

## 7 – COSMOLOGIA

### 7.1 Parâmetros fundamentais

O primeiro resultado relevante, que se deriva directamente de  $H_0$ , é uma **escala de tempo (de Hubble)** para o Universo (estimativa da sua idade): basta calcular o inverso da constante de Hubble

$$t_H = 1 / H_0 \approx 1 / (70 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}) \approx 3.1 \times 10^{22} / 70 \times 10^3 \text{ s} \approx 4.4 \times 10^{17} \text{ s} \approx 14 \times 10^9 \text{ anos}$$

Há três constantes cosmológicas fundamentais, para além de  $H_0$ . No fundo, todas estas nos dão a **densidade de massa e energia** do Universo.

O **parâmetro de densidade (de massa) local do Universo**,  $\Omega_0$ , é dado em função de uma **densidade de massa crítica** ( $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$ ). Na prática, esta é a densidade limite (onde  $\Omega_0=1$ ) para que o Universo recolapse no futuro ( $\Omega_0>1$ ) ou expanda para sempre ( $\Omega_0<1$ ). Usando  $\rho_0$  como a densidade local ( $z=0$ ) do Universo:

$$\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c = 8\pi G \rho_0 / (3H_0^2)$$

Temos:  $\rho_c \approx 2 \times 10^{-33} H_0^2 \text{ g/cm}^3$

Durante muitos anos (de facto, décadas) acreditou-se que vivíamos num Universo crítico ( $\Omega_0=1$ ) sem qualquer contribuição energética significativa (Universo quase só massa). O parâmetro de densidade de energia (a **constante cosmológica**  $\lambda_0$  ou  $\Omega_\Lambda$ ) valia **zero**. Agora sabemos que cometemos **dois** erros.

Antes de mencionarmos a correcção desses dois erros, vamos dar a definição de um novo parâmetro: o da **desaceleração do Universo** ( $q_0$ ). É dado por:

$$q_0 = \Omega_0/2 - \lambda_0$$

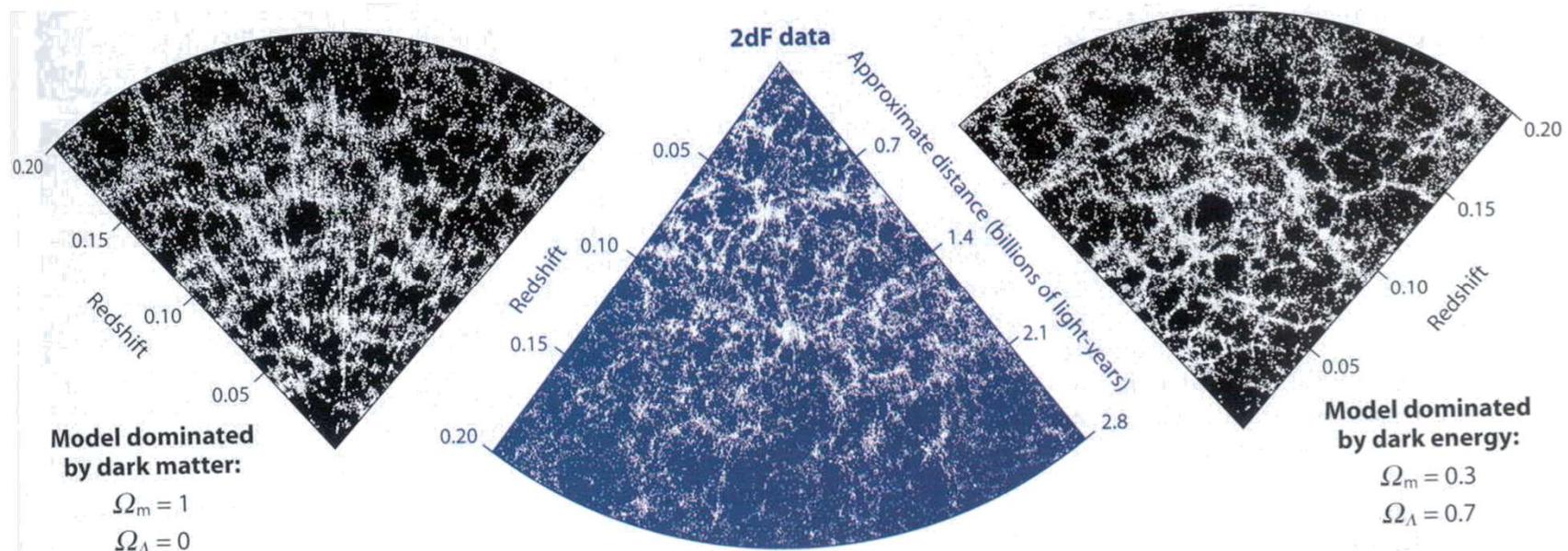
Assim, até há uns 15 anos atrás acreditava-se que:  $q_0 = 0.5$ ,  $\Omega_0 = 1$ ,  $\lambda_0 = 0$  (Universo em desaceleração)

Entretanto, a massa bem somada de superenxames de galáxias (incluindo em ~90% matéria escura) nunca dava para chegar sequer perto da densidade crítica. As melhores estimativas colocam (ainda hoje):

$$\Omega_0 = 0.3$$

(mapas de correlação a três pontos)

**Erro 1 corrigido**



Ora, mantendo  $\lambda_0$  nulo, a nova versão valia:  $q_0 = 0.15$ ,  $\Omega_0 = 0.3$ ,  $\Lambda = 0$  (Universo menos desacelerado)

O problema é que a Teoria da Inflação exige um Universo de geometria **plana** e este só acontece se:

$$\Omega_0 + \lambda_0 = 1$$

Após uns anos de discussão e de “dor de barriga” para muitos inflacionistas, a luz fez-se há poucos anos quando amostras de supernovas distantes e o WMAP revelaram que, de facto, temos  $\lambda_0 \approx 0.7$  (logo  $q_0 \approx -0.5$ ). O Universo, afinal, está em **aceleração**.

*Erro 2 corrigido*

Um alívio para todos!...

... OU TALVEZ NÃO!

Agora temos um Universo que não só tem 90% da sua matéria desconhecida mas, pior, 2/3 de tudo o que o compõe é ainda mais misterioso (energia escura? quintessência? multi-dimensões?). Em resumo:

**100% do Universo:**

~ 70% Energia Escura

~ 27% Matéria Escura

~ 3% Matéria “conhecida”

## 7.2 Modelo standard do Universo

**Princípio cosmológico (antrópico):** o Universo é igual para todos os observadores (isotropia).

O modelo standard para a formação e evolução do Universo como um todo é o do **Big Bang**.

<i>Estado inicial</i>	$t_U \sim 0s$		<i>singularidade:</i> Universo em $<10^{-22}m$
<i>Explosão</i>	$t_U \sim 10^{-43}s$	$T_U \sim 10^{33}K$	Universo todo em expansão desde então (balão 4D) Origem das leis da Física e <i>quatro</i> forças
<i>Inflação</i>	$t_U \sim 10^{-35}-10^{-32}s$	$T_U \sim 10^{27}K$	expansão exponencial (cresce $10^{50}$ vezes) – <i>inflação</i>
	$t_U \sim 10^{-23}-10^{-5}s$	$T_U > 10^{12}K$	bosões B, W criam fótons ( $10^{-11}s$ ); quarks abundam; quarks criam $p, n$ ( $10^{-5}s$ )
<i>Nucleossíntese</i>	$t_U \sim 10^{-4}s$	$T_U \sim 10^{12}K$	“começa” a Relatividade Geral (temperaturas “físicas”)
	$t_U \sim 0.1-1 s$	$T_U \sim 10^{10}K$	início da formação de nucleões ( $p+n$ ), de $e^+, \nu$ , etc.
	$t_U \sim 14 s$	$T_U \sim 3 \times 10^9 K$	$p+n$ (formação intensa de nucleões) forma-se ${}^2H_1$ ( $\equiv D$ )
	$t_U \sim 3 \text{ min}$	$T_U \sim 10^9 K$	$D + D \rightarrow {}^3He_2 + n$ $D + {}^3He_2 \rightarrow {}^4He_2 + p$ forma-se ${}^3H_1, Li, Be$ ; Universo com $\sim 75\%$ H e $25\%$ He

RADIACÃO Leptões Bariões

$t_U \sim 35$  min       $T_U \sim 3 \times 10^8$  K      formação de átomos iniciada

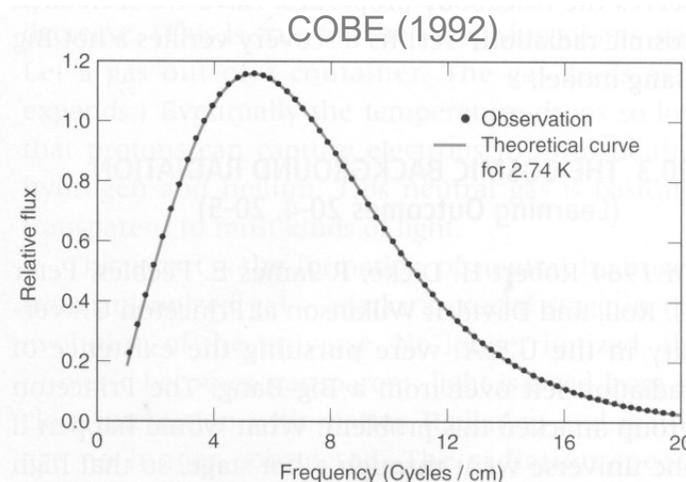
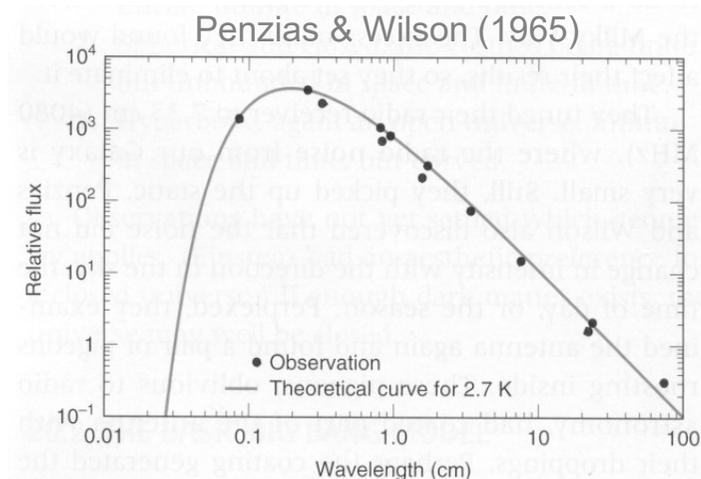
$t_U \sim 6$  meses       $T_U \sim 10^6$  K

$t_U \sim 10^5$  anos      matéria electricamente neutra, fótons iniciam liberdade

**Recombinação**       $t_U \sim 400\ 000$  anos       $T_U \sim 3000$  K      matéria dissocia-se da radiação; deixa de ser opaca  
( $z \sim 1100$ )

Ora, é a partir deste estágio final que o Universo passa a ser transparente e que temos o primeiro acesso electromagnético ao mesmo via Ruído Cósmico de Fundo (Cosmic Microwave Background: CMB) – com neutrinos vê-se até  $t_U \sim 1$  min; ondas gravitacionais  $t_U < 1$  min.

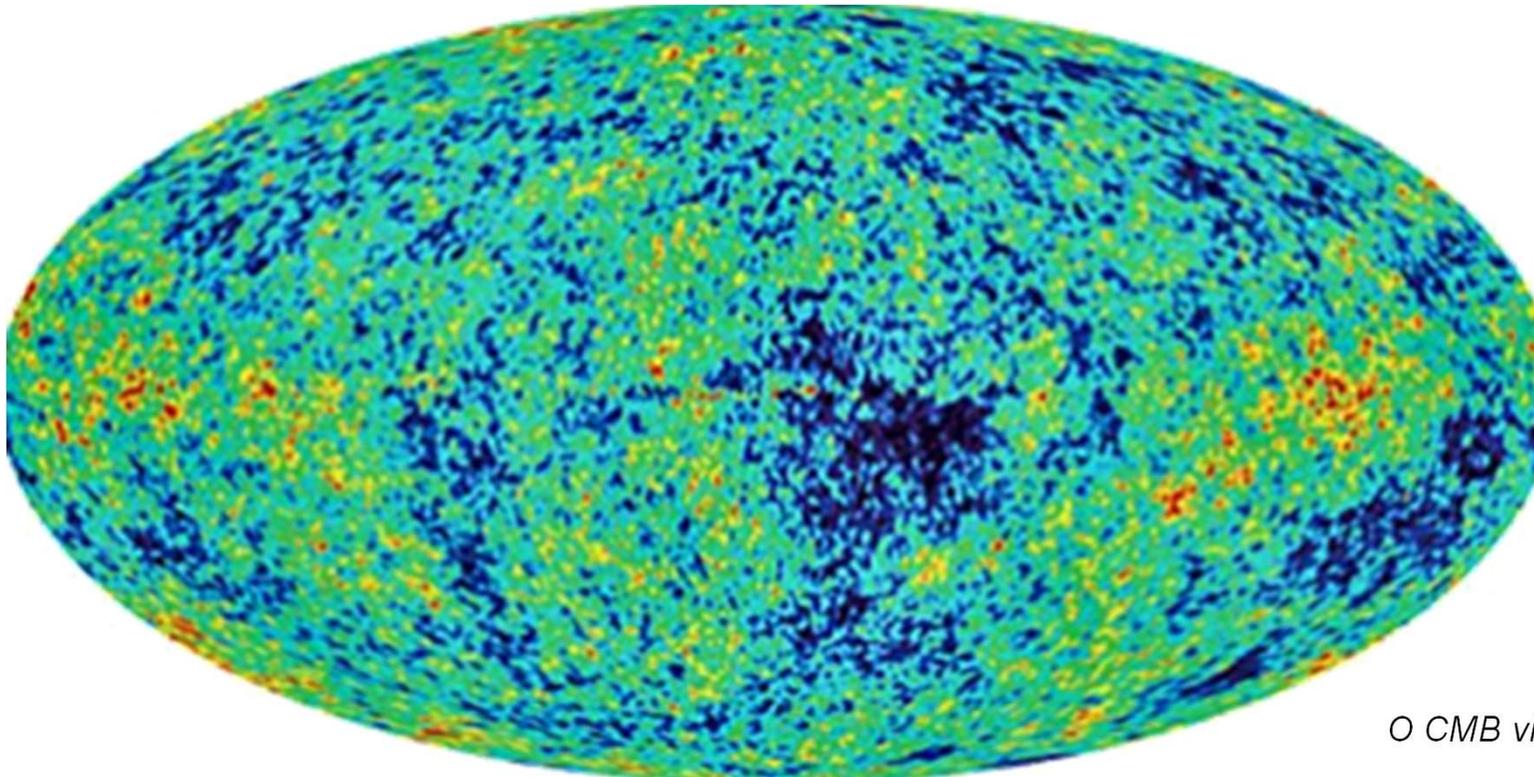
O CMB foi descoberto por acidente por Penzias e Wilson em 1965. A sua temperatura (2.725 K) é exactamente a prevista devido à expansão do Universo ( $T/z \sim 3000$  K /  $1100 \sim 2.7$  K)



*Os erros de medição do COBE são ~0.03%.*

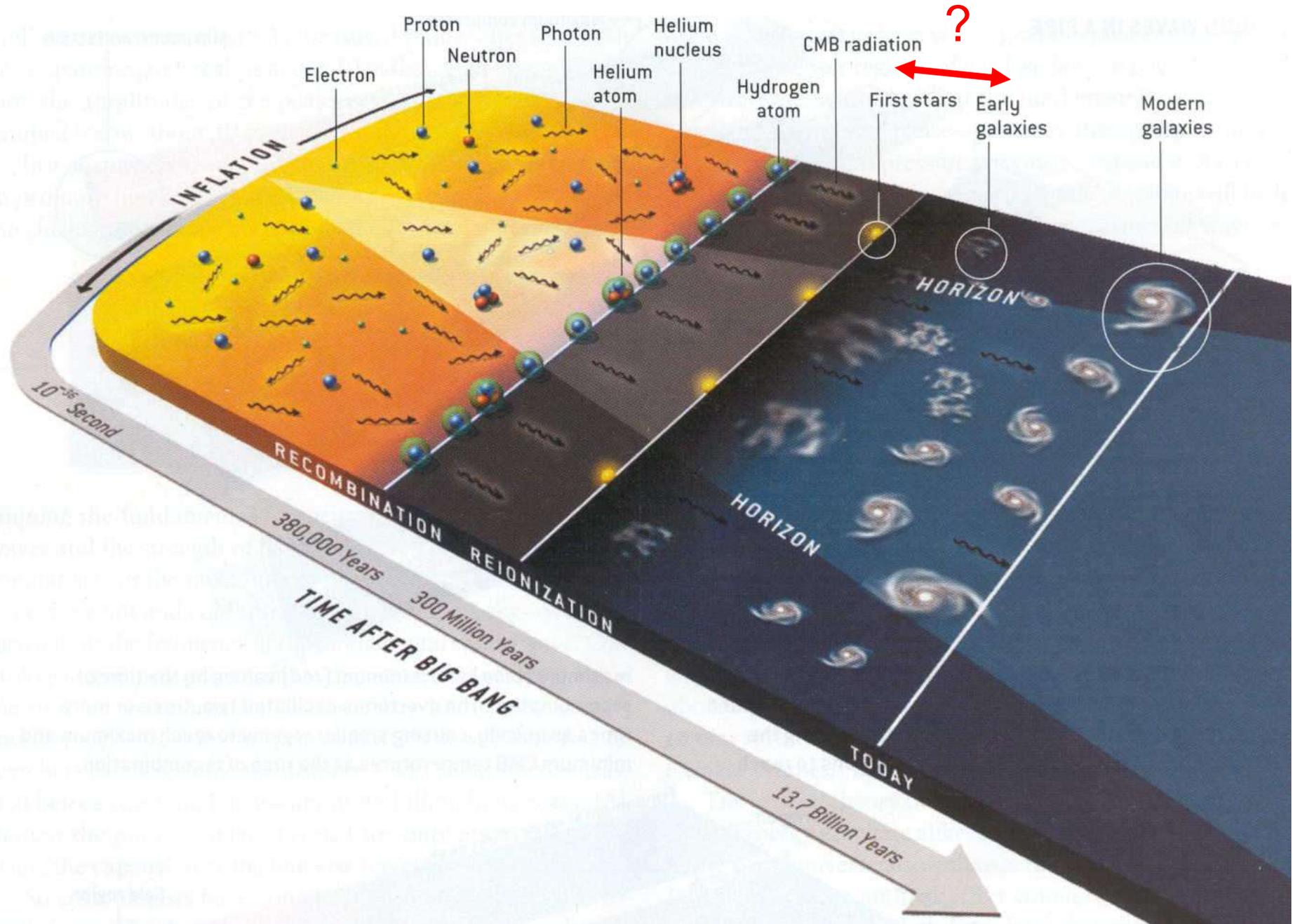
O WMAP (lançado em 2003 e ainda no espaço) veio trazer mais resolução ainda aos mapas do CMB. Pelas implicações em parâmetros cosmológicos, deu a idade mais precisa para o Universo desde sempre:

$$13.7 \times 10^9 \text{ anos } (\pm 1\%)$$

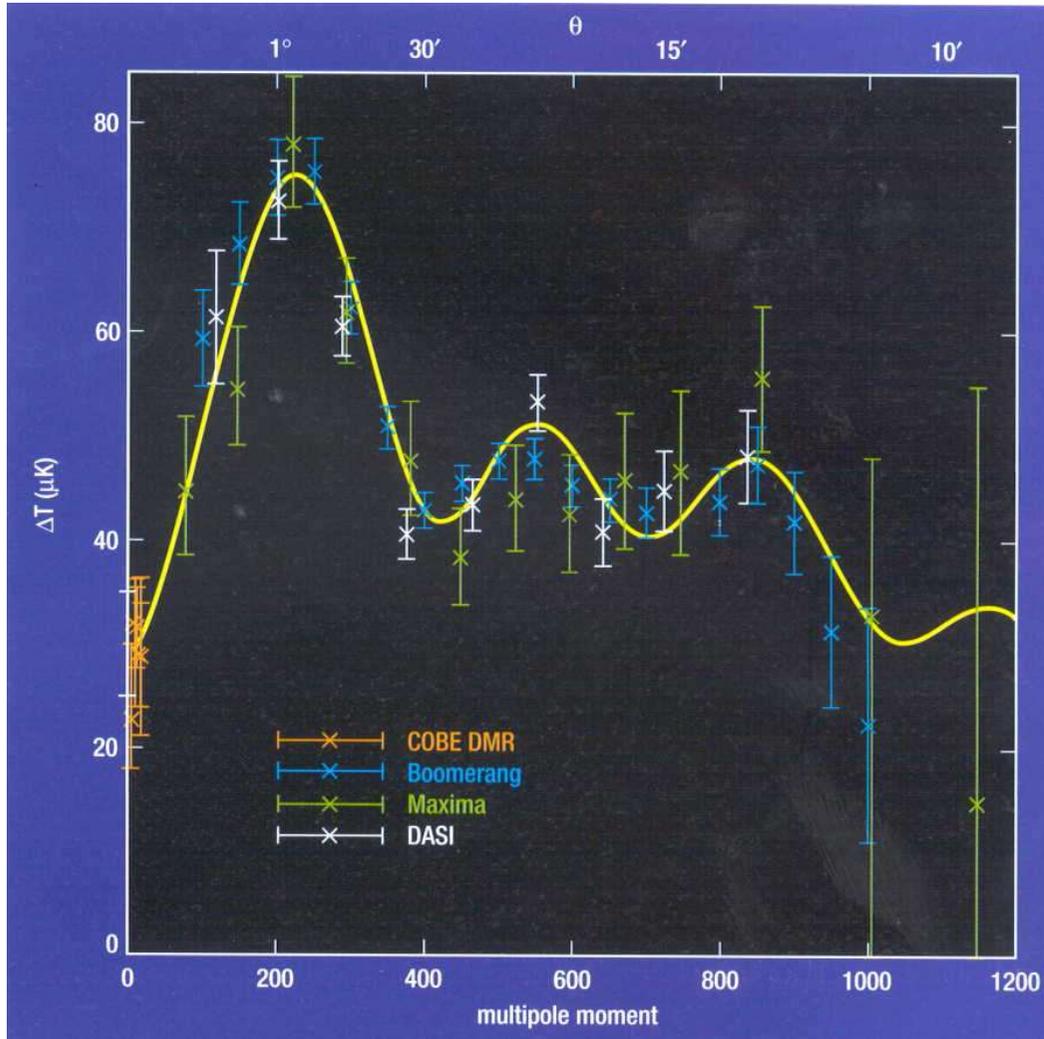


*O CMB visto pelo WMAP*

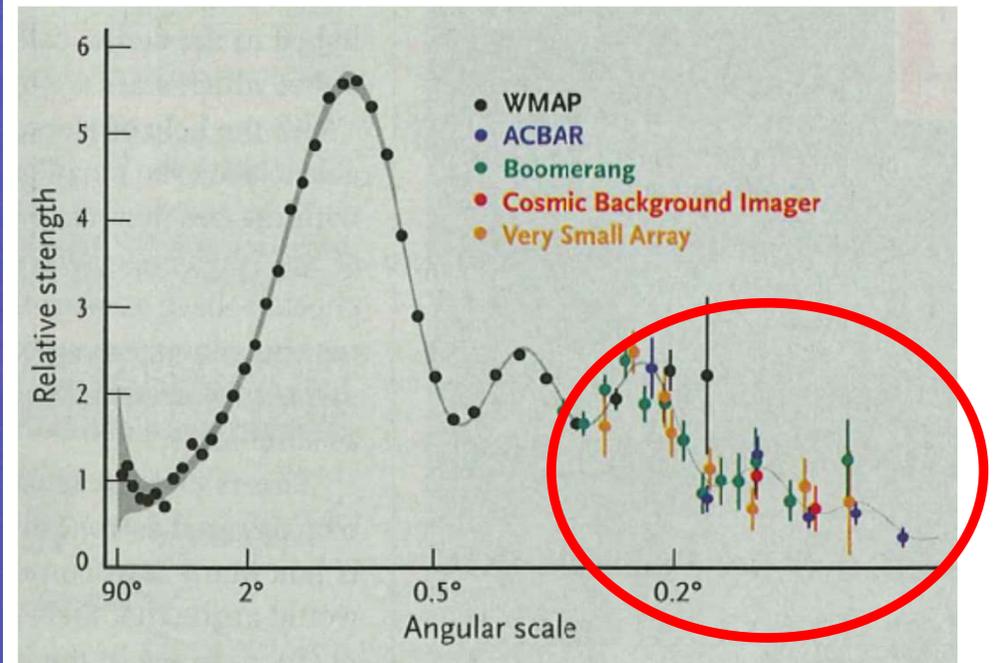
O Planck, já lançado em 2009, vai trazer uma nova revolução, pois tem uma resolução 15 vezes melhor que o WMAP, para além de conseguir ver o CMB também em polarização. Espera-se que, não só, nos dê o valor de  $H_0$ ,  $\Omega_0$ ,  $q_0$  com uma grande precisão mas, também, que mostre mais detalhes sobre o período inflacionário, que ainda não é bem compreendido.



De facto, a inflação produziu “ondas sonoras” com picos ( $\nu_{\text{principal}} + \text{harmónicos}$ ) que se medem:

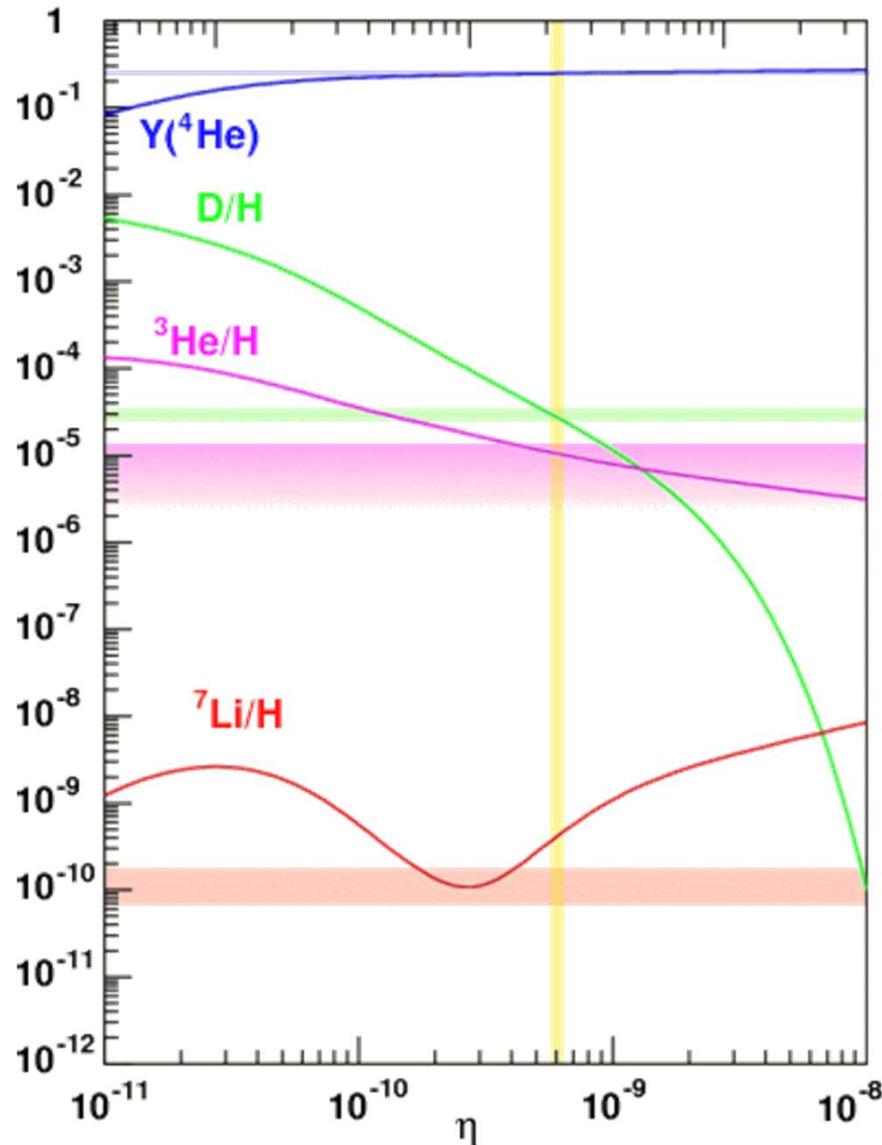


Pré-WMAP.



Versão mais recente. **erro grande**

Mantendo-nos, ainda, no modelo do Big Bang, há uma relevante previsão (nucleossíntese - abundâncias) espectacularmente confirmada em observações:



*As abundâncias dos elementos produzidos durante o Big Bang (primeiros minutos) previstas teoricamente (quatro curvas) e medidos experimentalmente (quatro bandas horizontais coloridas).*

*No eixo horizontal temos a razão de prótons+neutrões para fótons do CMB, conforme a era do Universo. No vertical são as abundâncias (em massa).*

*A barra amarela vertical é o valor de  $\eta$  medido pelo WMAP. As abundâncias relativas batem quase todas certo aí!*

Há modelos alternativos para o Universo, que explicam, por exemplo, a constante cosmológica como uma **ilusão**. São modelos de **Multiversos** e de **Cordas Cóslicas** que se descrevem a seguir:

## Cordas Cóslicas

**Cordas cóslicas** existirão em *branes* (membranas) enroladas no nosso Universo 4D (num hiper-espaço com pequeníssimas dimensões:  $10^{-32}$  m). A Matéria Escura pode ser explicada pela influência destes *branes* no nosso Universo. As cordas cóslicas são **muito menores** que um átomo; a sua variada vibração define os electrões, prótons e todas as partículas.

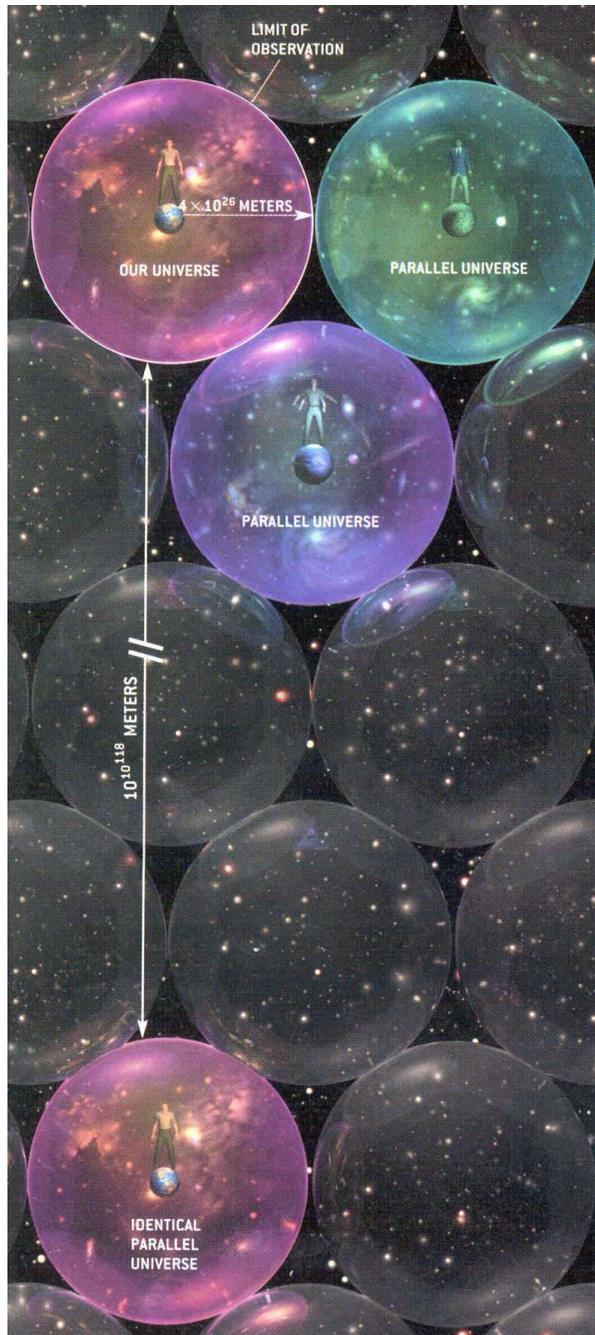
Teremos um Universo com 6 (ou 7 – *M-theory*) dimensões espaciais extra, em adição às 4D.

Todos os  $10^{12}$  anos haverá uma colisão de dois Universos, fazendo surgir, esse choque, Big Bangs em cada um.

## Multiverso nível I

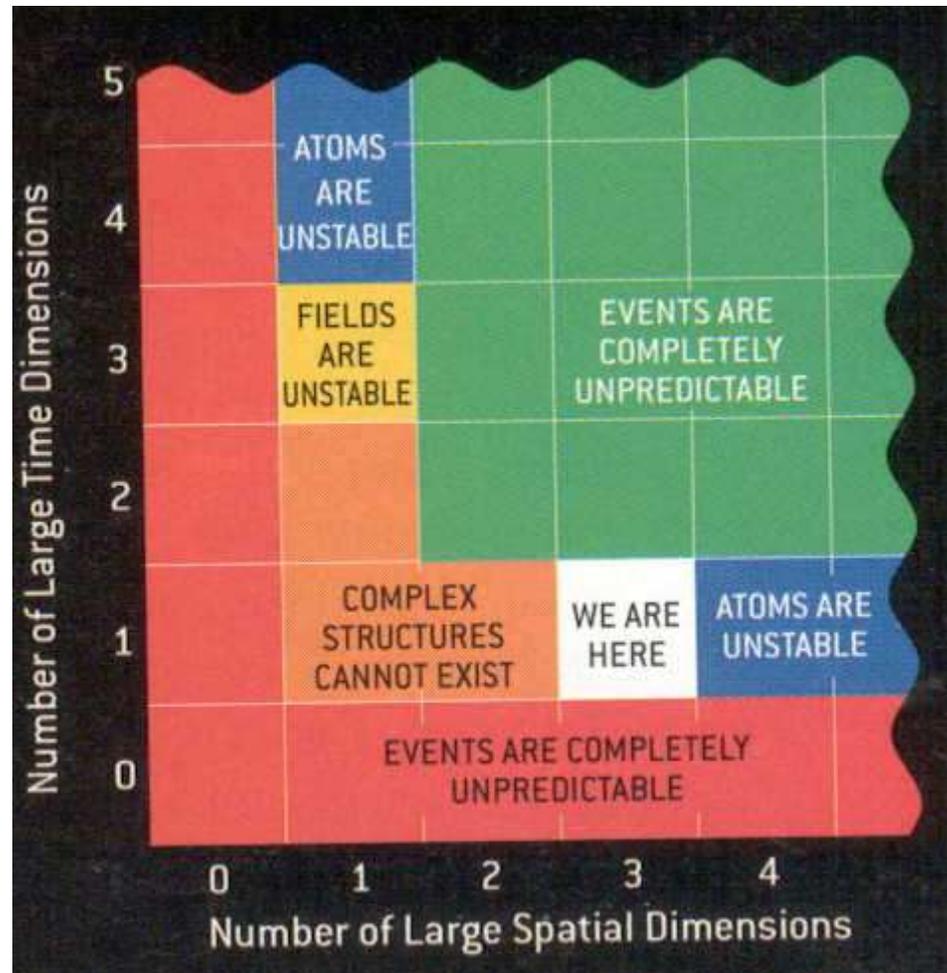
Existe um gémeo de nós numa galáxia a  $10^{10^{28}}$  m daqui (a probabilidade é minúscula, mas não nula).

Existe um Universo igual ao nosso a  $10^{10^{118}}$  m (o nosso Universo tem  $10^{118}$  partículas).



## Multiverso nível II

Permitem-se Universos com diferentes constantes físicas, dentro do ensemble (incluem-se muitos onde é absolutamente impossível a existência de vida).



## Multiverso nível III

**Universos Quânticos:** existem **todas** as possibilidades permitidas pela Mecânica Quântica: por ex., o tempo pode fluir por saltos quânticos de Universo em Universo.

## Multiverso nível IV

O Universo pode ter qualquer tipo de Lei Física ou Estrutura Matemática (2-torus, etc.).

## Menos complexo:

O princípio cosmológico não se aplica e estamos, realmente, num **local especial** do Universo...

# O Universo

Formação Científica, Cultural, Social e Ética  
(1º ciclo)



**OBRIGADO!**

**OBRIGADO!**

# OBRIGADO!

*[foi só para chegar às 200 páginas, para termos um número redondo...]*