

Radiação Cós mica de Fundo

António Vale, CENTRA/ IST

6^a Escola de Astronomia e Gravitação, IST, Setembro 2012

Radiação Cósmica de Fundo (CMB)

O que é?

- Radiação relíquia, emitida após recombinação (~380000 anos após o Big Bang)
- Parte fundamental da cosmologia moderna

O que se observa

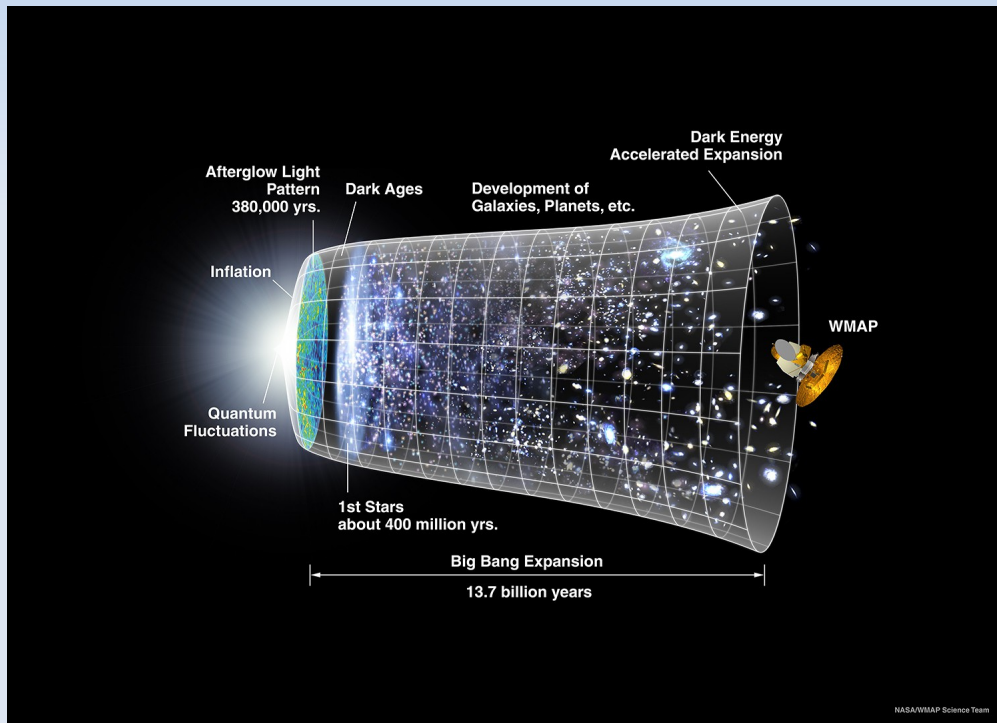
- Radiação de corpo negro, na gama das micro-ondas – pico a 160 GHz
- Radiação de fundo, altamente isotrópica
- Inomogeneidades da ordem de 10^{-5}

A importância do CMB

- 1) Perturbações lineares, física acessível e possível usar aproximações válidas
- 2) Medição de condições iniciais para modelos cosmológicos
- 3) Medição do movimento peculiar do sistema solar em relação ao referencial da expansão de fundo
- 4) Melhor prova de isotropia do universo
- 5) Parâmetros cosmológicos
- 6) Pilar necessário do modelo do Big Bang

Previsão teórica do CMB em 1948

(Gamow, Alpher, Herman)



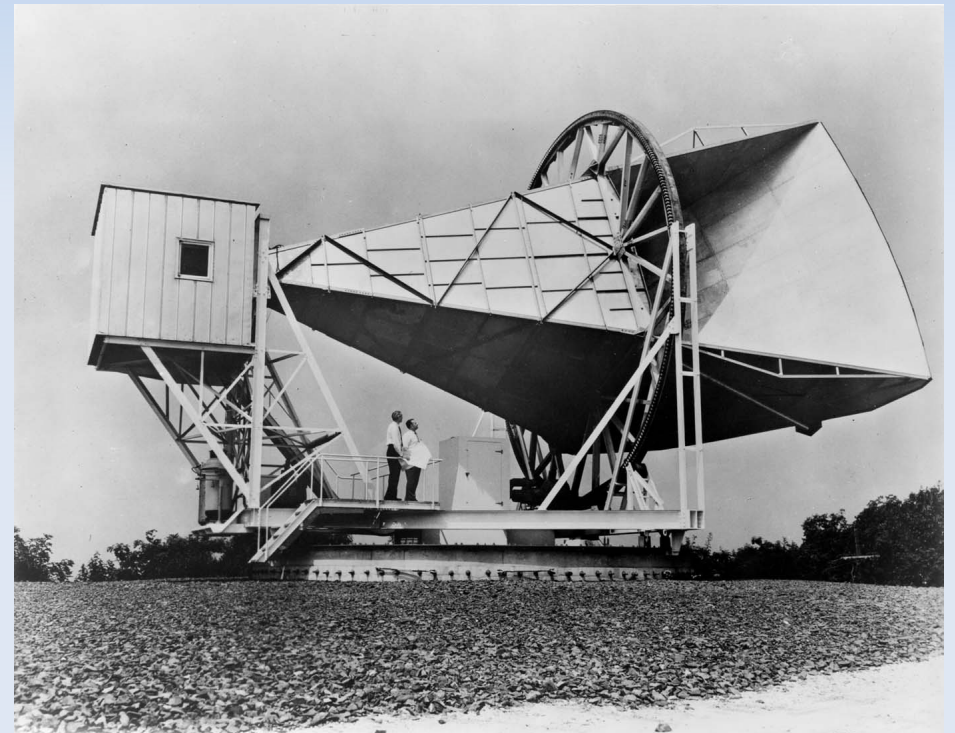
- Plasma inicial arrefece com expansão
- Fótons perdem energia e deixam de ionizar hidrogénio - recombinação
- Fótons propagam-se livremente

Recombinação

- Plasma inicialmente em equilíbrio térmico com fótons
- Grau de ionização depende de T – quando baixa, hidrogénio torna-se neutro e deixa de interagir com fótons
- Elevado número de fótons em relação a electrões leva a que T seja mais baixo do que seria previsível pela energia de ionização
- Estimativa inicial $T_0 \sim 4\text{K}$, baseada na formação de deutério primordial
- Ocorre quando $T \sim 3000\text{K}$, a $z \sim 1000$

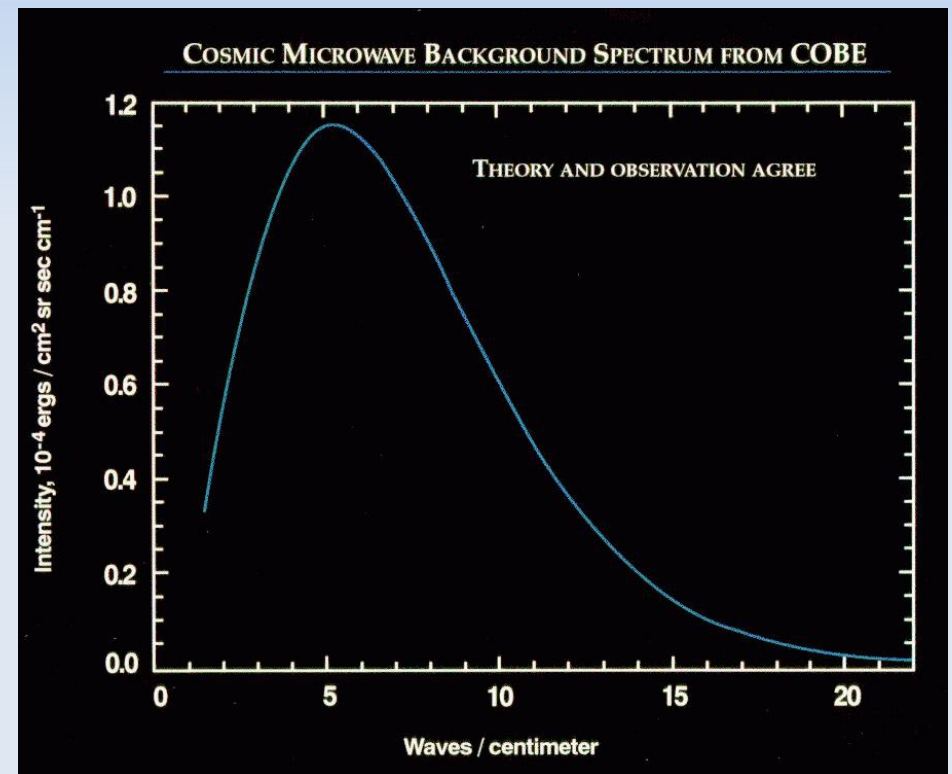
Descoberta Observacional

- Penzias & Wilson, 1965
- Testes de antena para radioastronomia
- Ruído de Fundo correspondente a $T=3K$
- Prémio Nobel 1978



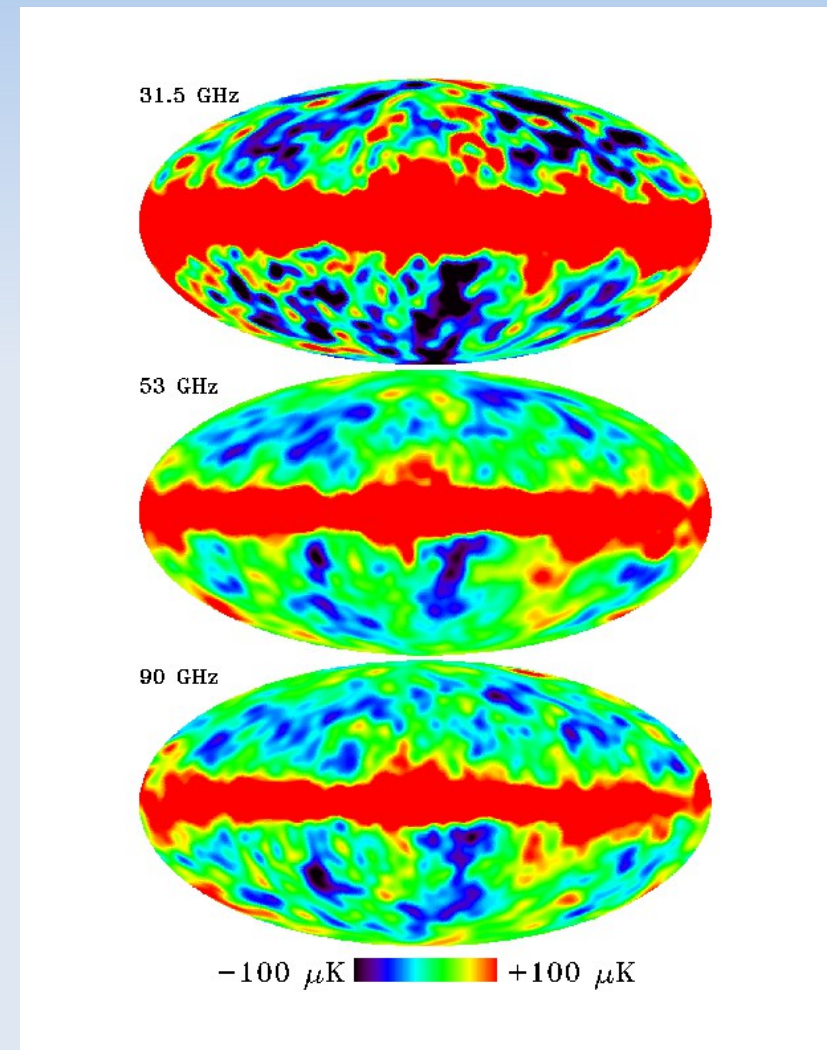
COBE

- Medição CMB por satélite, 1992
- Confirmação do espectro de Planck, $T=2.725\pm 0.001\text{K}$
- Primeira observação de anisotropias
- Prémio Nobel 2006



Anisotropias

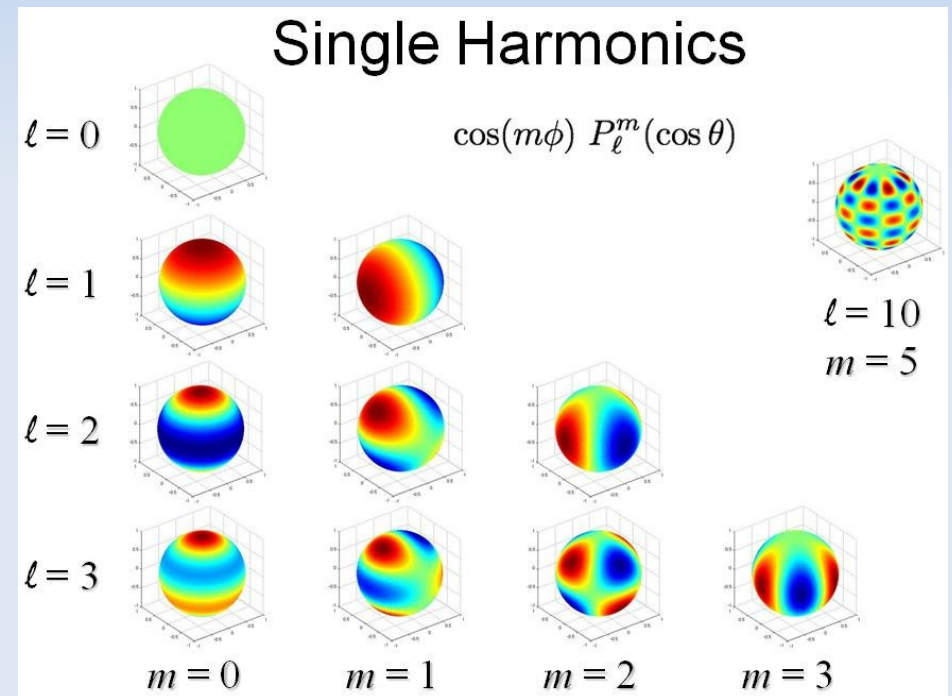
- COBE: detecção a 10^{-5}
- Perturbações matéria escura em crescimento por efeito gravitacional
- Plasma + fótons acoplados atraídos para poços de potencial
- Pressão radiação trava colapso
- Oscilações levam a anisotropias



Harmónicas esféricas

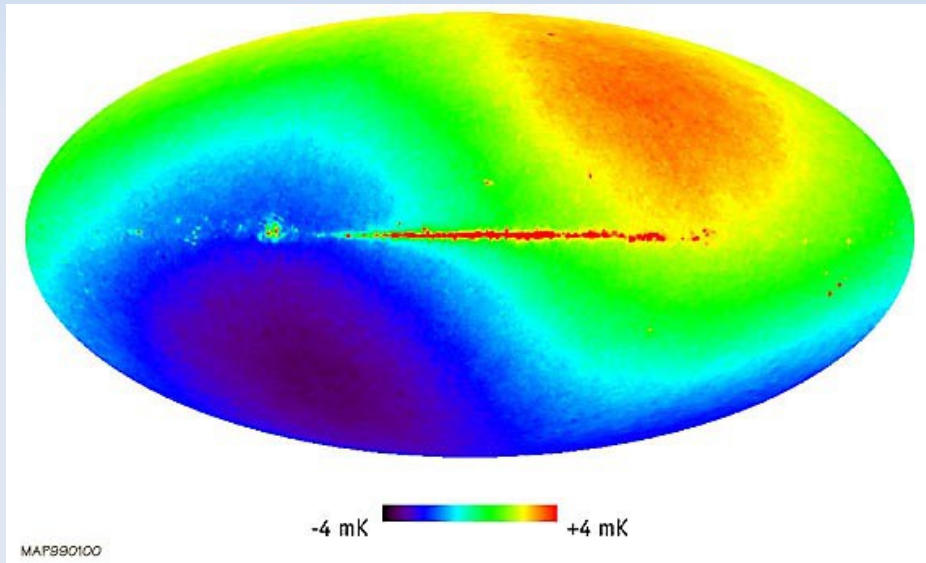
- Equivalente de série de Fourier numa superfície esférica, usada como base de expansão para anisotropias do CMB

- $\delta T(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$



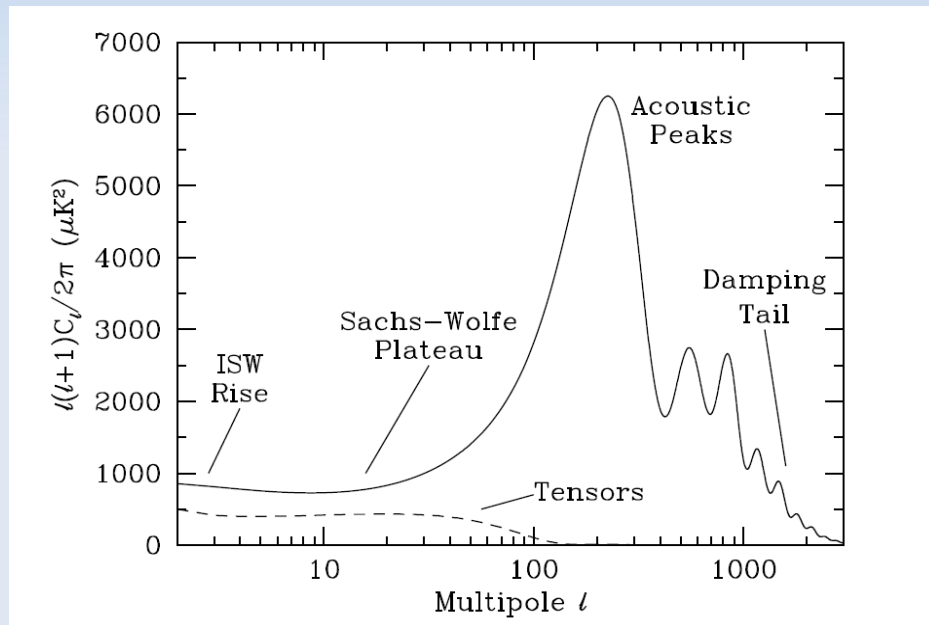
- Flutuações de T são consideradas gaussianas, por causa da maneira como as perturbações são geradas
- Devido à isotropia, não há uma direcção privilegiada, e os modos m são equivalentes
- Toda a informação encontra-se contida no espectro de potência – potência por unidade $ln l$ aproximada por $l(l+1)C_l/2\pi$, com $C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$
- $\theta \sim \pi / l$

Dipólo



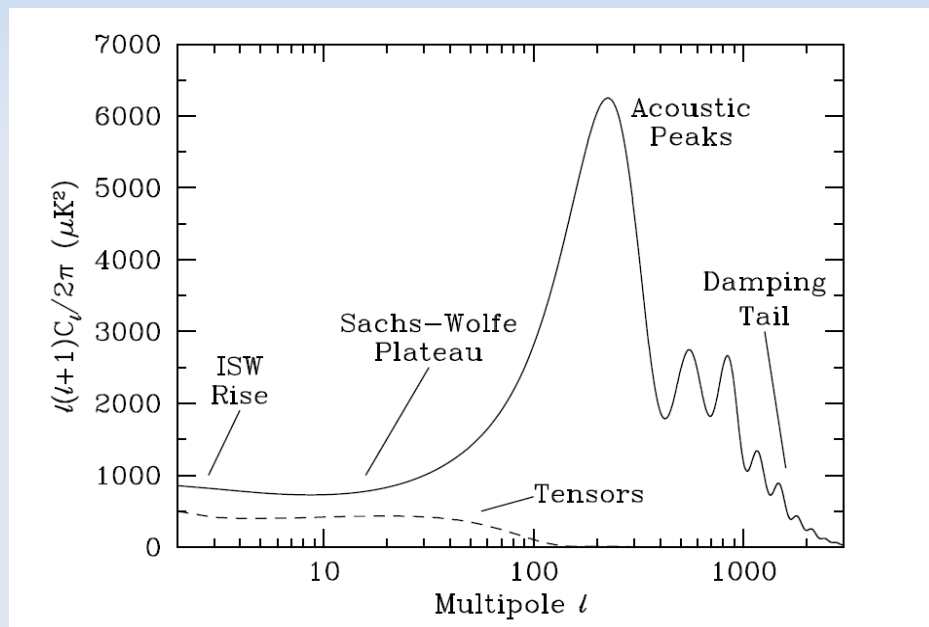
- Maior anisotropia observada é o modo $l = 1$, com amplitude 3.355 ± 0.008 mK
- Corresponde ao efeito doppler da velocidade do sistema solar em relação ao referencial do CMB, $v = 369.0 \pm 0.9$ km s⁻¹
- Velocidade peculiar devida a estrutura próxima
- Subtraído da análise do CMB

Espectro de potência



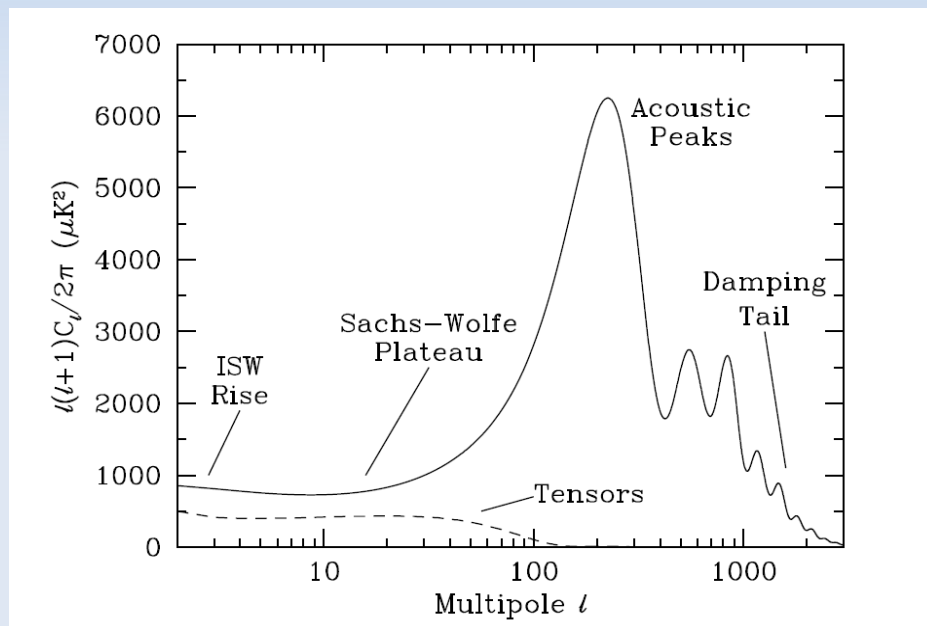
- $\theta \sim \pi / \ell$
- $C_\ell \propto |\Delta T|^2$
- Variância cósmica: uma representação vs. distribuição estatística - erro estatístico inerente

$l < 100$, fora horizonte



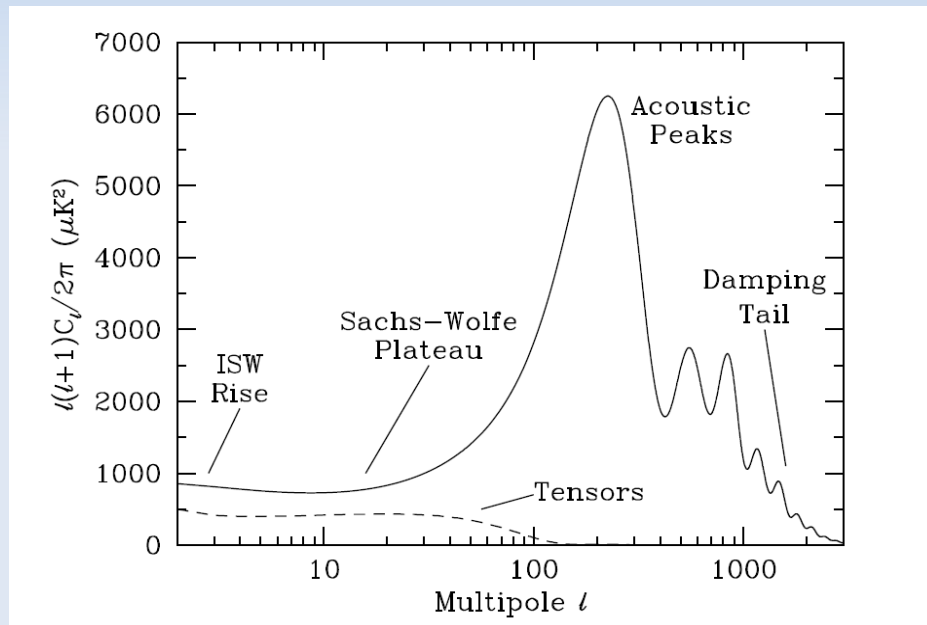
- Inflação prevê invariância de escala das perturbações iniciais – redshift gravitacional, efeito Sachs-Wolfe
- Potenciais variantes (Λ , curvatura) - ISW
- Modo tensorial (ondas gravitacionais)

Picos acústicos



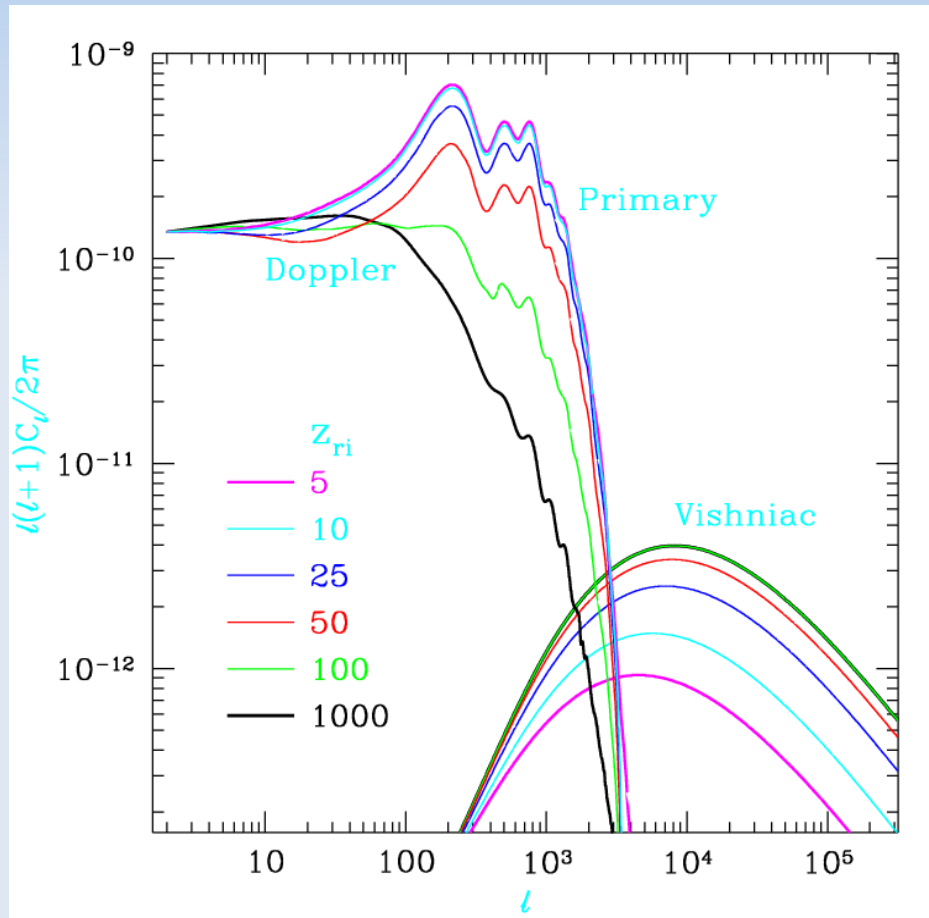
- Oscilações acústicas do fluido bariões+fotões
- Picos alternados de compressão e rarefação
- Posição depende horizonte acústico e velocidade do som
- Vales correspondem a máximo de velocidade – efeito doppler

Supressão / > 1000



- Processo de recombinação não é instantâneo
- Escalas menores que espessura da superfície de último espalhamento são suprimidas por efeitos de difusão

Re-ionização

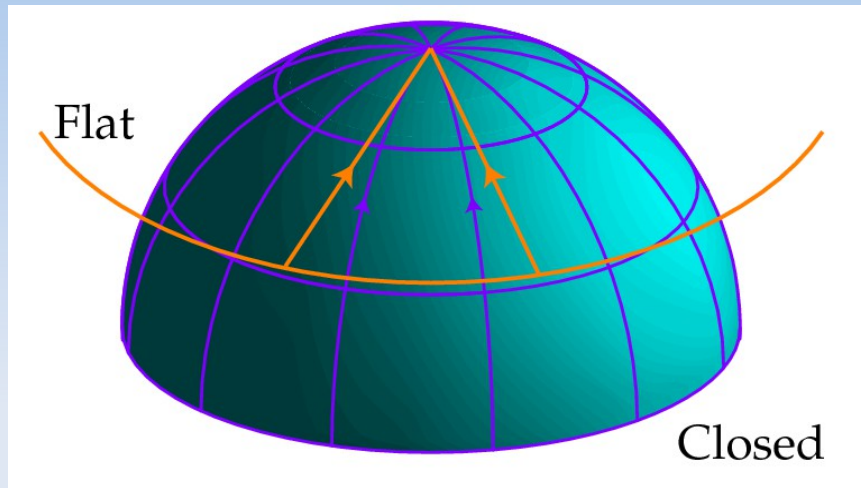


- Emissão das primeiras estrelas re-ioniza o universo
- Altera sinal CMB devido a novos espalhamentos, tendência de supressão das anisotropias
- Densidade de electrões é muito menor que na altura da recombinação (percurso livre médio da ordem do horizonte)

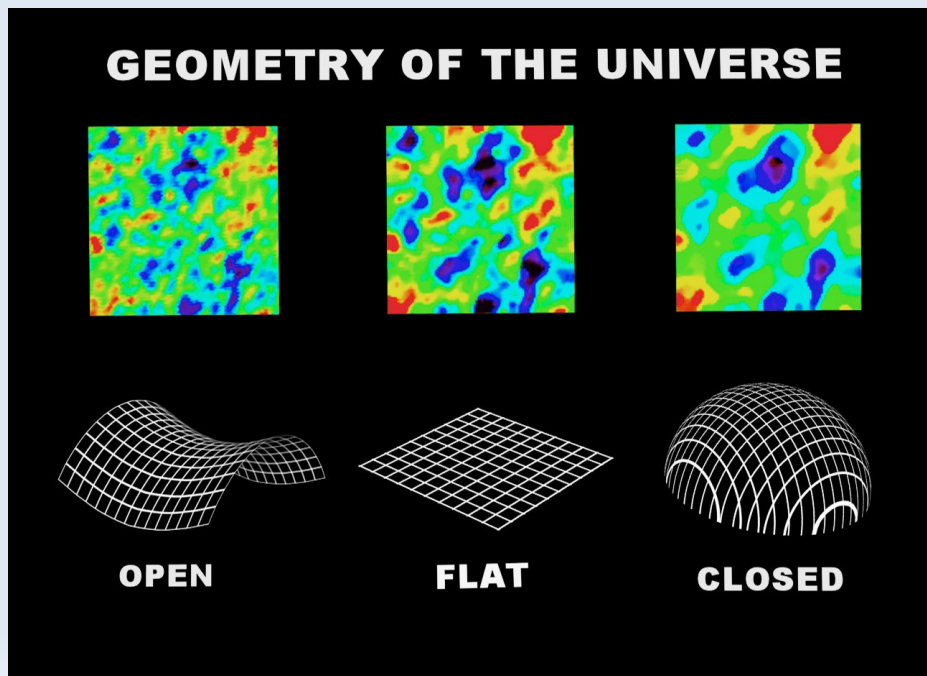
Parâmetros cosmológicos

- Constante de Hubble H
- Parâmetro de densidade Ω , relativamente à densidade crítica $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G$
- Define a geometria do universo, plano para $\Omega=1$, aberto se $\Omega<1$, fechado se $\Omega>1$
- Bariões Ω_b , matéria escura Ω_m , energia escura Ω_Λ
- $A, n, r, \tau...$

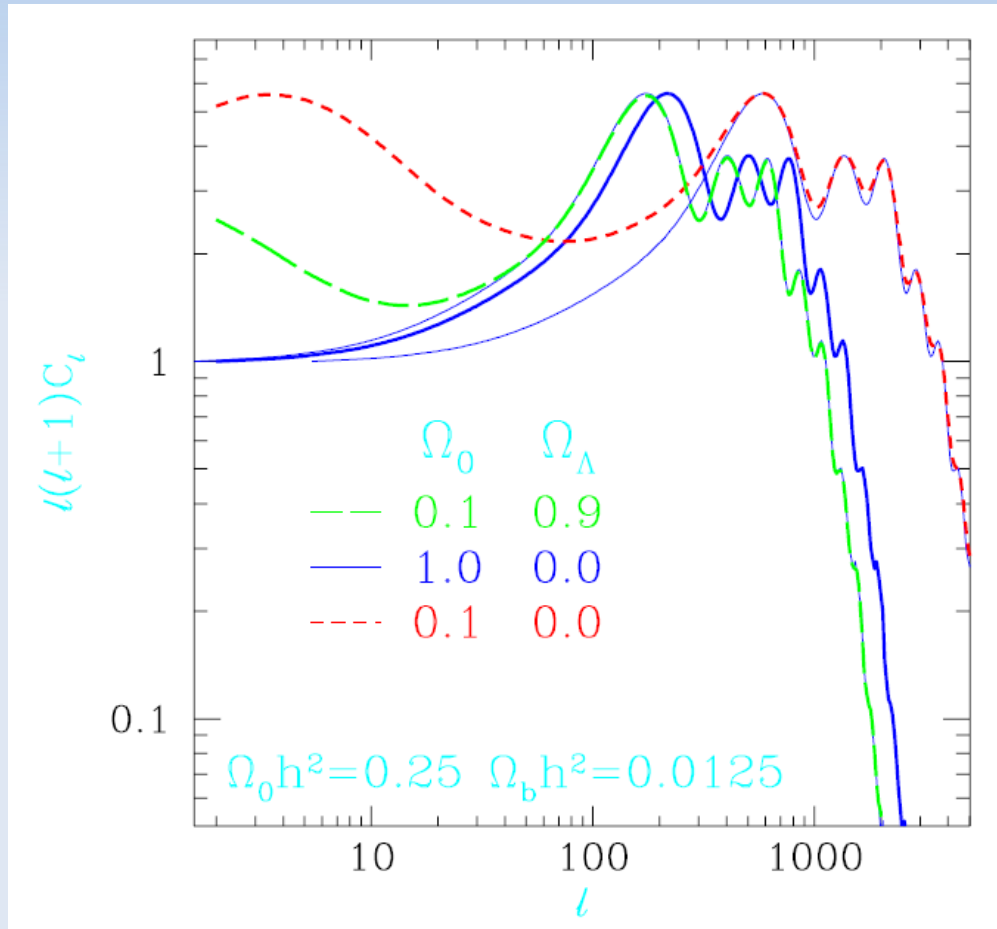
Horizonte e curvatura



- Primeiro pico marca tamanho horizonte na recombinação
- Num universo fechado, a mesma escala equivale a um ângulo maior – / menor

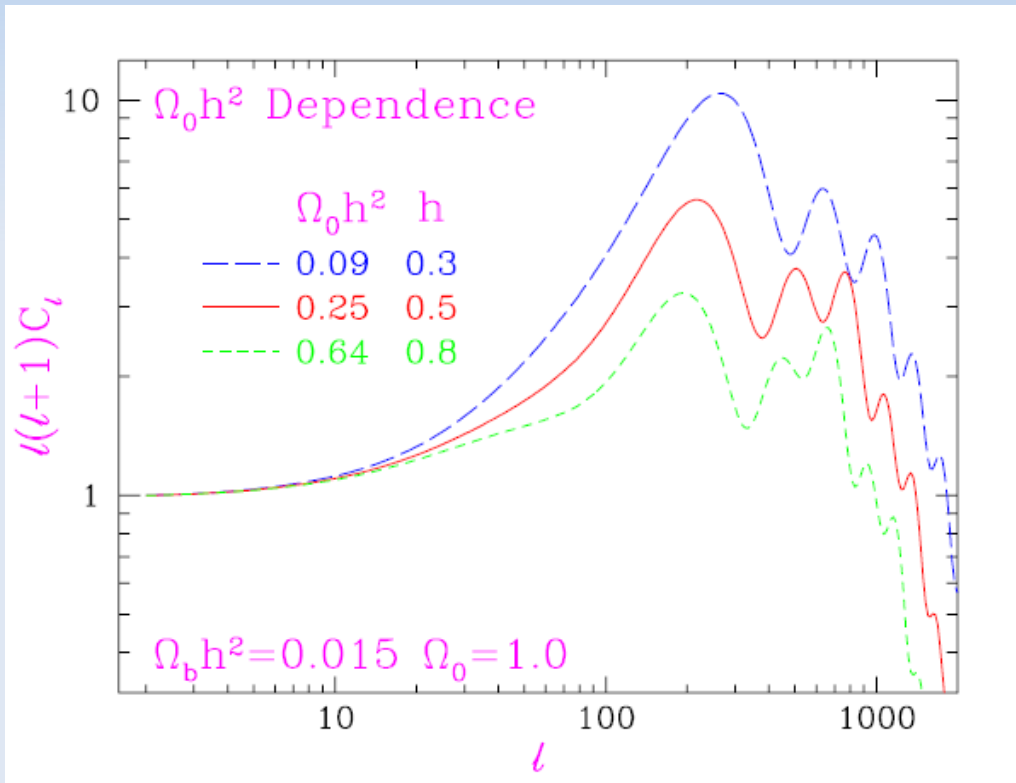


Dependência cosmologia



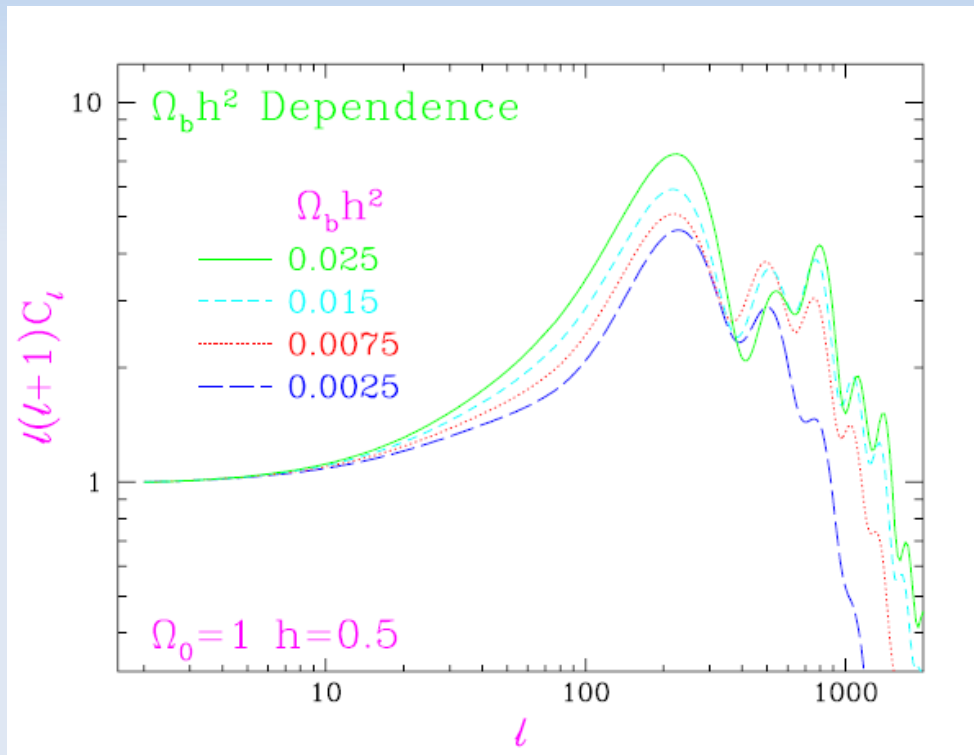
- Dependência da distância angular com Λ e curvatura
- ISW tardio (variação do potencial, redshift gravitacional)

Dependência cosmologia



- Densidade física matéria $\Omega_m h^2$
- Afecta potencial gravitacional
- Altera mudança do efeito primário de crescimento das perturbações

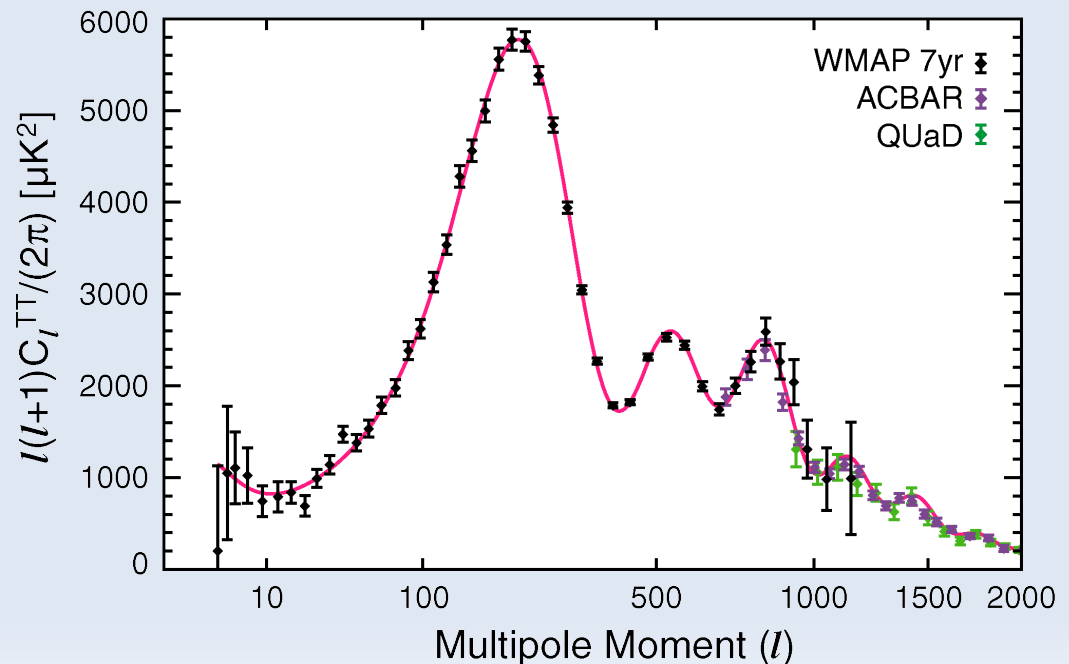
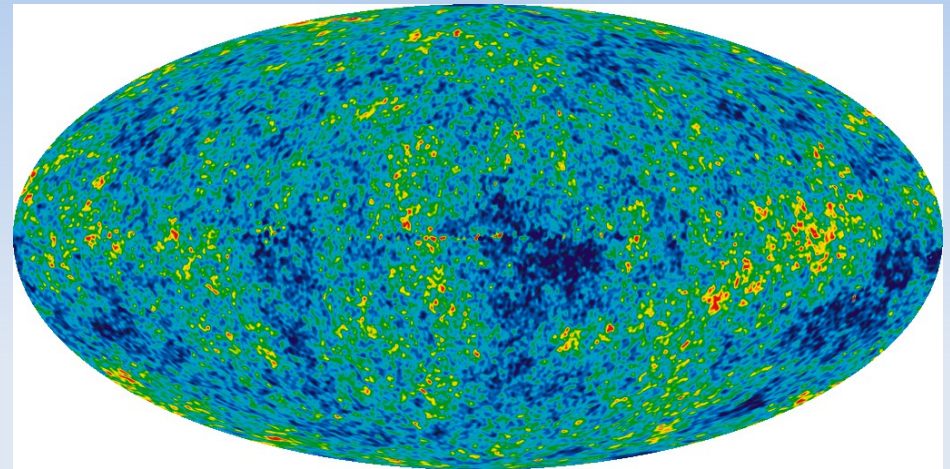
Dependência cosmologia



- Bariões acrescentam inércia ao oscilador do fluido bariões – fótons
- Aumenta amplitude dos picos de compressão, diminui a dos picos de rarefacção

WMAP

- Missão satélite, mapa completo (all sky)
- Medições precisas dos primeiros picos (mas variância cósmica)
- Complementado com outras observações



Cosmologia WMAP

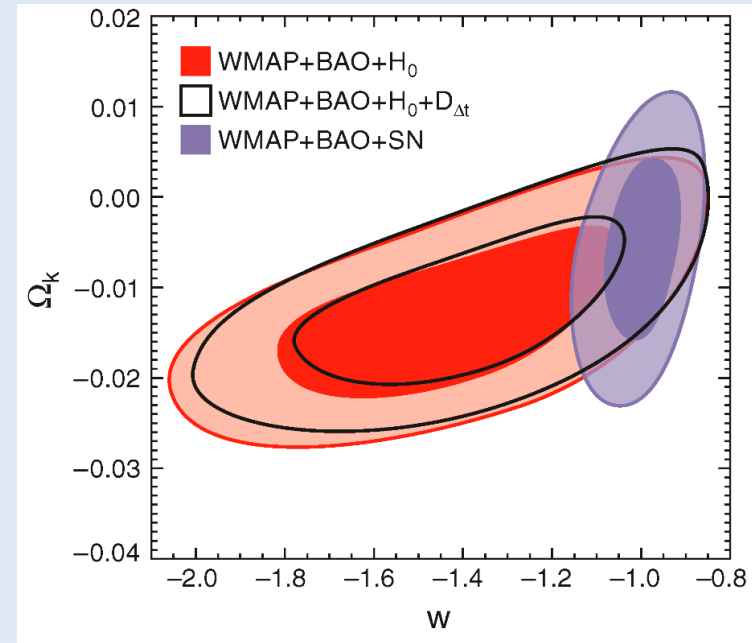
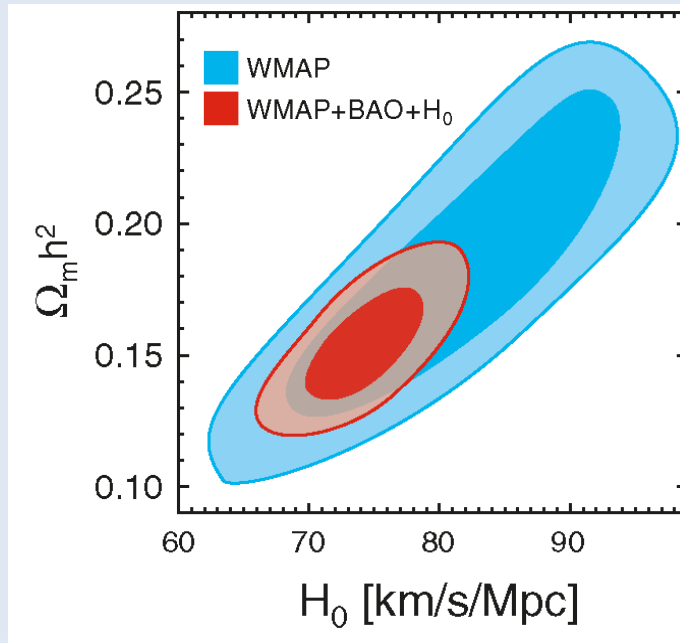
WMAP Cosmological Parameters			
Model: Λ cdm+sz+lens			
Data: wmap7			
$10^2 \Omega_b h^2$	$2.258^{+0.057}_{-0.056}$	$1 - n_s$	0.037 ± 0.014
$1 - n_s$	$0.0079 < 1 - n_s < 0.0642$ (95% CL)	$A_{\text{BAO}}(z = 0.35)$	$0.463^{+0.021}_{-0.020}$
C_{220}	5763^{+38}_{-40}	$d_A(z_{\text{eq}})$	14281^{+158}_{-161} Mpc
$d_A(z_*)$	14116^{+160}_{-163} Mpc	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$
h	0.710 ± 0.025	H_0	71.0 ± 2.5 km/s/Mpc
k_{eq}	$0.00974^{+0.00041}_{-0.00040}$	ℓ_{eq}	137.5 ± 4.3
ℓ_*	302.44 ± 0.80	n_s	0.963 ± 0.014
Ω_b	0.0449 ± 0.0028	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00057}_{-0.00056}$
Ω_c	0.222 ± 0.026	$\Omega_c h^2$	0.1109 ± 0.0056
Ω_Λ	0.734 ± 0.029	Ω_m	0.266 ± 0.029
$\Omega_m h^2$	$0.1334^{+0.0056}_{-0.0055}$	$r_{\text{hor}}(z_{\text{dec}})$	285.5 ± 3.0 Mpc
$r_s(z_d)$	153.2 ± 1.7 Mpc	$r_s(z_d)/D_v(z = 0.2)$	$0.1922^{+0.0072}_{-0.0073}$
$r_s(z_d)/D_v(z = 0.35)$	$0.1153^{+0.0038}_{-0.0039}$	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.5}_{-1.6}$ Mpc
R	1.719 ± 0.019	σ_8	0.801 ± 0.030
A_{SZ}	$0.97^{+0.68}_{-0.97}$	t_0	13.75 ± 0.13 Gyr
τ	0.088 ± 0.015	θ_*	0.010388 ± 0.000027
θ_*	0.5952 ± 0.0016 °	t_*	379164^{+5187}_{-5243} yr
z_{dec}	1088.2 ± 1.2	z_d	1020.3 ± 1.4
z_{eq}	3196^{+134}_{-133}	z_{reion}	10.5 ± 1.2
z_*	$1090.79^{+0.94}_{-0.92}$		

- Principal resultado:

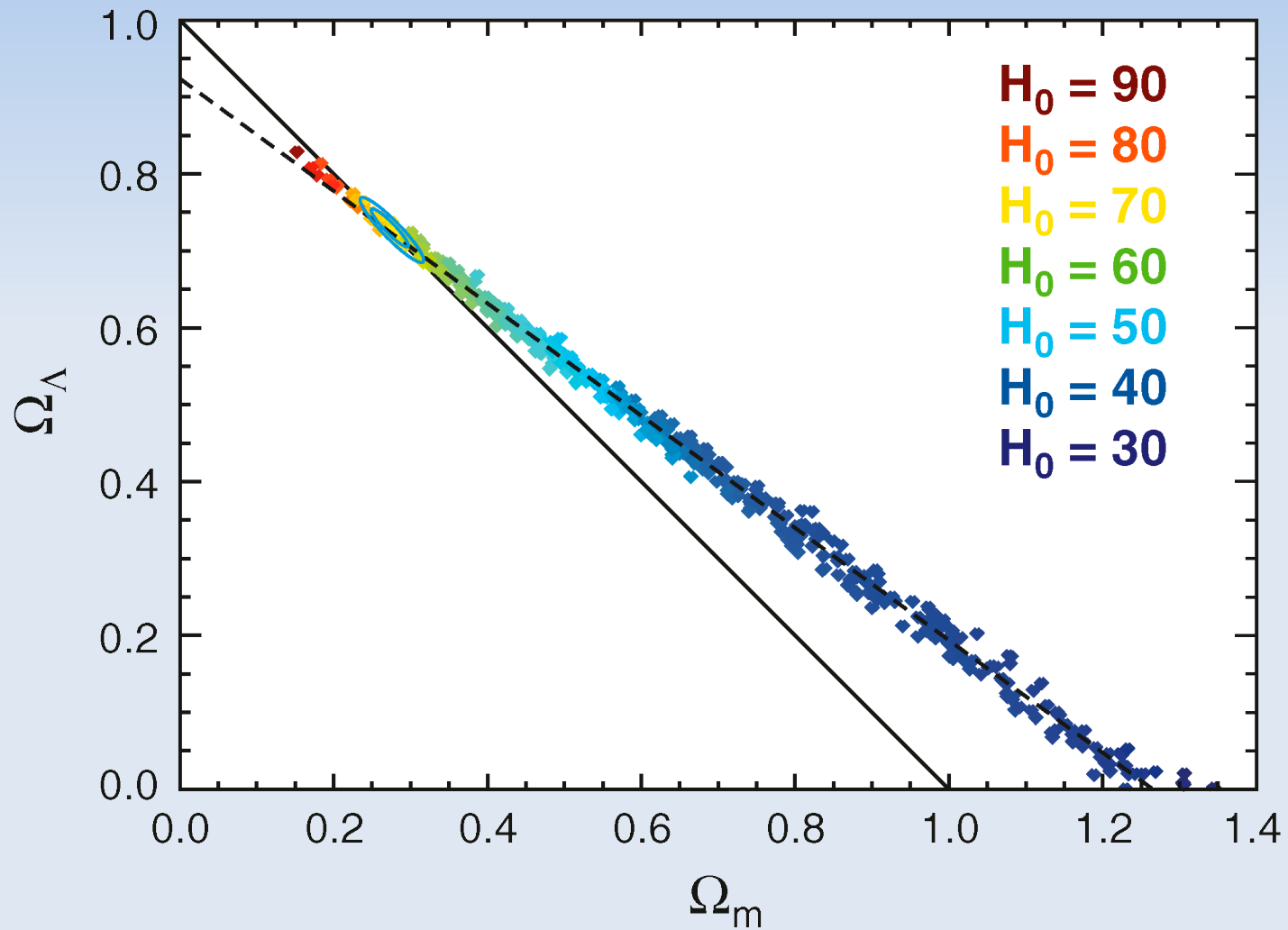
modelo Λ CDM, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $\Omega_{\text{CDM}} = 0.22$, $\Omega_b = 0.045$

Degenerescências

- Algumas combinações de parâmetros levam ao mesmo espectro de CMB
- Análise combina resultados com outros dados para melhorar limites – atenção aos priors



Degenerescências



Polarização

- Espalhamento induz polarização linear na luz
- Estima-se que o CMB está polarizado ao nível de 5%
- Dois modos, E e B
- Modo B gerado por ondas gravitacionais
- Díficil detecção (particularmente modo B)

Efeito Sunyaev – Zel'dovich

- Espalhamento Compton de fótons do CMB por electrões em aglomerados
- Transfere energia para os fótons, levando a distorção do sinal do CMB
- Independente de redshift, útil para descobrir aglomerados
- Contagem de aglomerados com redshift

Conclusões

- CMB como radiação relíquia do Big Bang
- Corpo negro a $T \sim 3\text{K}$
- Altamente isotrópico, desvios à escala 10^{-5}
- Espectro de anisotropias, origem da forma
- Dependência dos parâmetros cosmológicos, degenerescências
- Principais resultados das observações
- Planck, polarização, SZ

Referências

- background.uchicago.edu/~whu/physics/tour.html
- Livros de cosmologia
- Scott & Smoot, Cosmic Microwave Background, cap. 25, livro Particle Data Group 2012 (pdg.lbl.gov)
- Hu & Dodelson, Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics vol. 40, 2002
- WMAP (map.gsfc.nasa.gov)