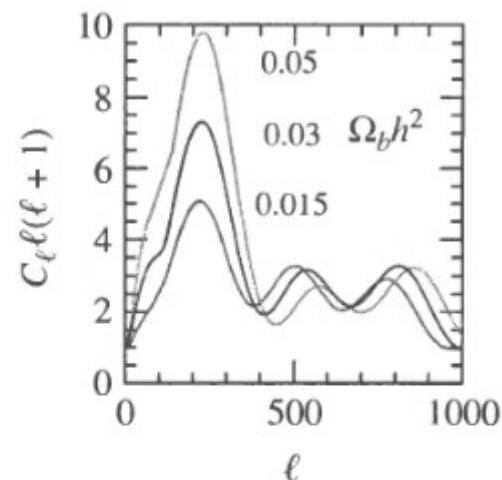
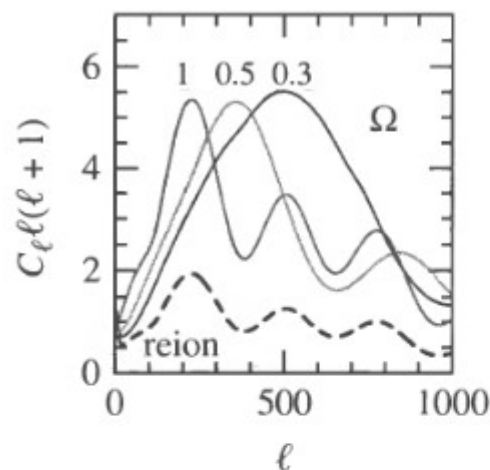
Variando vários parâmetros do modelo

# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

A razão entre as alturas do primeiro e segundo pico nos diz quanto da matéria é **bariônica**.

Altura do terceiro pico: sensível à densidade de **Matéria Escura**.



Variando vários parâmetros do modelo

# Radiação Cósmica de Fundo

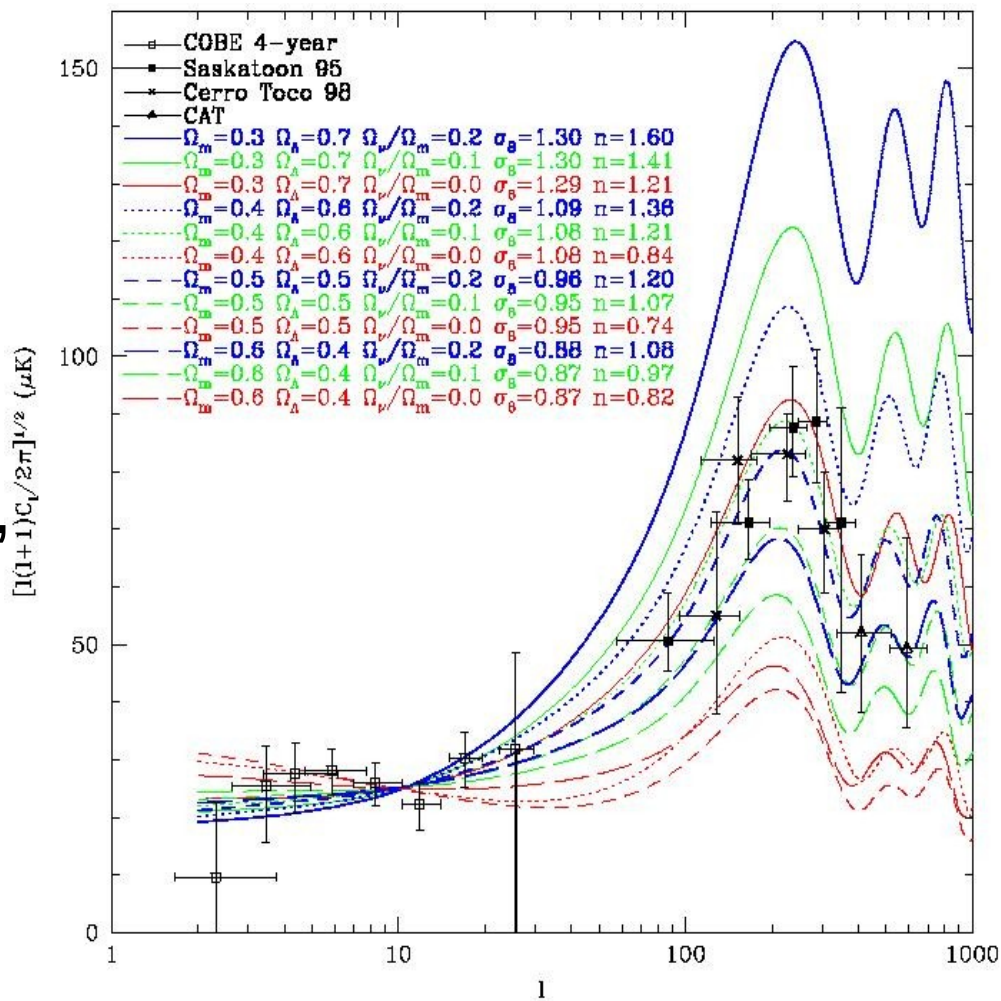
## Espectro Angular

O espectro angular da radiação cósmica de fundo

**bate exatamente** com o espectro previsto para o **modelo  $\Lambda$ CDM**:

Matéria visível compõe 5%,  
Matéria Escura, 26%  
e Energia Escura, 69%  
da densidade crítica.

=> **Evidência para todo o modelo  $\Lambda$ CDM.**



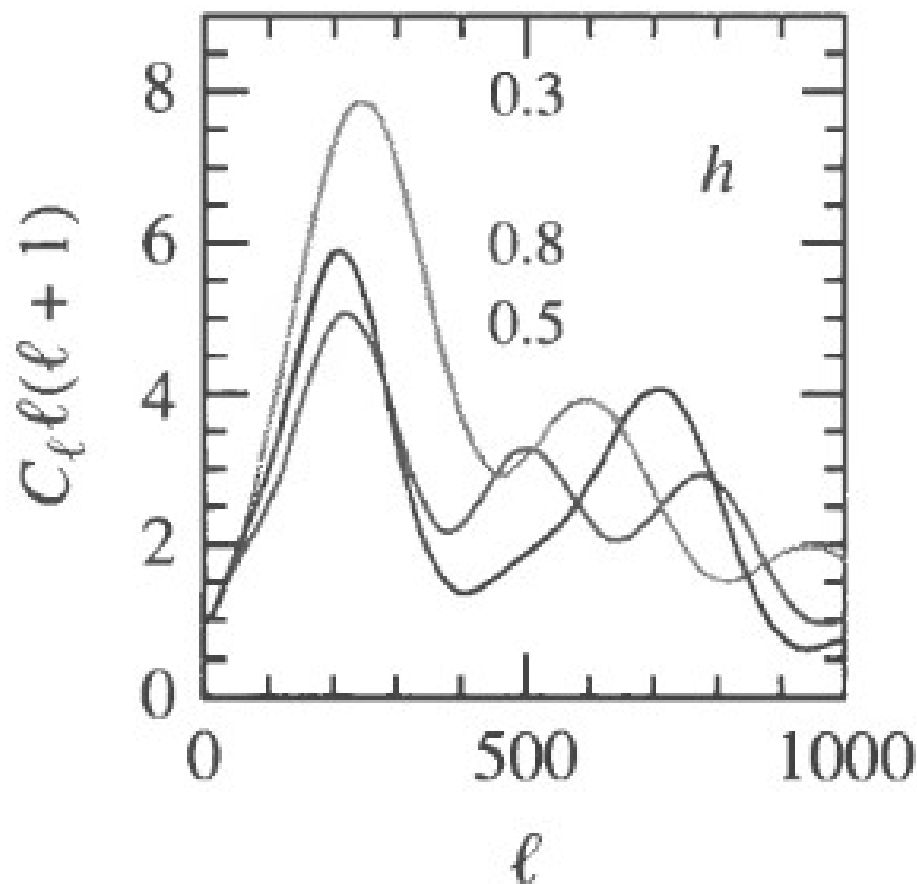
# Radiação Cósmica de Fundo

## A Tensão de Hubble

Como dito, um dos parâmetros que dá para achar pelo **ajuste** do **espectro de potência angular** da RCF é a "**constante**" de Hubble.

A colaboração Planck achou

$$H_0 = 67.7 \text{ km/sMpc}$$



Varição do espectro de potência angular da RCF com a constante de Hubble ( $h = H_0$  em unidades de 100 km/sMpc)

# Radiação Cósmica de Fundo

## A Tensão de Hubble

Porém, **medidas recentes** de maneira "tradicional", i.e., medindo **magnitudes aparentes** e **redshifts** de **velas padrão** e usando a definição da constante de Hubble,  $H_0 = v/d = zc/d$ , resultam em valores da ordem de 74 km/sMpc, uns 10% mais altos

=> **Tensão de Hubble**

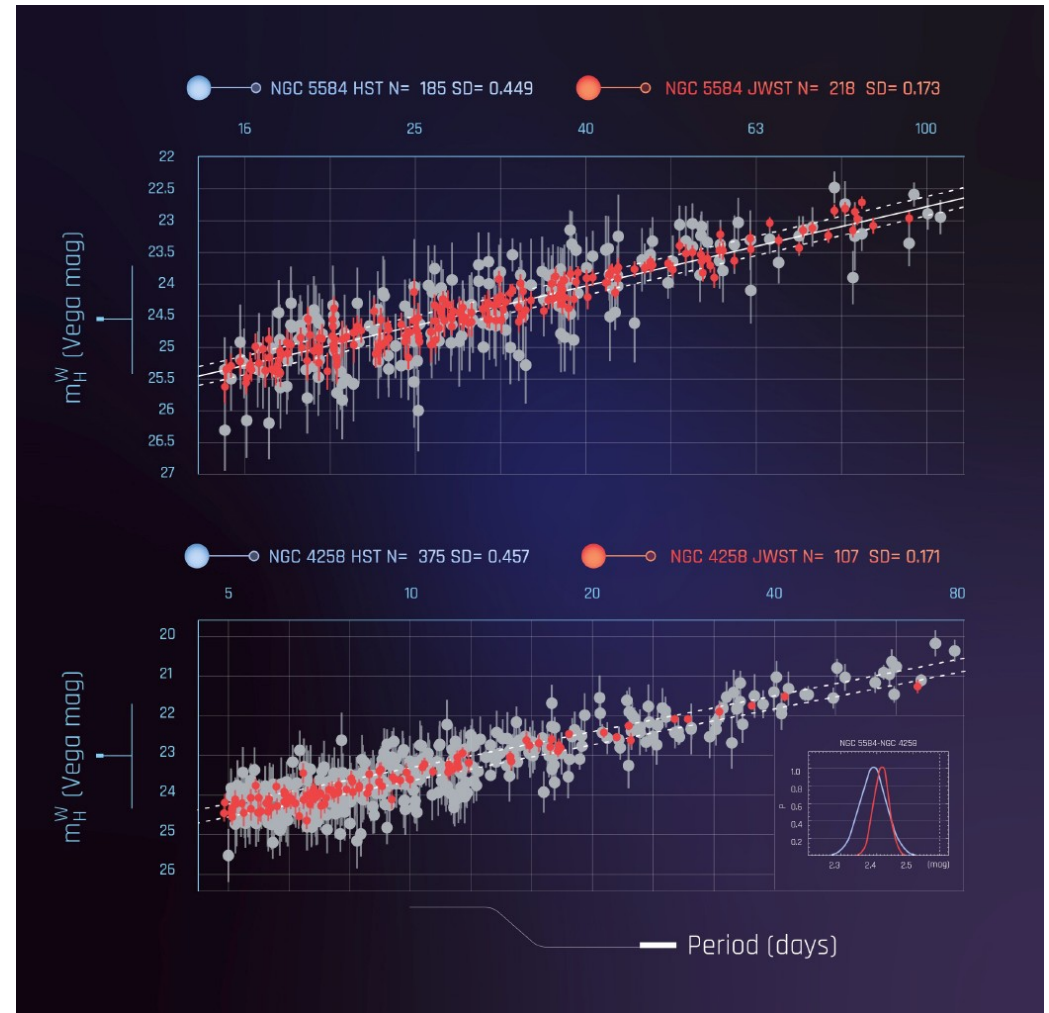
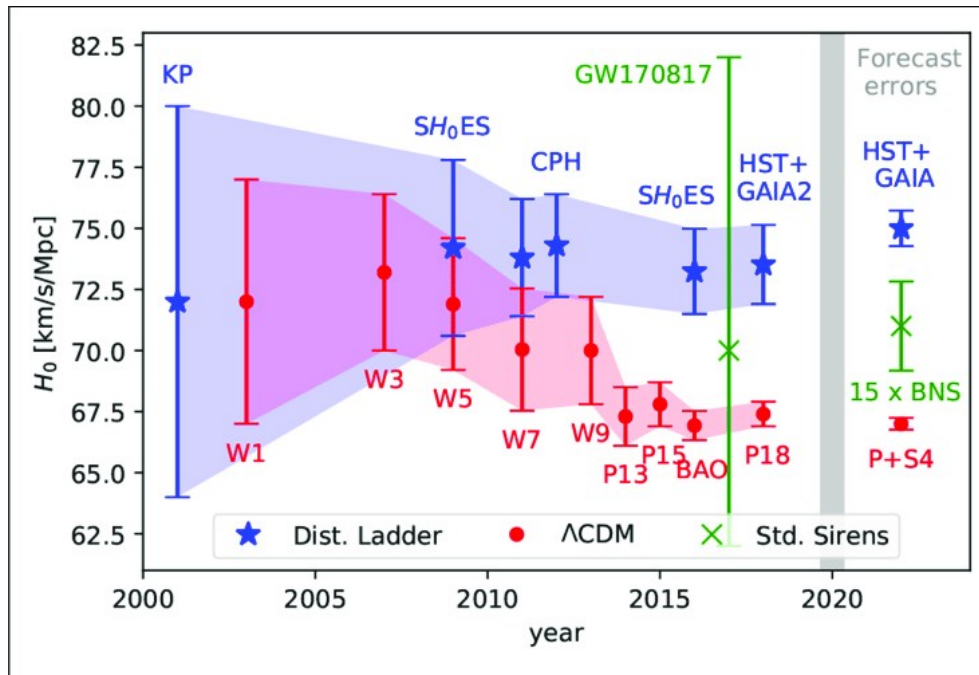
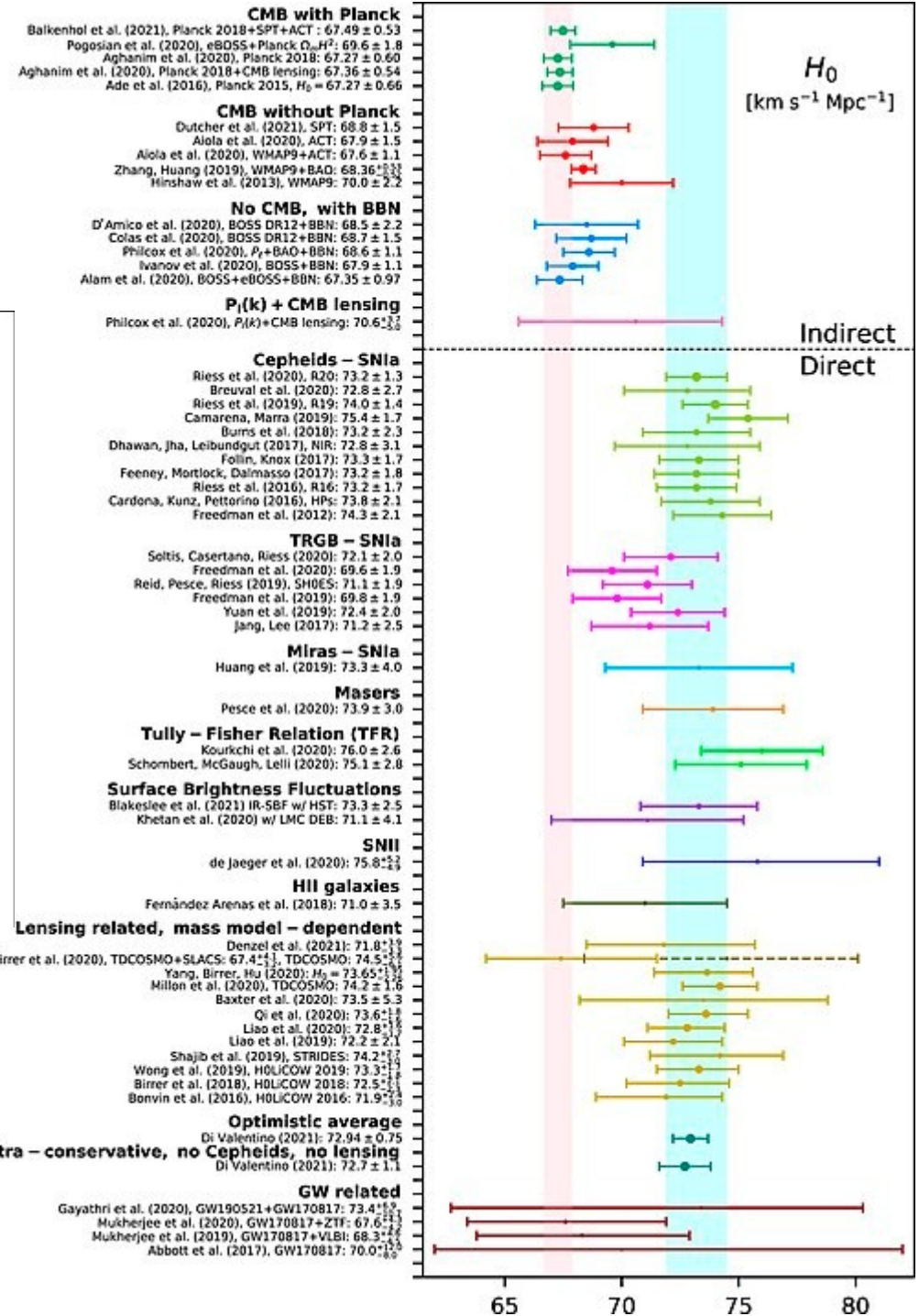


Diagrama de Hubble usando dados de Cefeidas de HST e JWST

# Radiação Cósmica de A Tensão de Hubble



Vários trabalhos acham a mesma coisa...



# Radiação Cósmica de Fundo

## A Tensão de Hubble

Possíveis explicações:

- **Erro sistemático** em um dos métodos?  
Requereria **múltiplos efeitos não-relacionados**.
- **Princípio comológico inválido**  
Deveríamos estar num **void enorme** até  $z \sim 0.5$ ?
- **Nova física**, i. e. além de  $\Lambda$ CDM?
  - teoria modificada da gravitação (MOND)
  - Energia Escura com equação de estado variável
  - Matéria Escura decaindo em "radiação escura"Cada hipótese cria **outros problemas**  
(=> aula Modelos Alternativos)

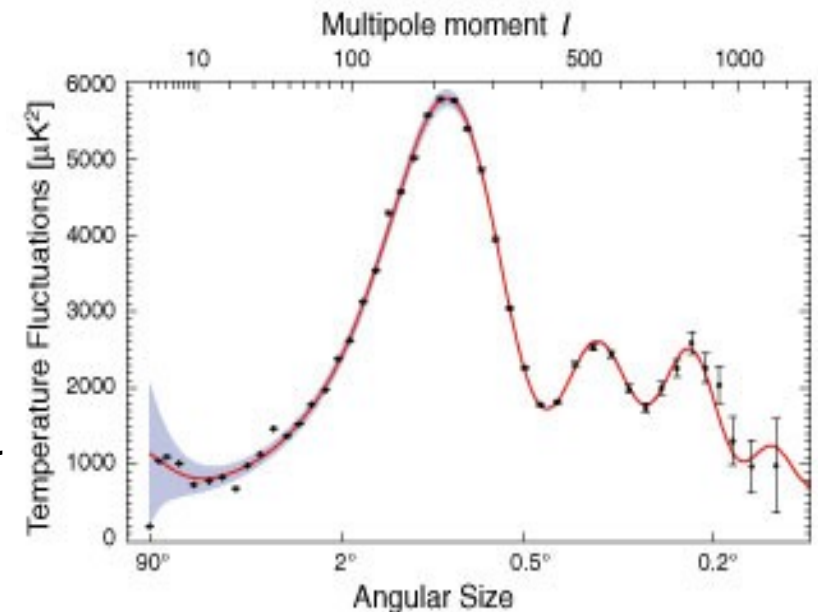
# Pico das Oscilações Acústicas Bariônicas

## O Pico das Oscilações Acústicas Bariônicas (BAO)

Voltando para os **tamanhos** das **estruturas** na Radiação Cósmica de Fundo:

Se houve muitas **estruturas** com um **certo tamanho** ( $1^\circ$  no céu) na **época da re-combinação**, estas estruturas devem ter **evoluído** para **tamanhos típicos** hoje.

Pelo **modelo  $\Lambda$ CDM** estruturas de  $1^\circ$  na **radiação cósmica de fundo**, 201 kpc na época, deveriam ter tamanhos de  **$\sim 140$  Mpc hoje**.



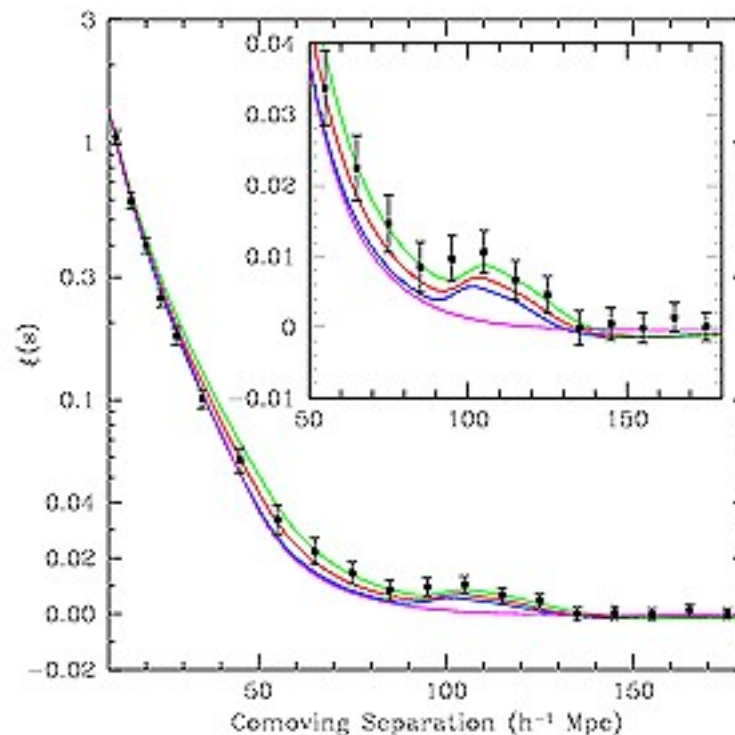
Espectro de tamanhos na radiação cósmica de fundo

# Pico das Oscilações Acústicas Bariônicas

## O Pico das Oscilações Acústicas Bariônicas

Numa amostra de 46 748 galáxias do *Sloan Digital Sky Survey*, **esta distância** ocorre com **mais frequência entre galáxias**, do que esperado para uma distribuição aleatória de galáxias.

=> **Evidência** para a **evolução** de **estruturas primordiais** até as **estruturas em grande escala** hoje, de maneira predita pelo **modelo  $\Lambda$ CDM**.



Função de correlação de distâncias intergalácticas



Universidade Federal do ABC

# Introdução à Cosmologia

## FIM PRA HOJE

