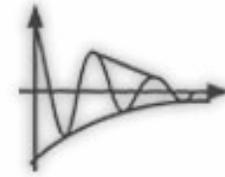




VI Escola do CBPF

Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



Parte III

O Universo Homogêneo II:

Breve História Térmica do Universo

Equação de estado e temperatura

- Se $kT \gg mc^2$:

relativístico $\Rightarrow p \approx \rho/3$

- Se $kT \ll mc^2$:

não relativístico $\Rightarrow p \ll \rho$

Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

$$\rho = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) E(p) d^3 p = \frac{g}{(2\pi)^3} \int \frac{1}{e^{\sqrt{m^2+p^2}/T} \pm 1} \sqrt{m^2 + p^2} d^3 p$$

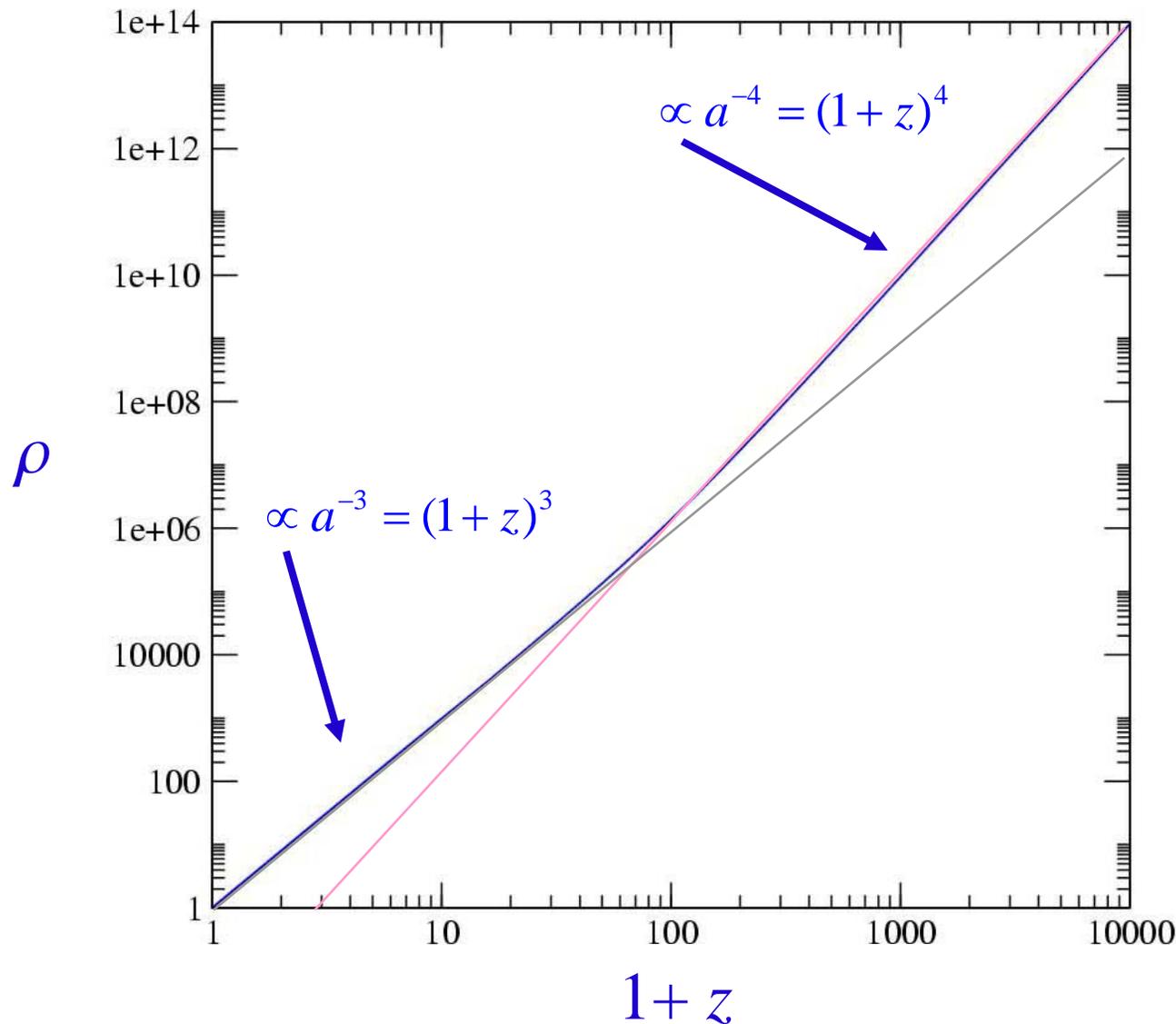
função de distribuição
("probabilidade") Energia Fermi-Dirac
Bose-Einstein Energia

- Pressão:

$$p = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) \frac{p^2}{3E(p)} d^3 p = \frac{1}{3} \frac{g}{(2\pi)^3} \int \frac{1}{e^{\sqrt{m^2+p^2}/T} \pm 1} \frac{p^2}{\sqrt{m^2 + p^2}} d^3 p$$

Equilíbrio, $\mu = 0$

Densidade de energia e expansão do Universo: partículas com massa

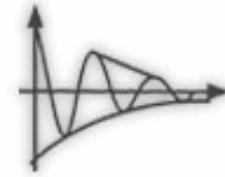


Observação:
Exemplo ao
lado para
neutrinos



VI Escola do CBPF

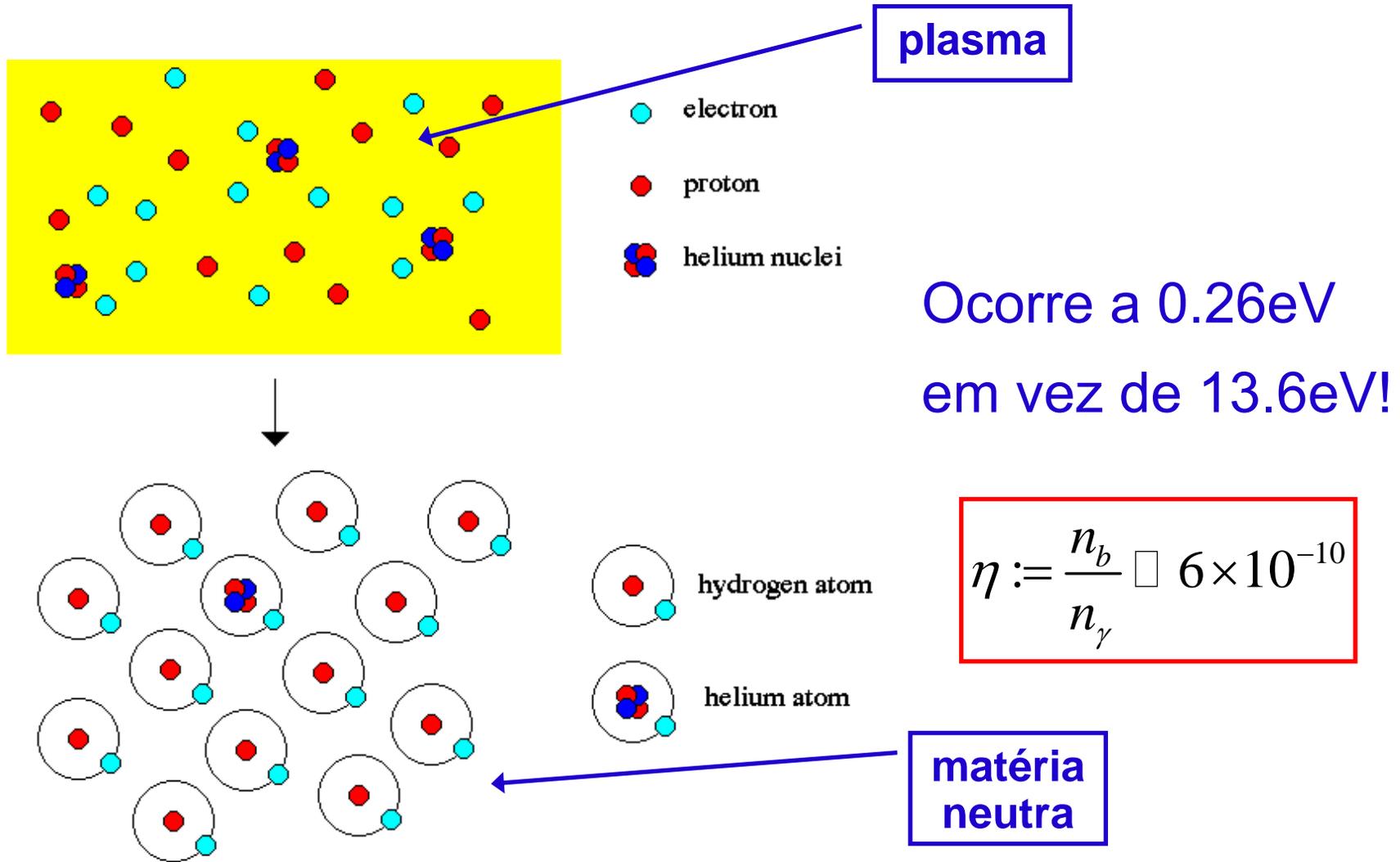
Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



Uma História do Universo

Cabum!!

Recombinação



Recombinação

Quando a temperatura cai abaixo dos 3.000K os elétrons ficam presos aos núcleos

- O Universo passa a ser transparente
- A luz se propaga livremente

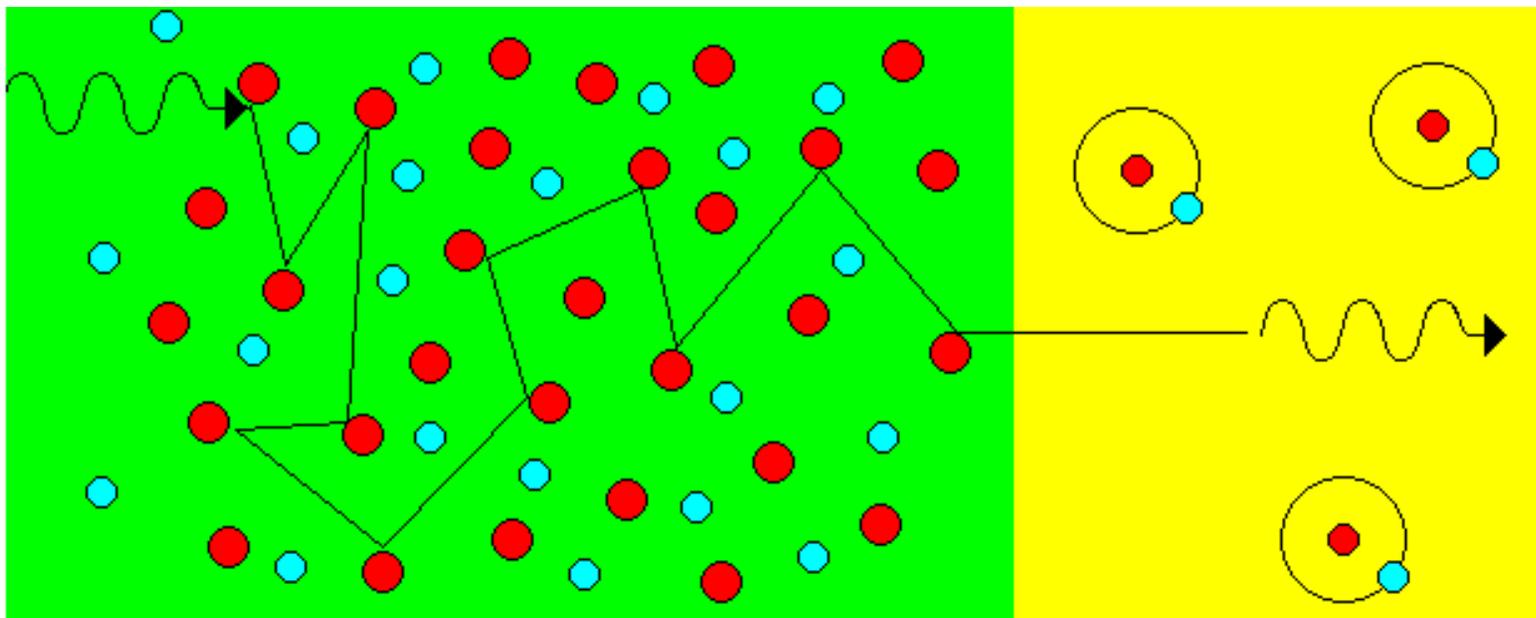


Figura retirada de <http://blueox.uoregon.edu/~karen/astro123/lectures/lec21.html>

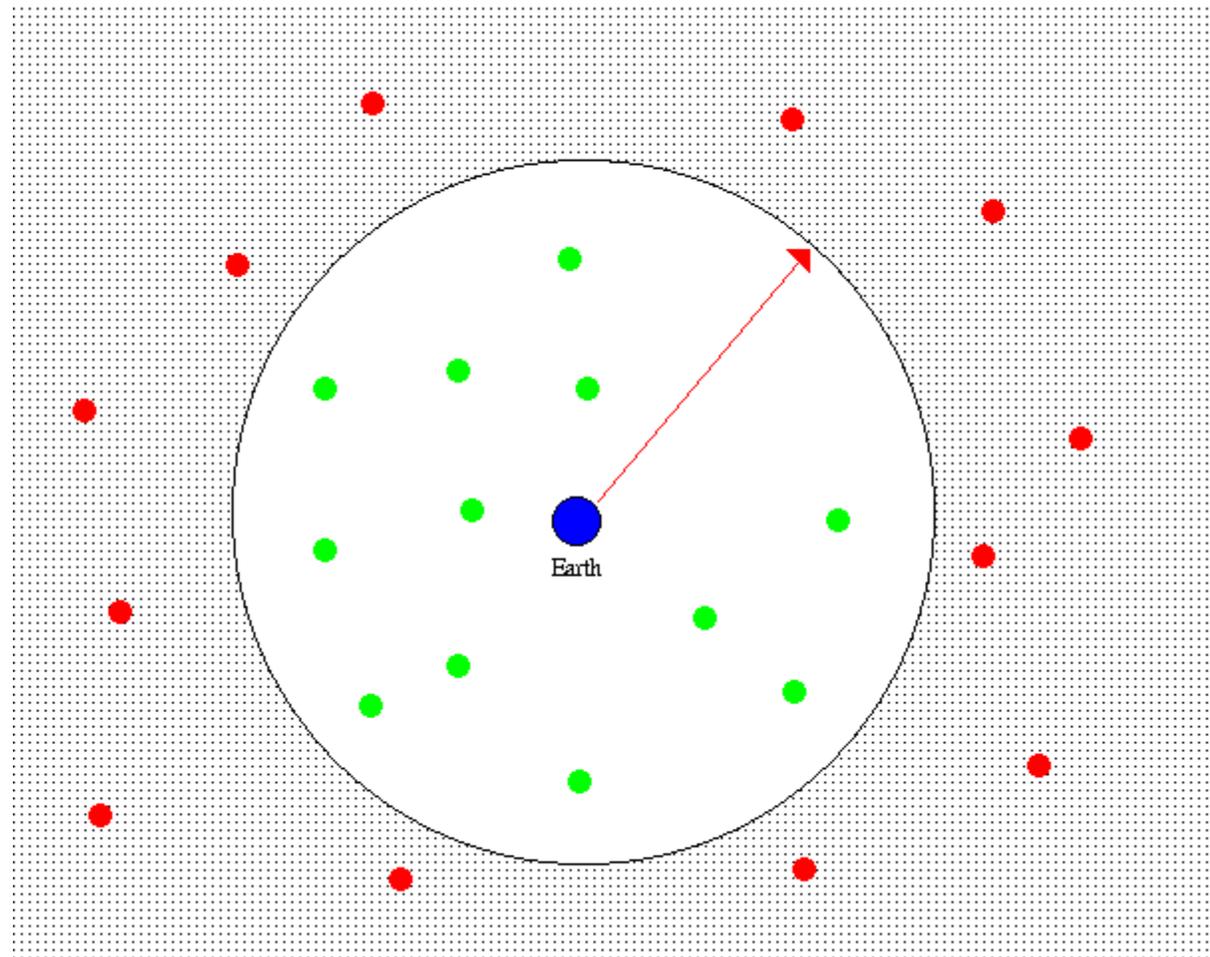
A Radiação C3smica de Fundo

“Fotosfera”
vista da nossa
gal3xia

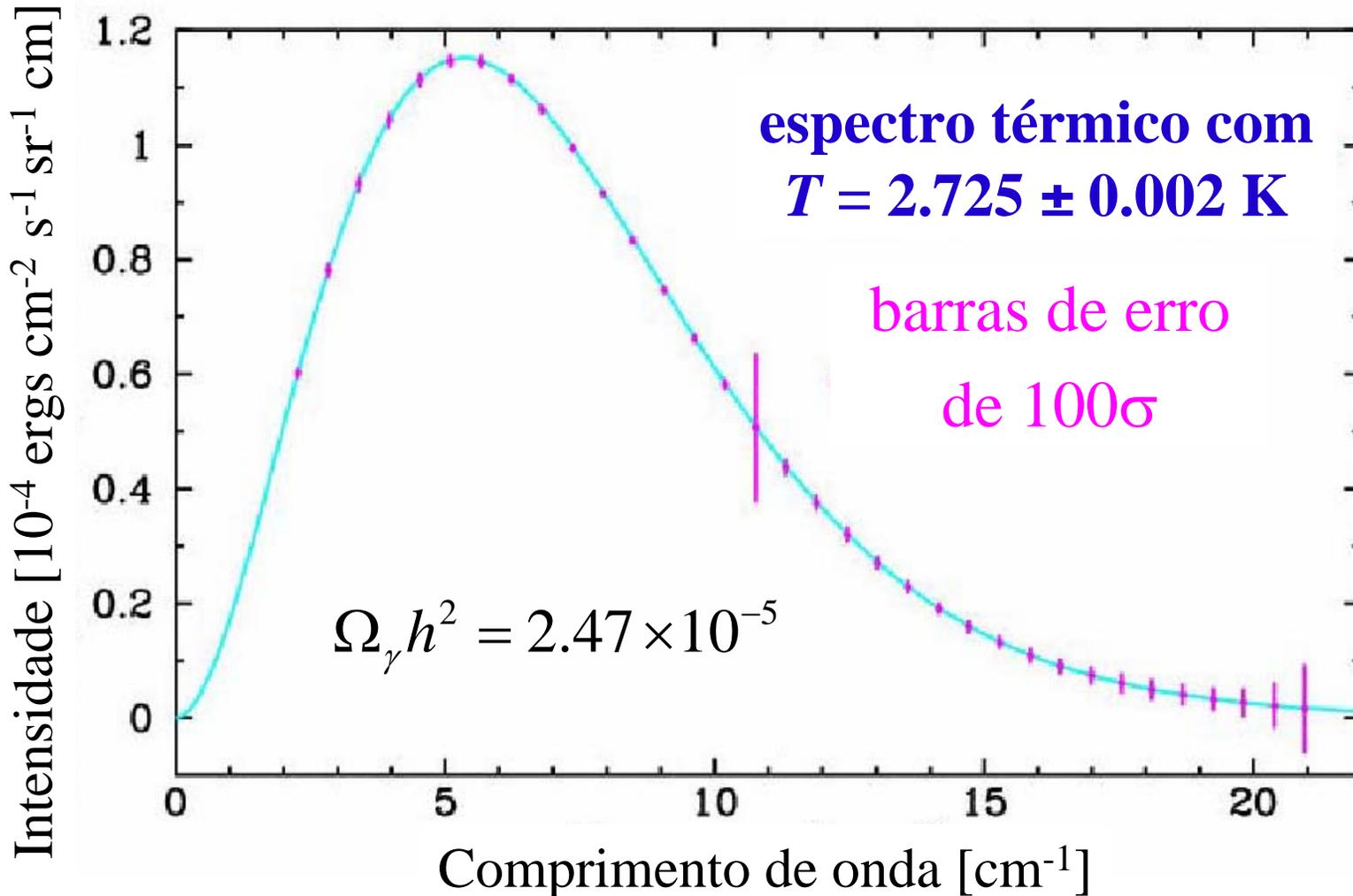
Esperamos ver:

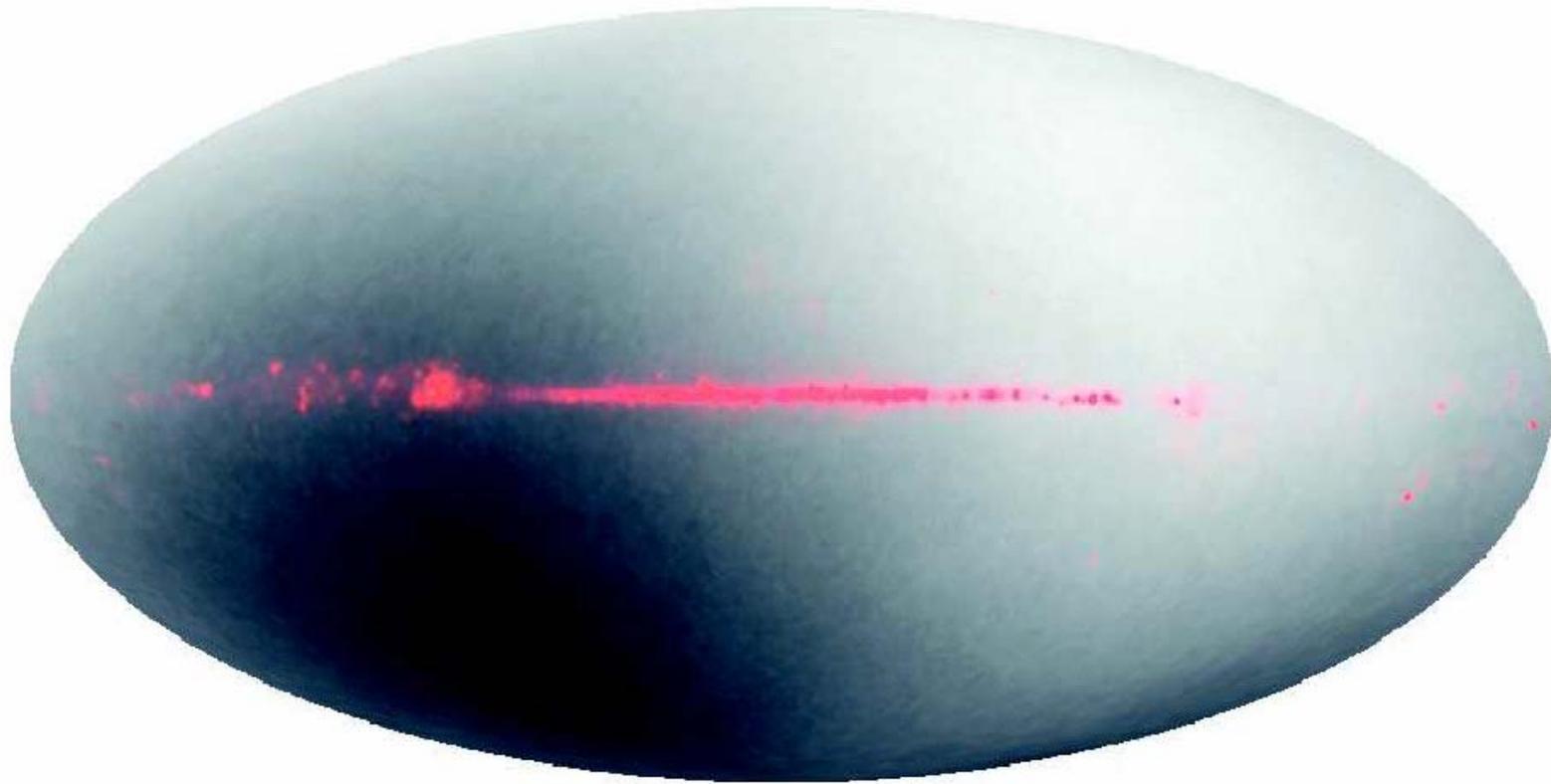
Corpo negro,
com desvio para
o vermelho

$z \sim 1000$



O Espectro da Radiação C3smica de Fundo

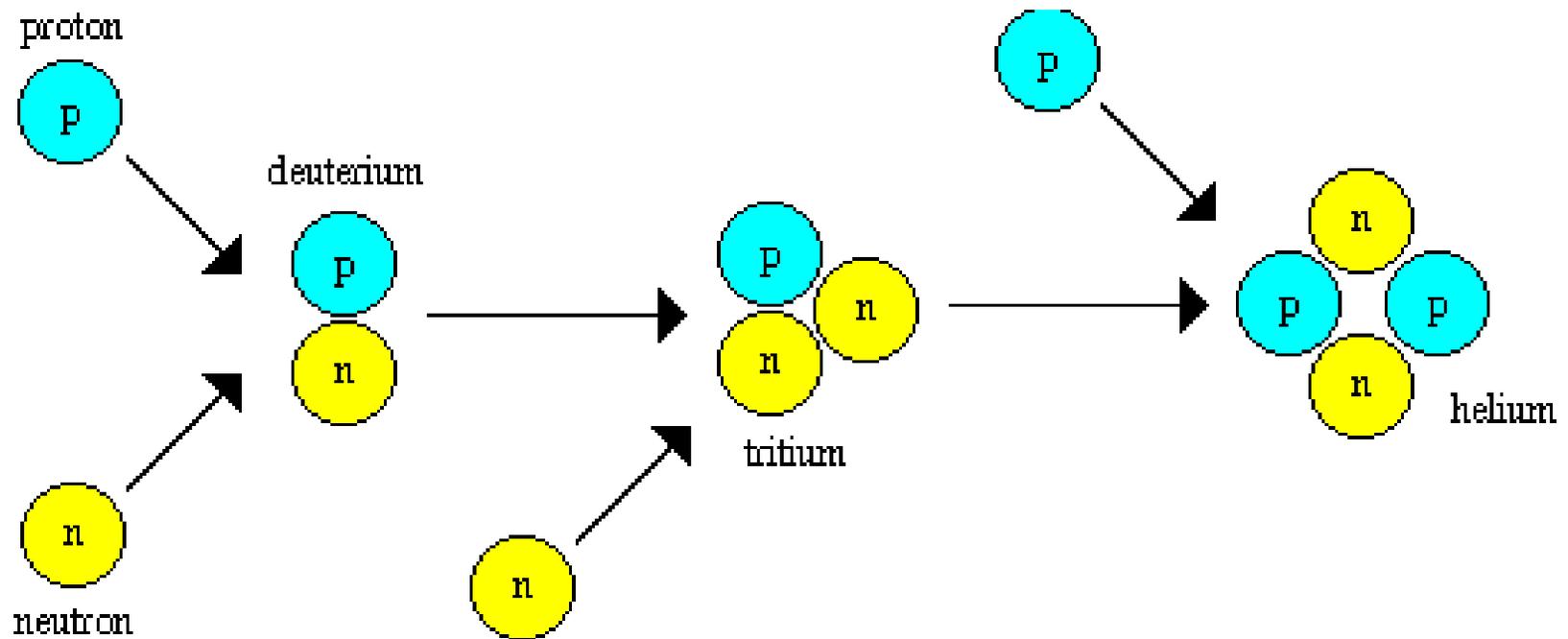




- Época do desacoplamento entre matéria e radiação (em torno de 380.000 anos após o “*Big-Bang*”).
- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$. Desvio para o vermelho, $z = 1089$.
- Universo primordial altamente homogêneo.
- Dipolo: $\Delta T = 3.346 \pm 0.017$ mK $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360$ Km/s

Nucleossíntese: Alquimia no Universo Primordial

Produção de ${}^7\text{Li}$, ${}^3\text{He}$, D, ${}^4\text{He}$



$z \sim 10^4$, 3MeV , $T \sim 10^{10}\text{ K} - 10^9\text{ K}$, 1 s a 3 min “DBB”

Produção de elementos leves

Universo dominado pela radiação:

- $H = H(T)$
- taxa de interações = $f(T)$
- depende apenas de $\eta = n_b/n_\gamma$

Universo dominado pela radiação: $a \propto t^{1/2}$

$$H = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{1}{2t}$$

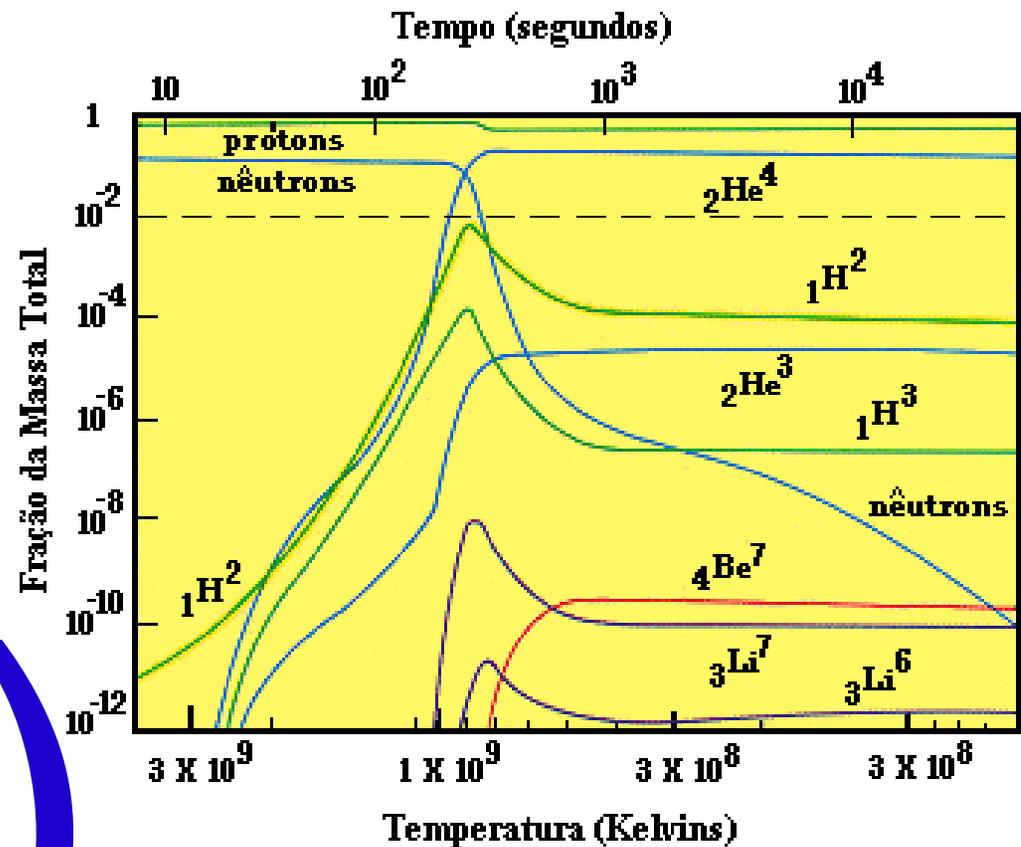
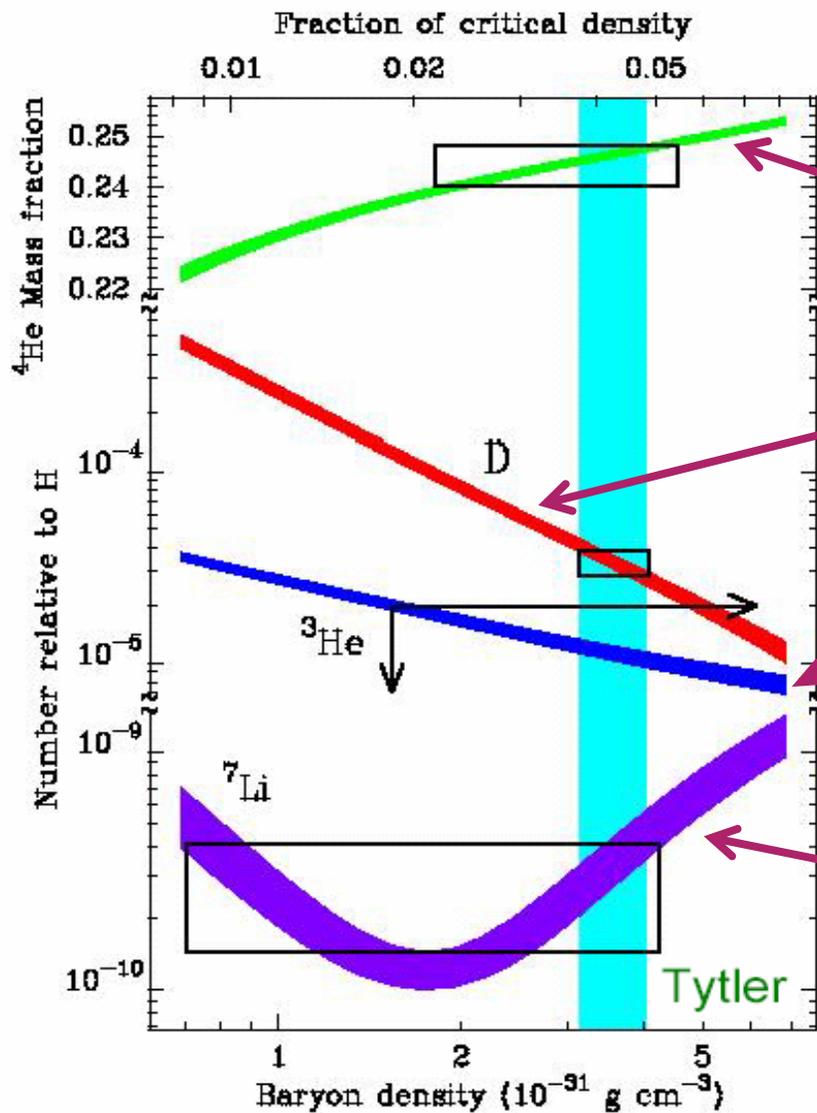


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva
Astronomia e Astrofísica, <http://astro.if.ufrgs.br/>

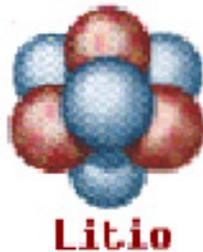
Abundância de Elementos Leves



Produção de ${}^7\text{Li}$, ${}^3\text{He}$, D, ${}^4\text{He}$
Todos com o mesmo η !



D é o melhor “bariômetro”



→ $\Omega_b \approx 0,04$

Independente da
matéria escura

Assimetria Matéria/Anti-Matéria

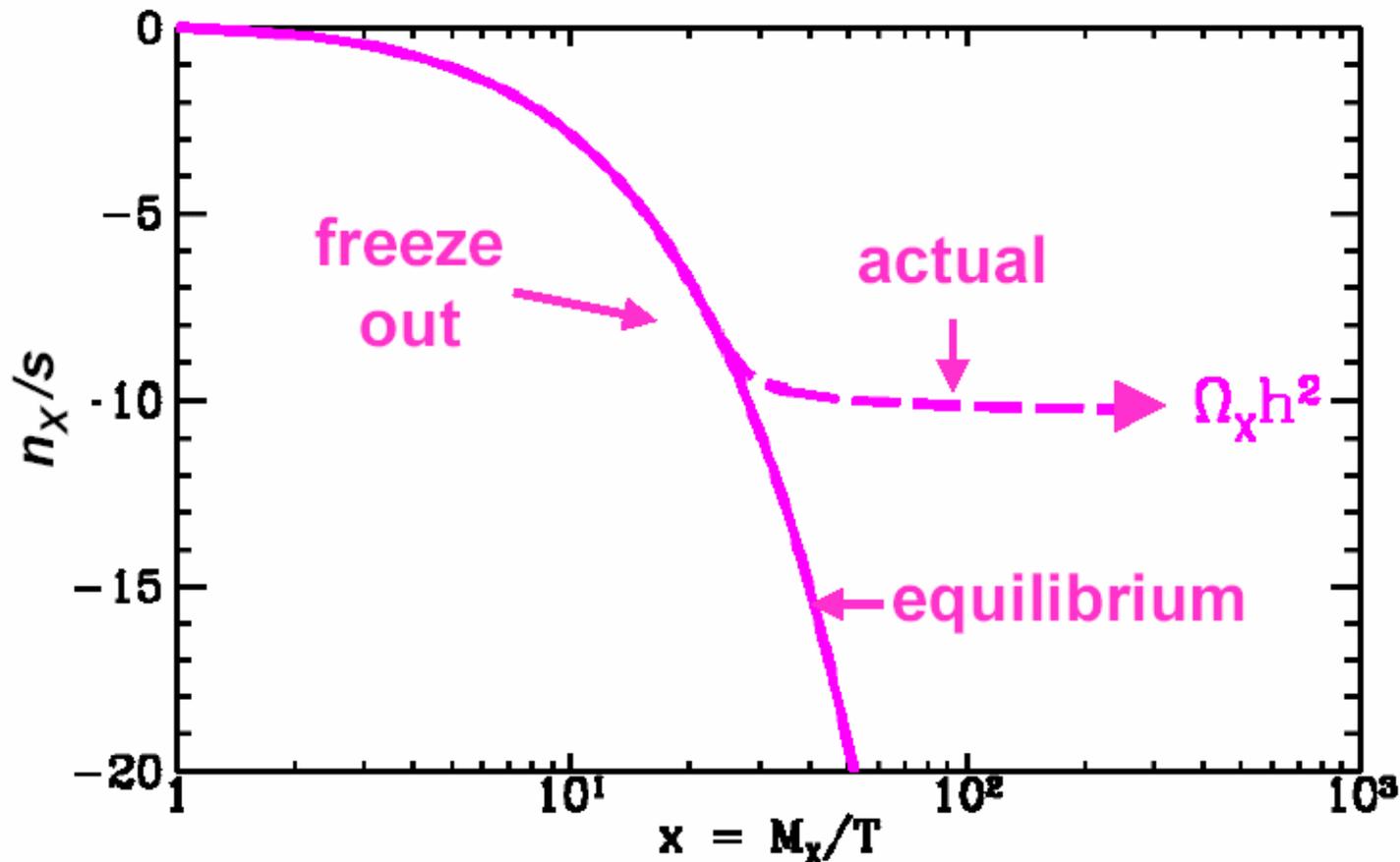
- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (**eqüipartição**)
- $T \sim 175 \text{ MeV}$ ($t \sim 10^{-5} \text{ s}$ “DBB”):
Meio quark-glúon \Rightarrow Hadronização
- Aniquilação \Rightarrow Universo dominado por píons
- Aniquilação produz fótons:

$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n} = 6 \times 10^{-10}$$

- Assimetria de 1 parte em 10^9 !

Relíquias Térmicas Frias e Matéria Escura

$\Gamma \ll H^{-1} \rightarrow$ desacoplamento



$$\Omega_X \propto \sigma_A^{-1} \text{ (independente da massa)}$$

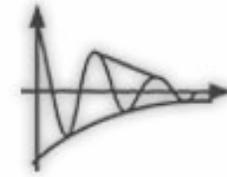
Alguns Marcos da História do Universo

| kT (radiação) | Evento |
|-----------------------|--|
| 2×10^{-4} eV | Hoje |
| 10^{-3} eV | Formação das Galáxias |
| 1 eV | Recombinação do H (desacoplamento matéria-radiação) |
| 10 eV | Dominação pela matéria |
| 300 keV | Formação dos elementos leves (He^4 , He^3 , D e Li) (nucleossíntese) |
| 0.5 MeV | Fim da era leptônica (aniquilação $e^+ e^-$) |
| 100 MeV | Fim da era hadrônica e início da era leptônica (hadronização, aniquilação hádron anti-hádron) |
| 1000 GeV | Transição de fase eletrofraca |
| 10^{15} GeV | Bariossíntese? Grande Unificação? |
| 10^{19} GeV | Fim da era quântica? Inflação? |



VI Escola do CBPF

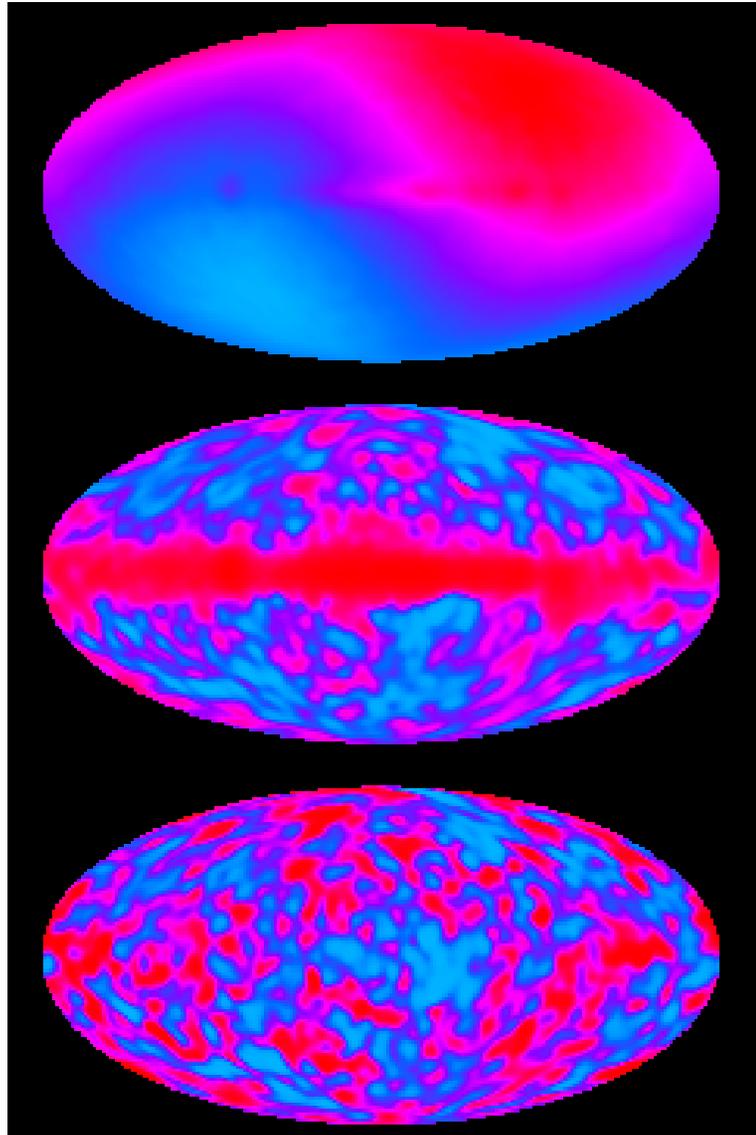
Rio de Janeiro, 17 a 28 de julho de 2006



Parte IV

O Universo Perturbado

A radiação cósmica de fundo



- Desacoplamento matéria-radiação, $z = 1089$.
- Universo primordial altamente homogêneo.
- Resultados obtidos pelo COBE:

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5} \rightarrow \frac{\Delta \rho}{\rho} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$$

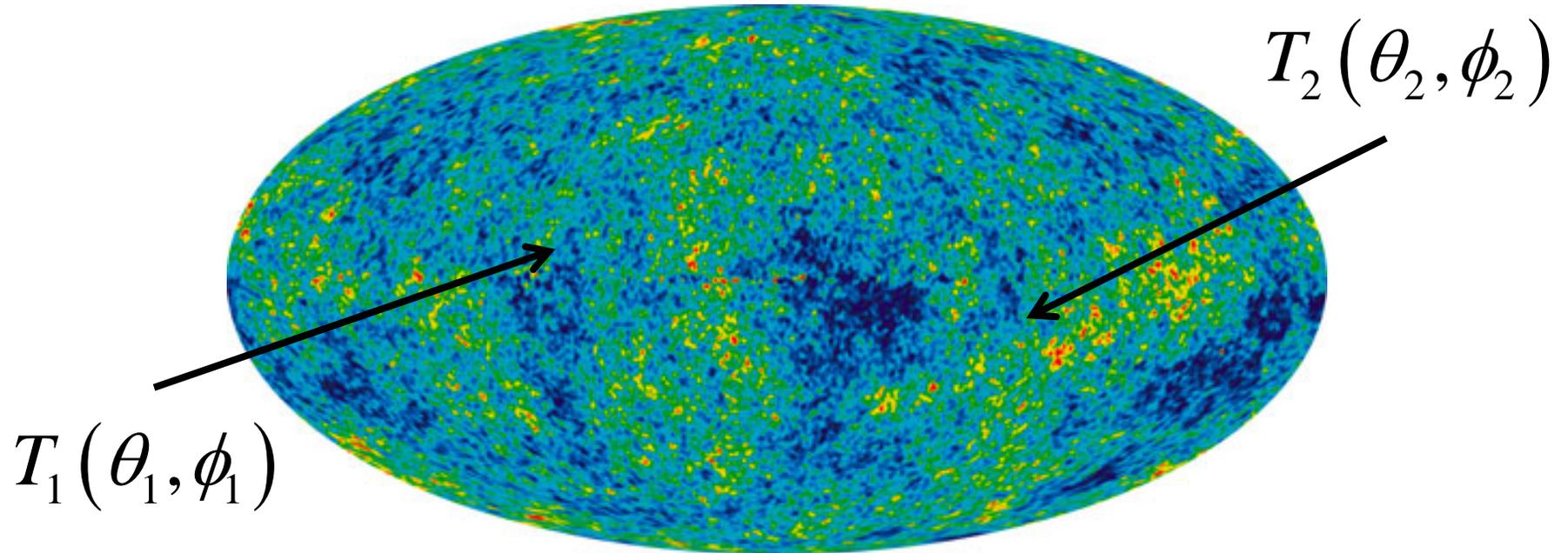
→ Flutuações lineares



Perturbações Lineares

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

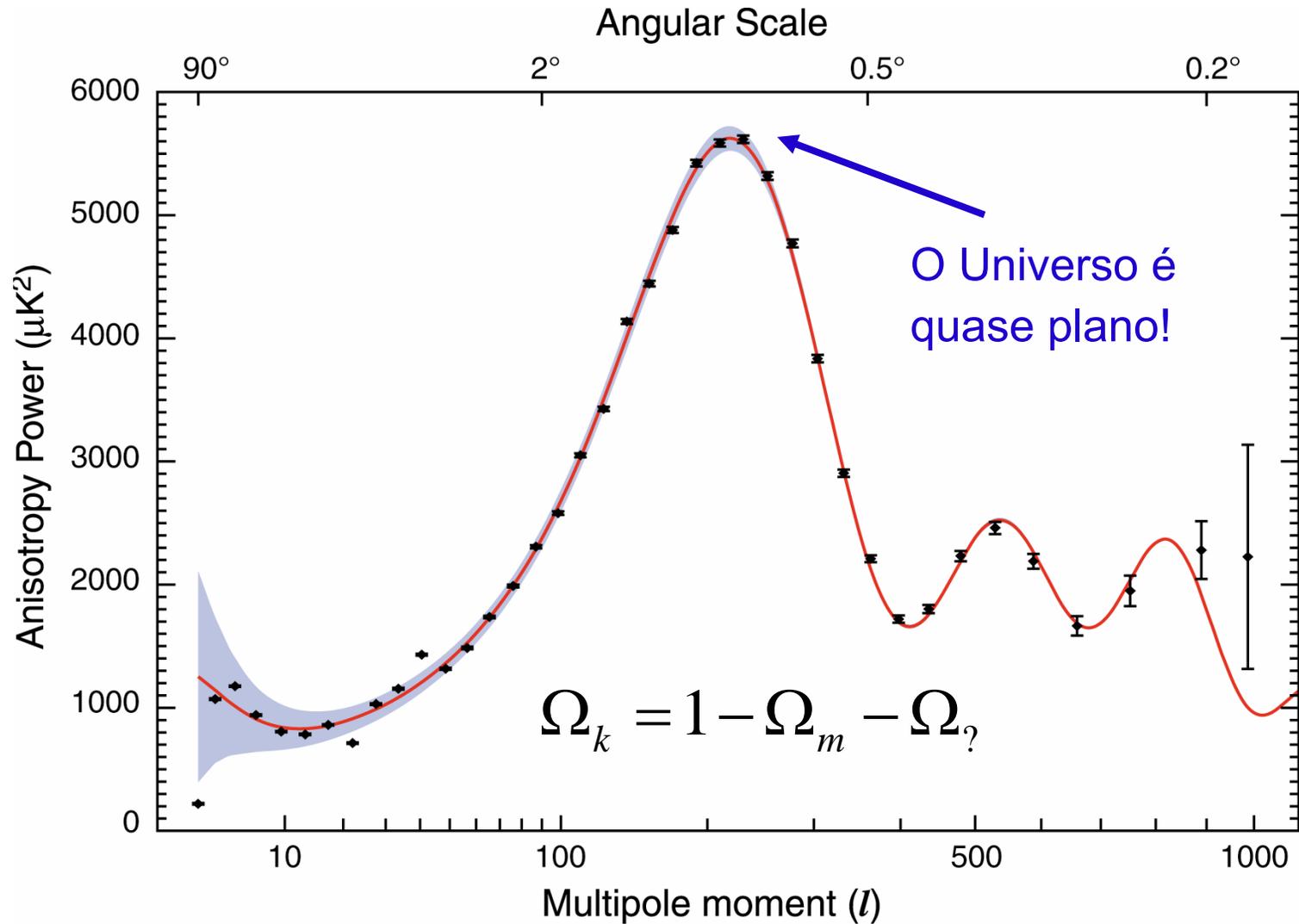
Espectro de Potência da Radiação Cósmica de Fundo



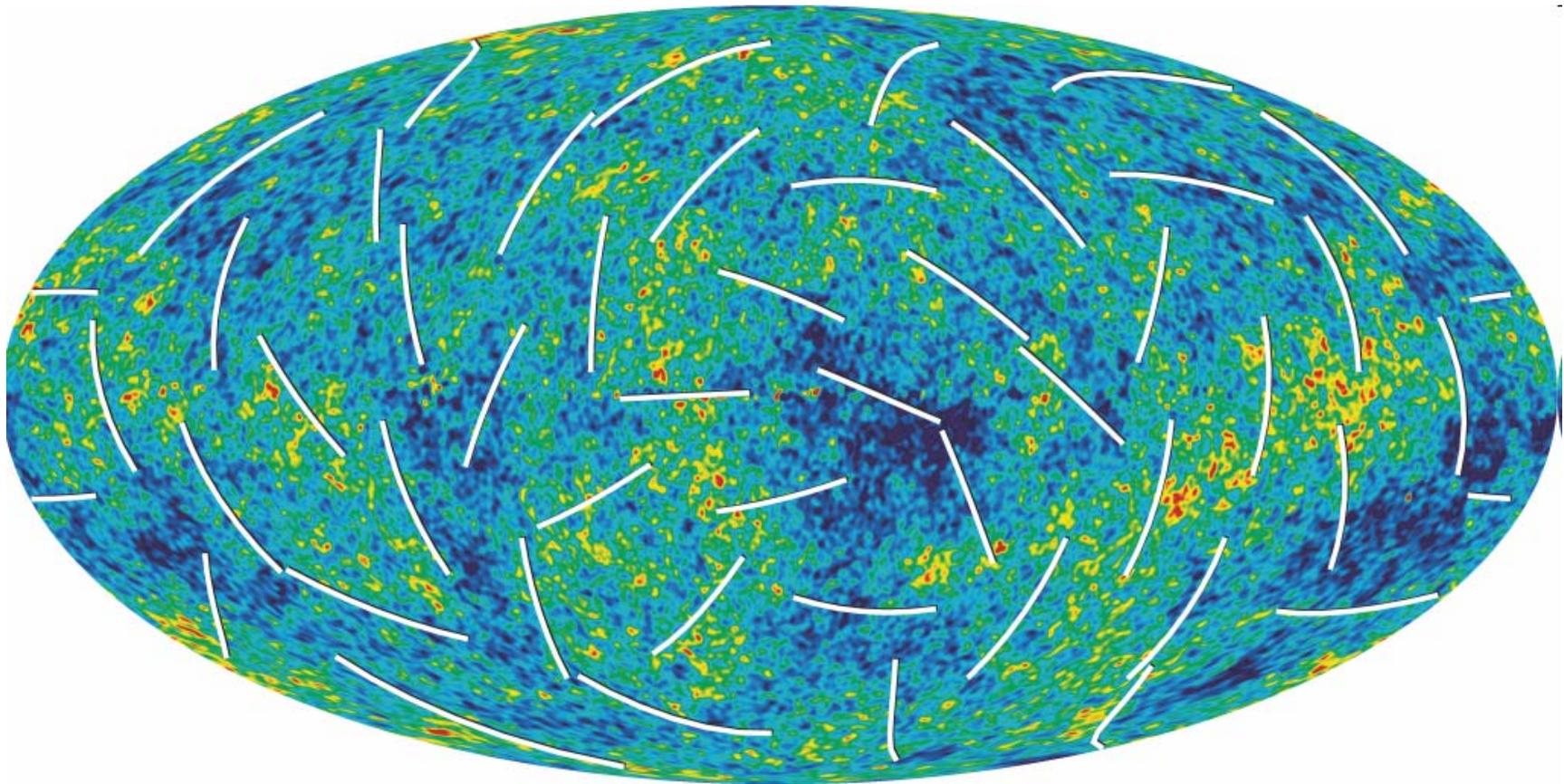
$$\langle T_1 T_2 \rangle = \sum a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

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

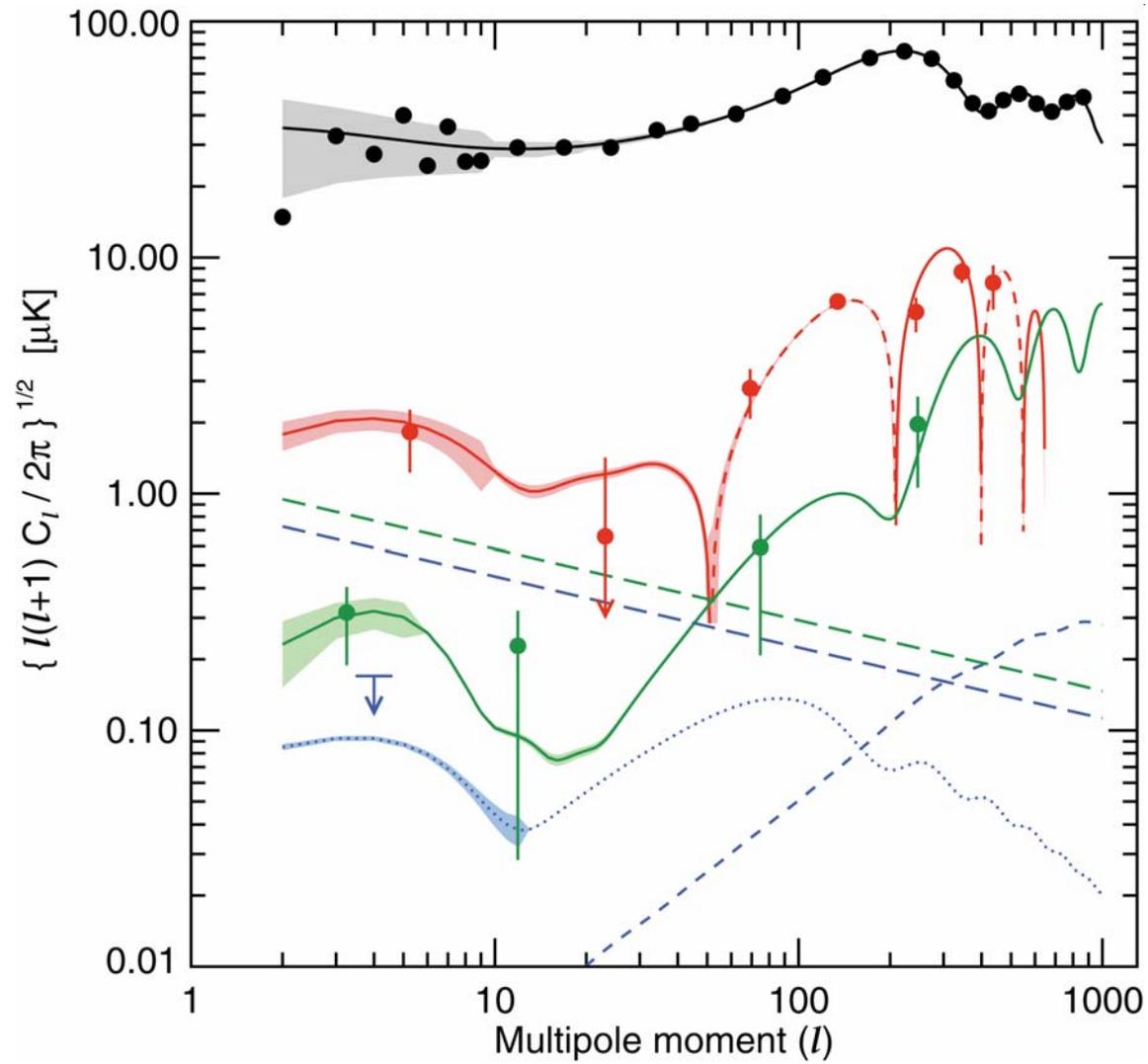
Espectro de Potência Segundo o WMAP3



Polarização da RCF



Espectro da Polarização



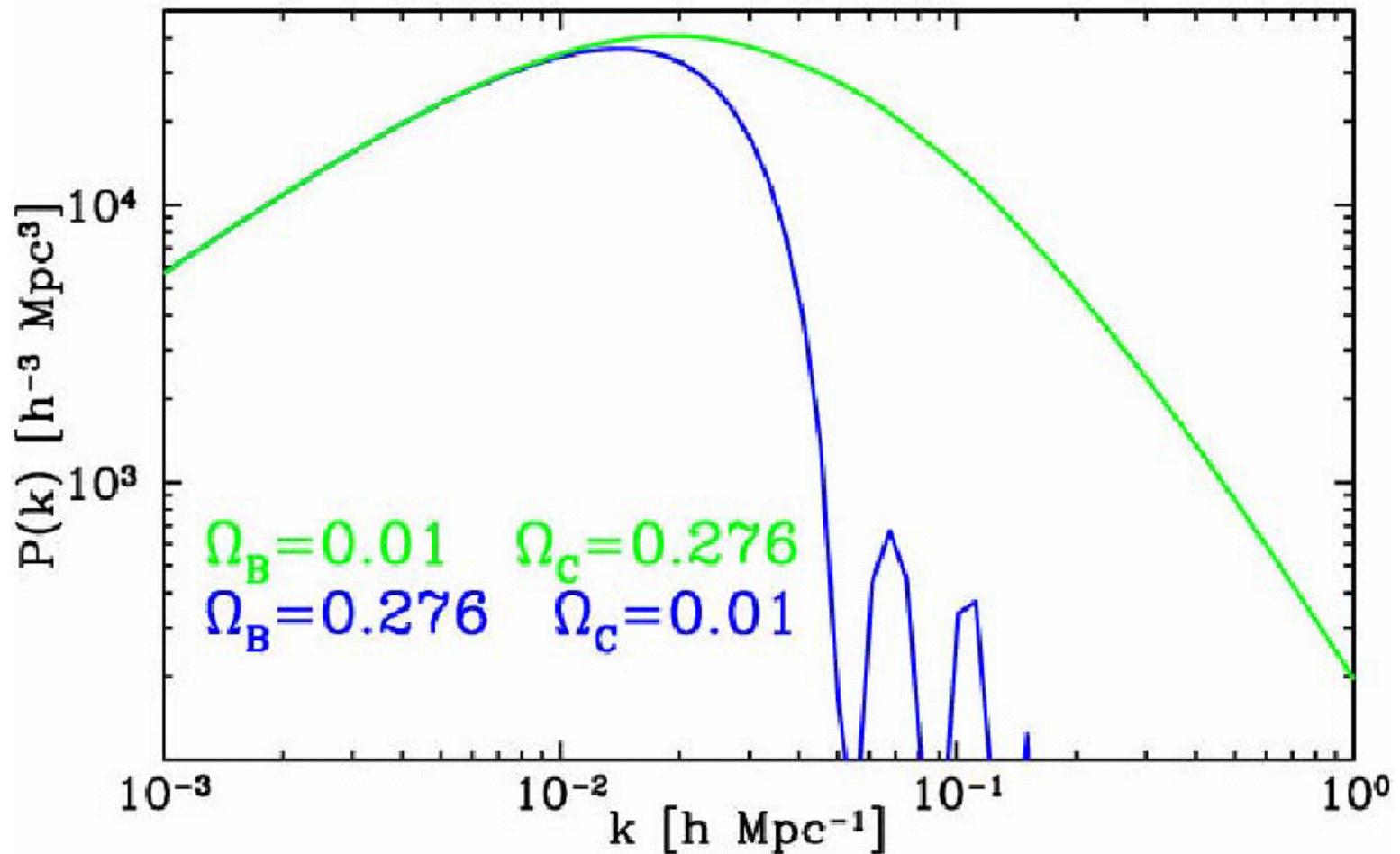
Resultados da análise linear

Necessidade de Matéria Escura

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

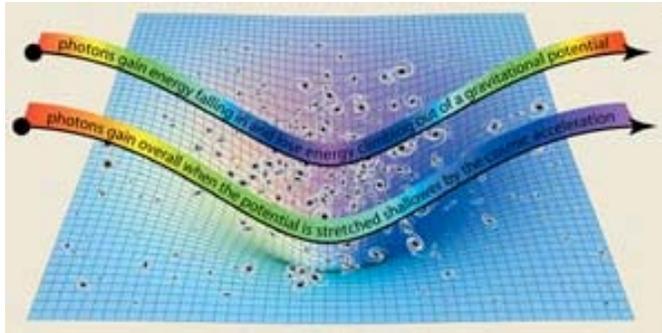
Resultados da análise linear

Necessidade de Matéria Escura



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, EdS: $\phi = const.$
- Efeito tardio:
 - Correlação entre radiação cósmica de fundo e estrutura em grande escala!



Energia escura

Estatística: Função de Correlação

- **Contraste de densidade:**

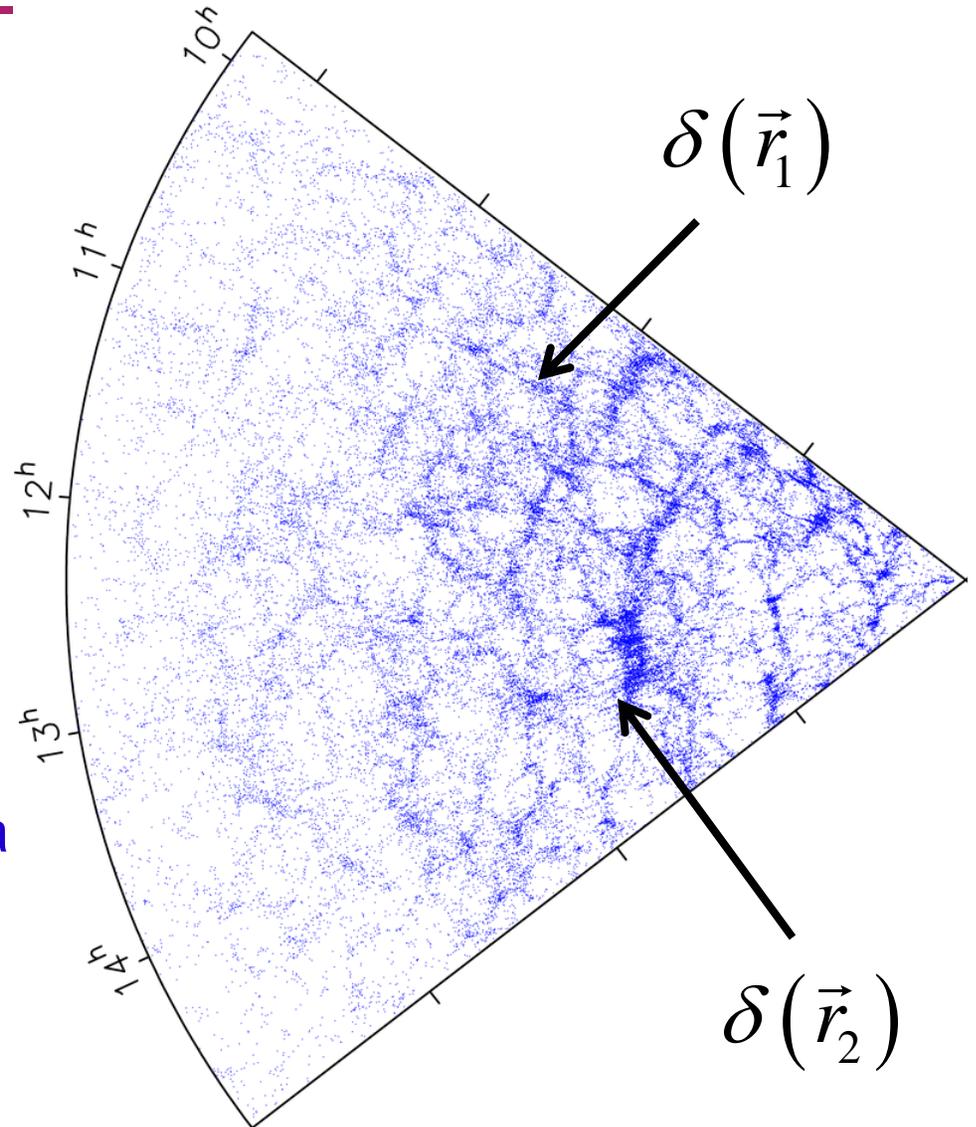
$$\delta_{obs}(\vec{r}) = \frac{n(\vec{r}) - \bar{n}(\vec{r})}{\bar{n}(\vec{r})}$$

- **Função de correlação:**

$$\xi(\vec{r}_{12}) = \langle \delta(\vec{r}_1) \delta(\vec{r}_2) \rangle$$

Sobredensidade de pontos próximo de uma partícula aleatória

- **Espectro de potência:**
transformada de Fourier



Espectro de Potência:

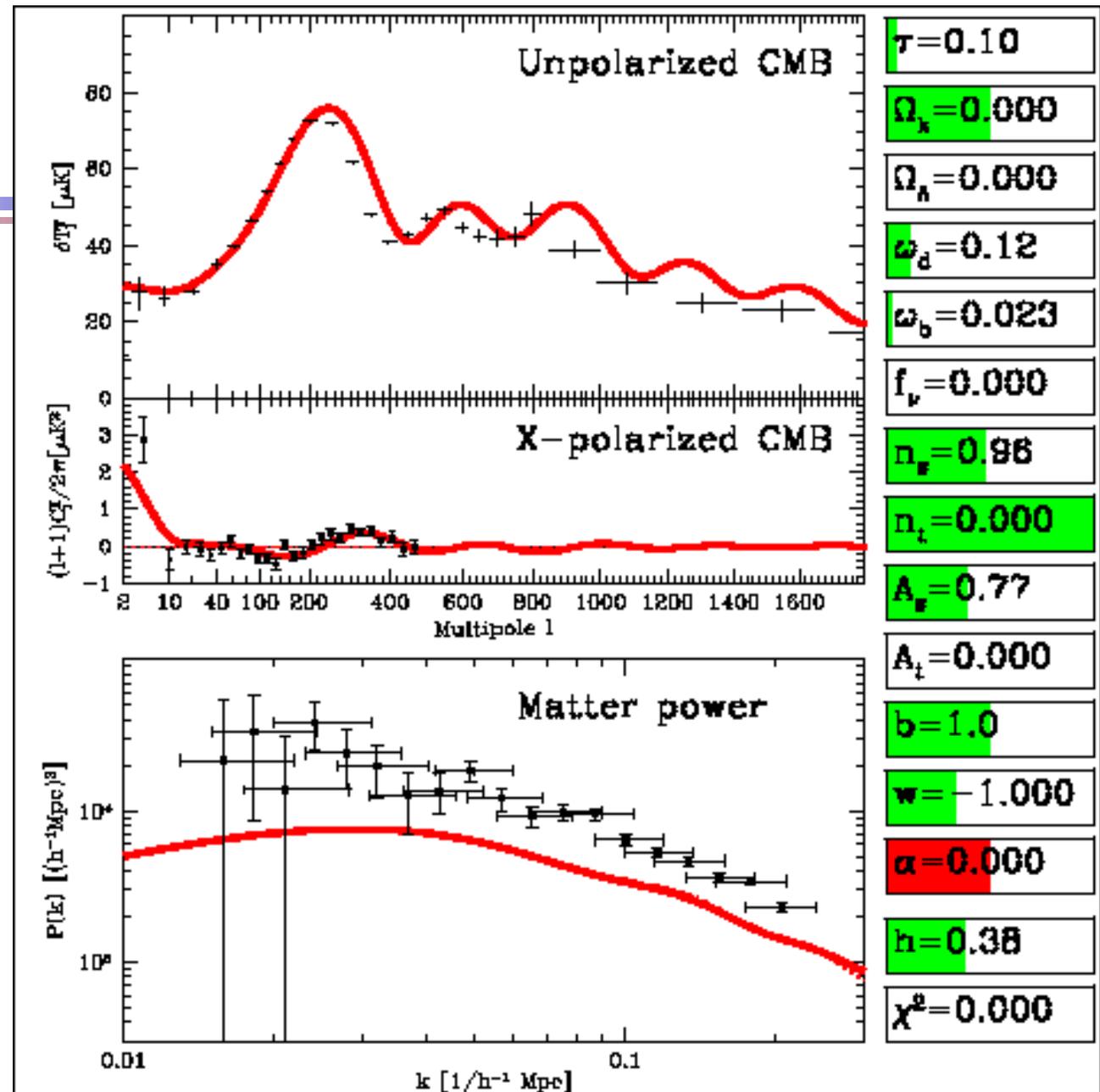
Energia Escura

Forma das flutuações primordiais

Matéria escura

Massa dos neutrinos

Quantidade de bárions



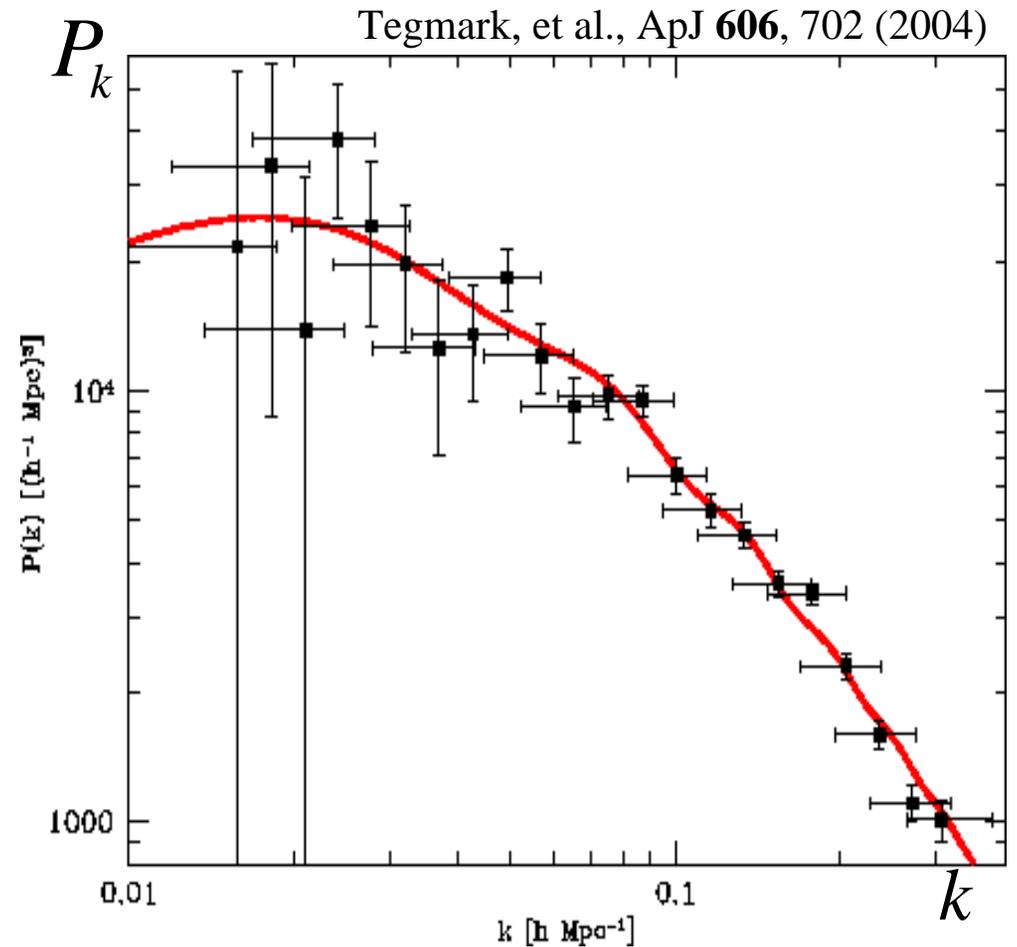
Dados e Teoria

Espectro de Potência:

- q Forma das flutuações primordiais
- q Matéria escura
- q Massa dos neutrinos
- q Quantidade de bárions

Exemplo (do SDSS):

$$\Omega_m = 0.30 \pm 0.03$$



205.443 galáxias do SDSS

Flutuações em Todas as Escalas

