

CURSO DE COSMOLOGIA

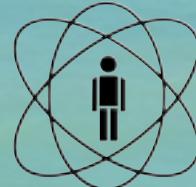
2013B

PARTE I

AULA 5

MARTÍN MAKLER
CBPF

ICRA



CBPF

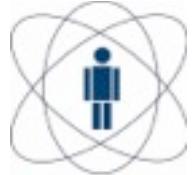
MCTI





Parte Ic

O Universo Homogêneo II: Breve História Térmica do Universo



Equação de estado e temperatura

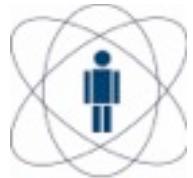
- Se $kT \gg mc^2$:
relativístico $\Rightarrow p \approx \rho/3$
- Se $kT \ll mc^2$:
não relativístico $\Rightarrow p \ll \rho$



Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

$$\rho = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) E(p) d^3 p$$

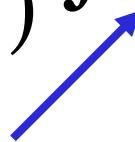


Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

$$\rho = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) E(p) d^3 p$$

função de distribuição
("probabilidade")





Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

$$\rho = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) E(p) d^3 p$$

função de distribuição
("probabilidade")

Energia



Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

$$\rho = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) E(p) d^3 p$$

função de distribuição
("probabilidade")

Energia

Equilíbrio



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

Equilíbrio



Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

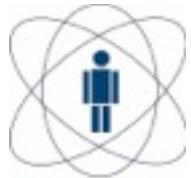
$$\rho = \frac{g}{(2\pi)^3} \int f(p) E(p) d^3 p = \frac{g}{(2\pi)^3} \int \frac{1}{e^{\sqrt{m^2 + p^2}/T} \pm 1} \sqrt{m^2 + p^2} d^3 p$$

função de distribuição
("probabilidade")

Energia

Fermi-Dirac
Bose-Einstein

Equilíbrio



Pressão e Densidade

- Densidade de Energia:

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

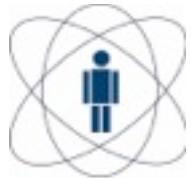
função de distribuição
("probabilidade")

Energia

Fermi-Dirac
Bose-Einstein

Energia

Equilíbrio



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")

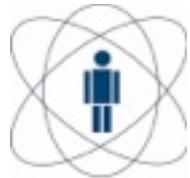
Energia

Fermi-Dirac
Bose-Einstein

Energia

- Pressão:

Equilíbrio



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

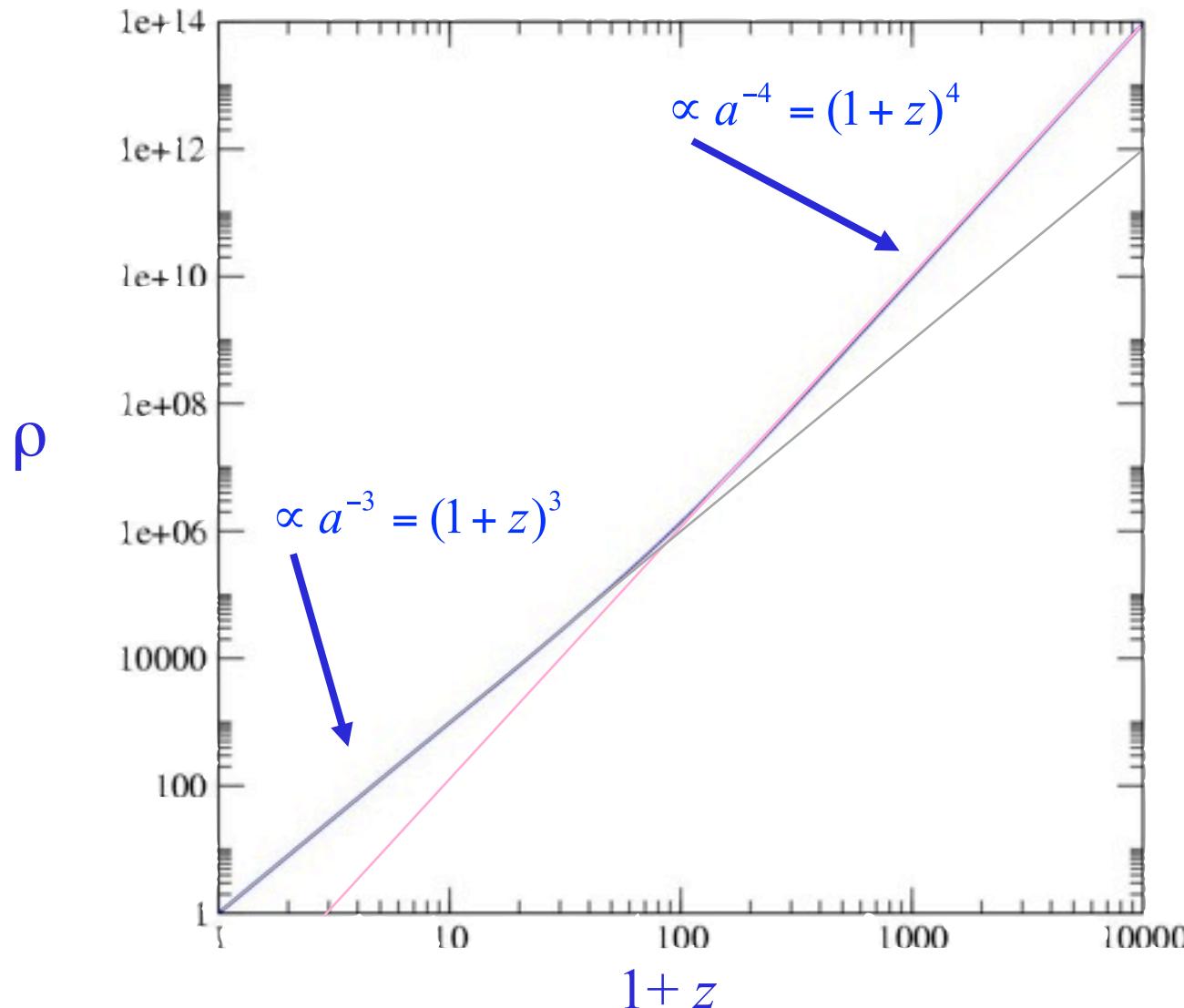
Energia

- 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

Densidade de energia e expansão do Universo: partículas com massa



Observação:
Exemplo ao
lado para
neutrinos



Uma História do Universo

Cabum!!



Uma História do Universo

Cabum!!

“O que se desatou num só momento
não cabe no infinito, e é fuga e vento”
[Instante, Carlos Drummond de Andrade]

Recombinação

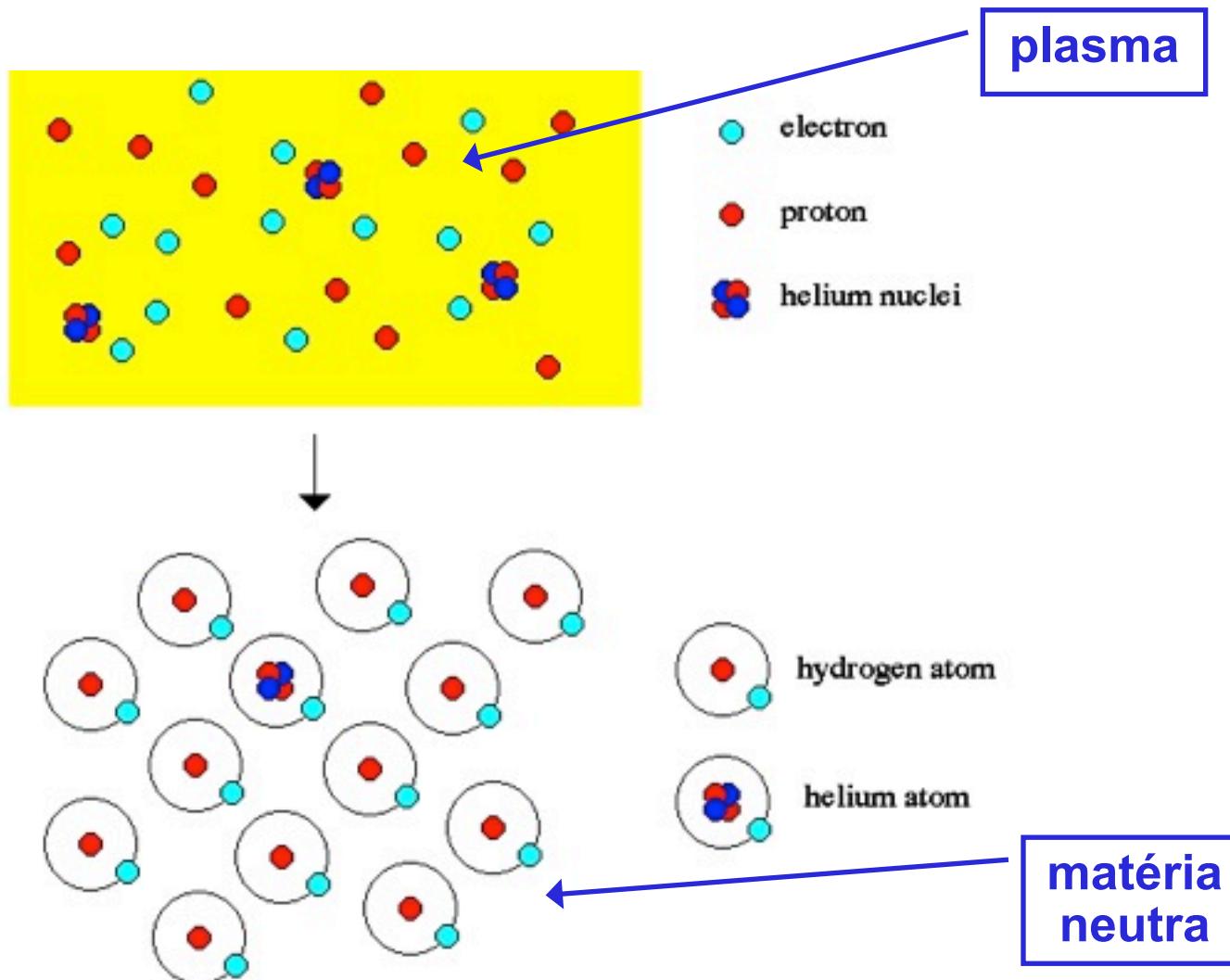


Figura retirada de <http://blueox.uoregon.edu/~karen/astro123/lectures/lec20.html>

Recombinação

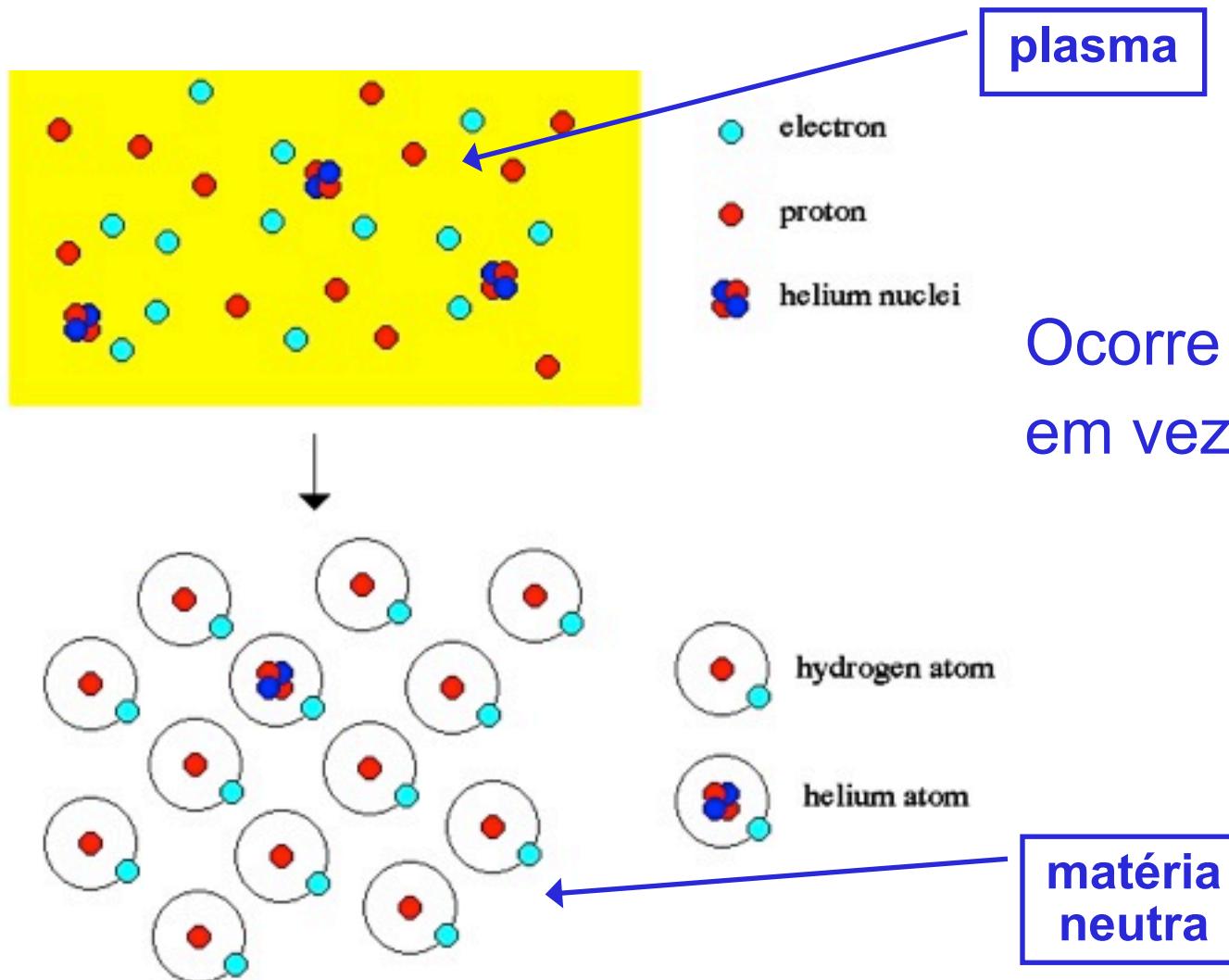
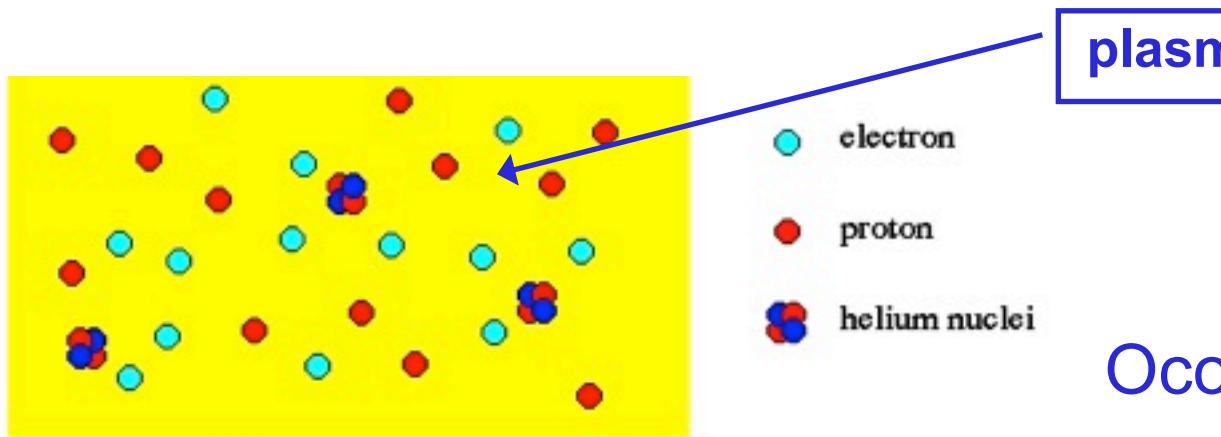
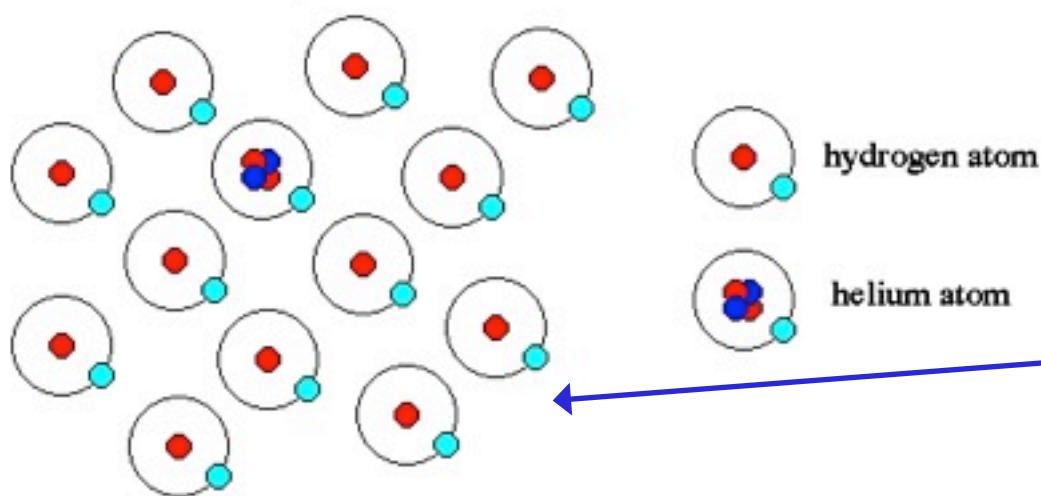


Figura retirada de <http://blueox.uoregon.edu/~karen/astro123/lectures/lec20.html>

Recombinação



Ocorre a 0.26eV
em vez de 13.6eV!



$$\eta := \frac{n_b}{n_\gamma} \simeq 6 \times 10^{-10}$$

matéria
neutra

Figura retirada de <http://blueox.uoregon.edu/~karen/astro123/lectures/lec20.html>



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



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

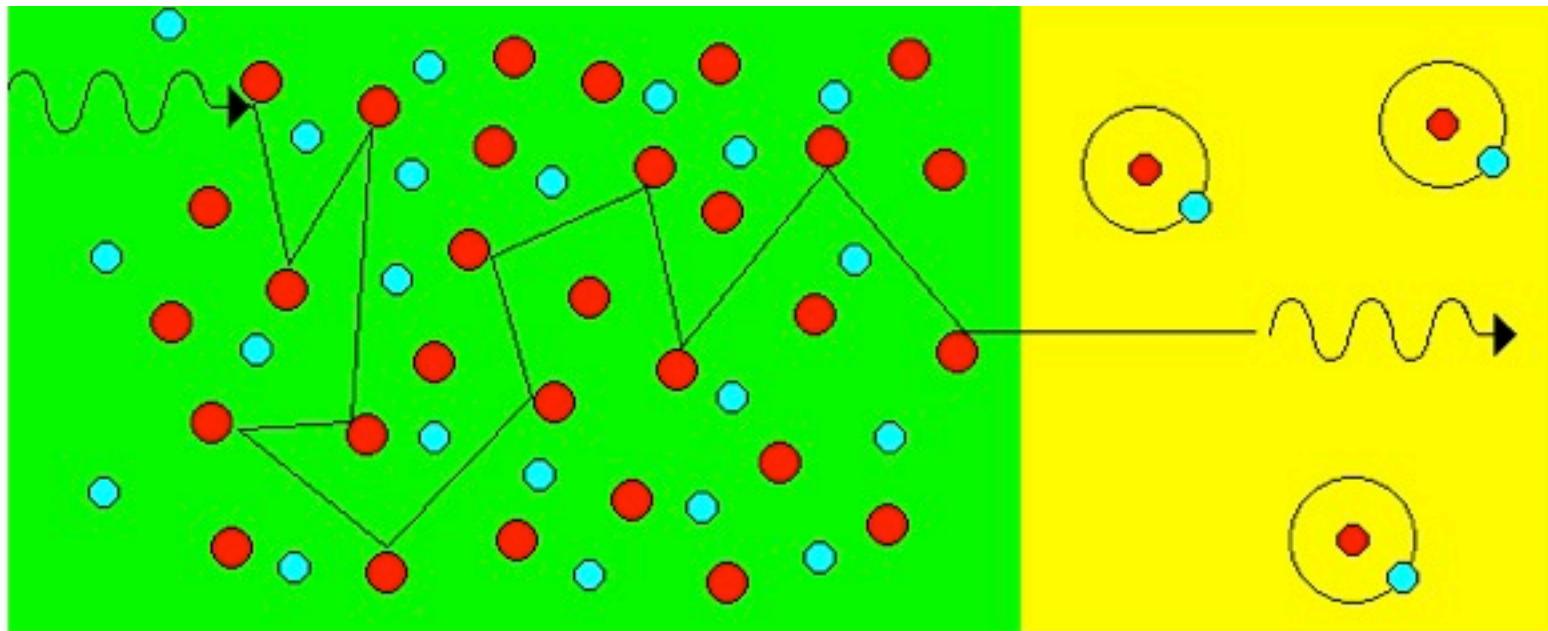
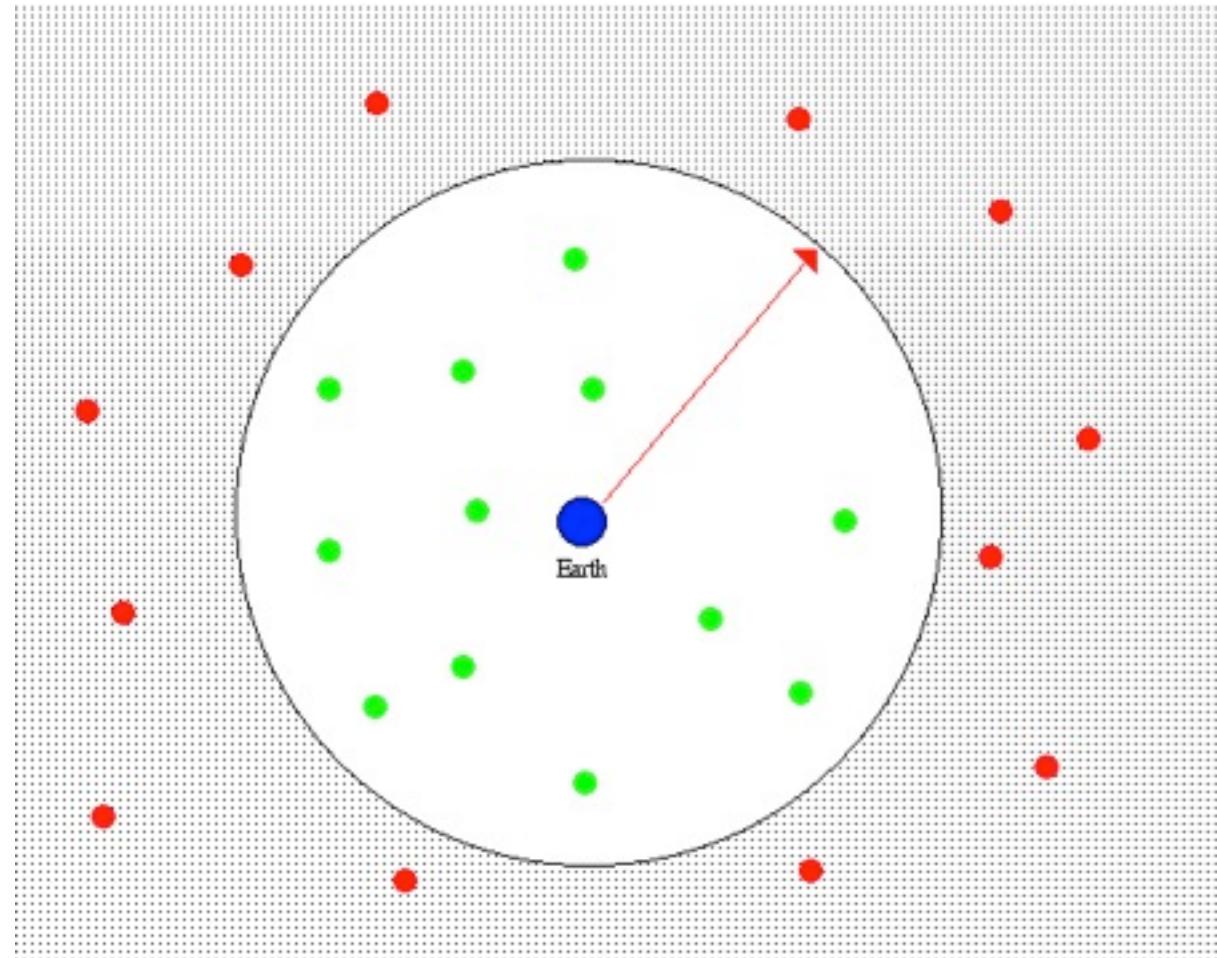


Figura retirada de <http://blueox.uoregon.edu/~karen/astro123/lectures/lec21.html>



A Radiação Cósmica de Fundo

“Fotosfera”
vista da nossa
galáxia

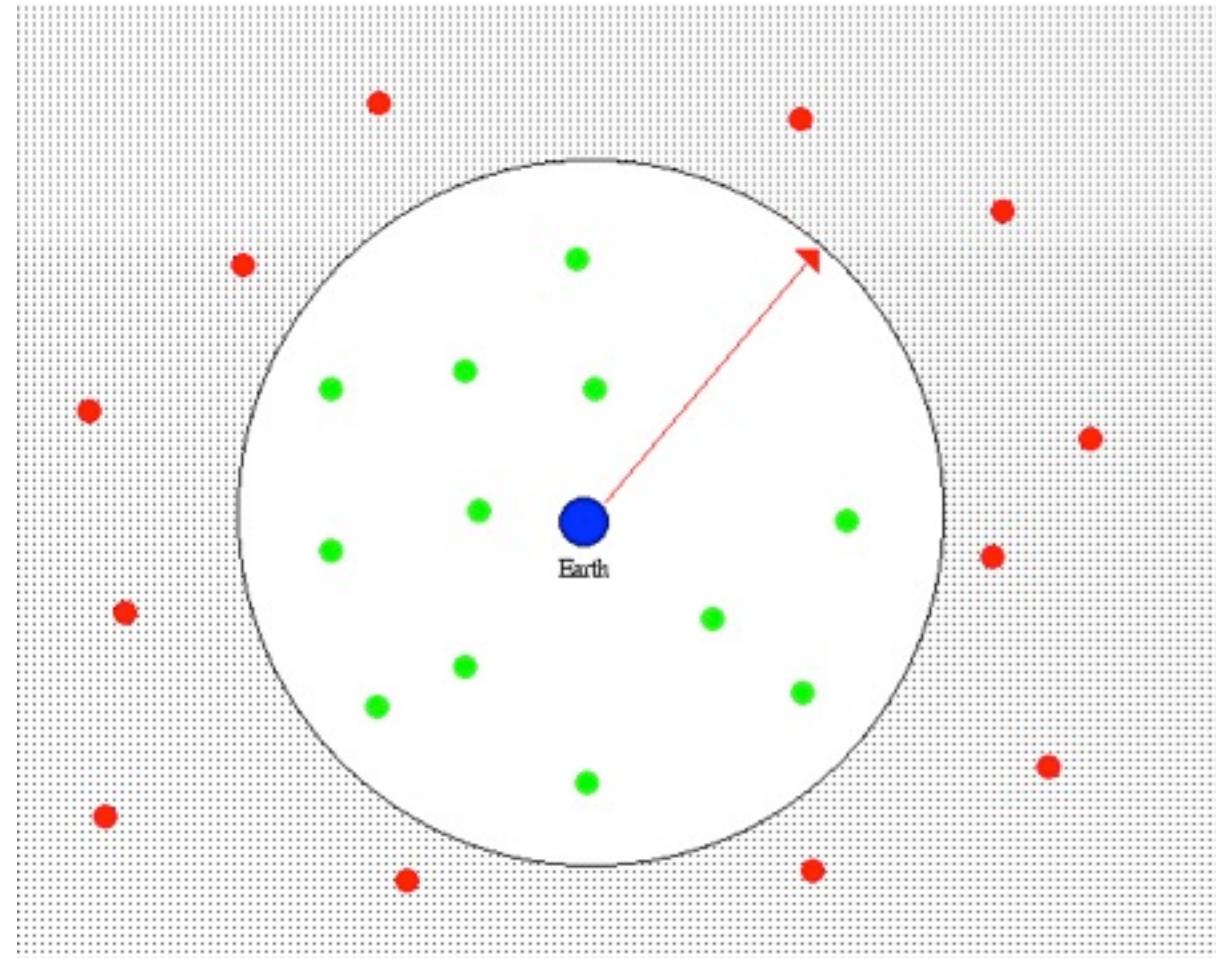




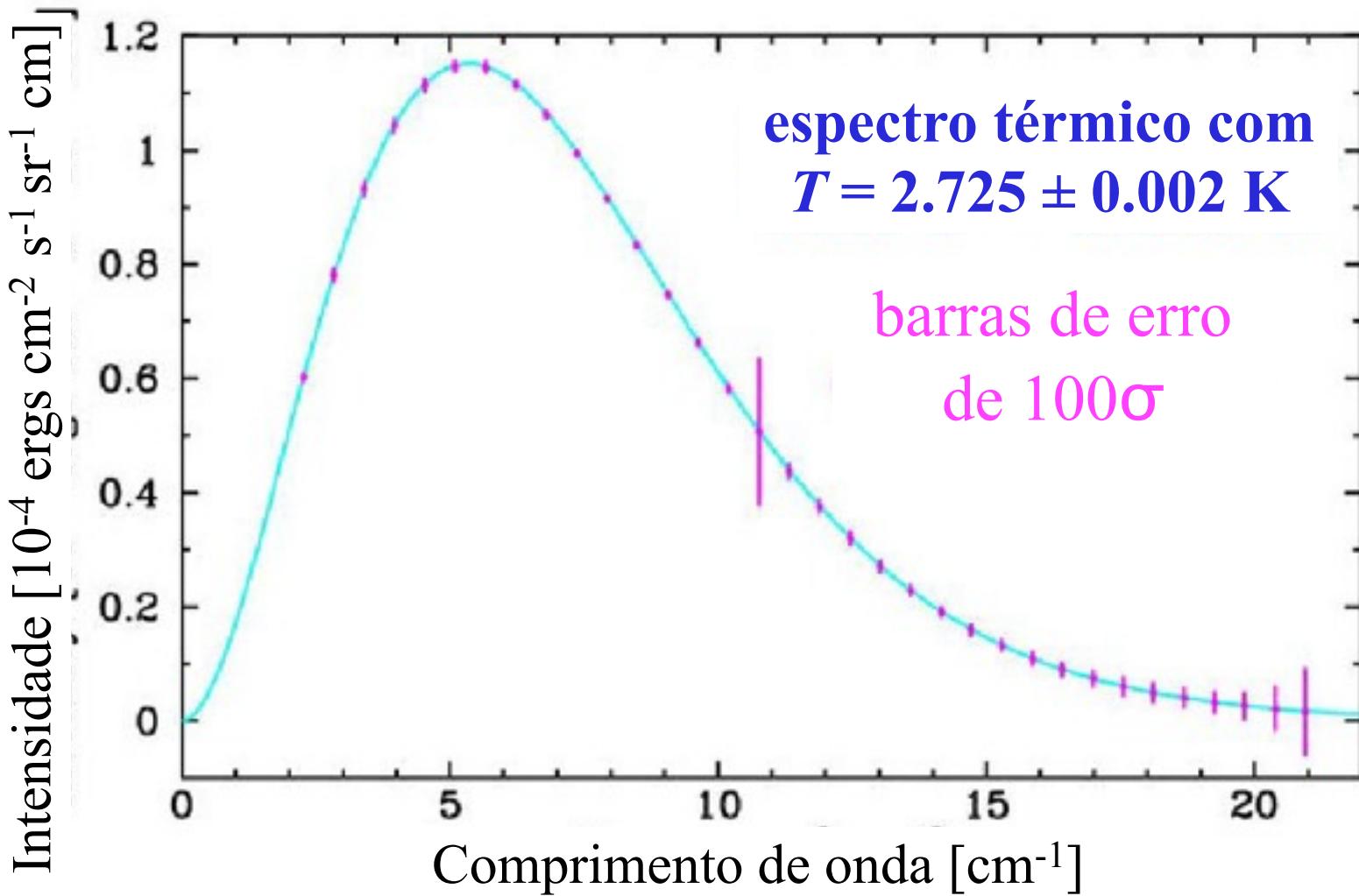
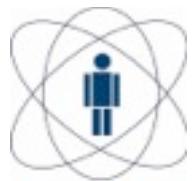
A Radiação Cósmica de Fundo

“Fotosfera”
vista da nossa
galáxia

Esperamos ver:
Corpo negro,
com desvio para
o vermelho
 $z \sim 1000$

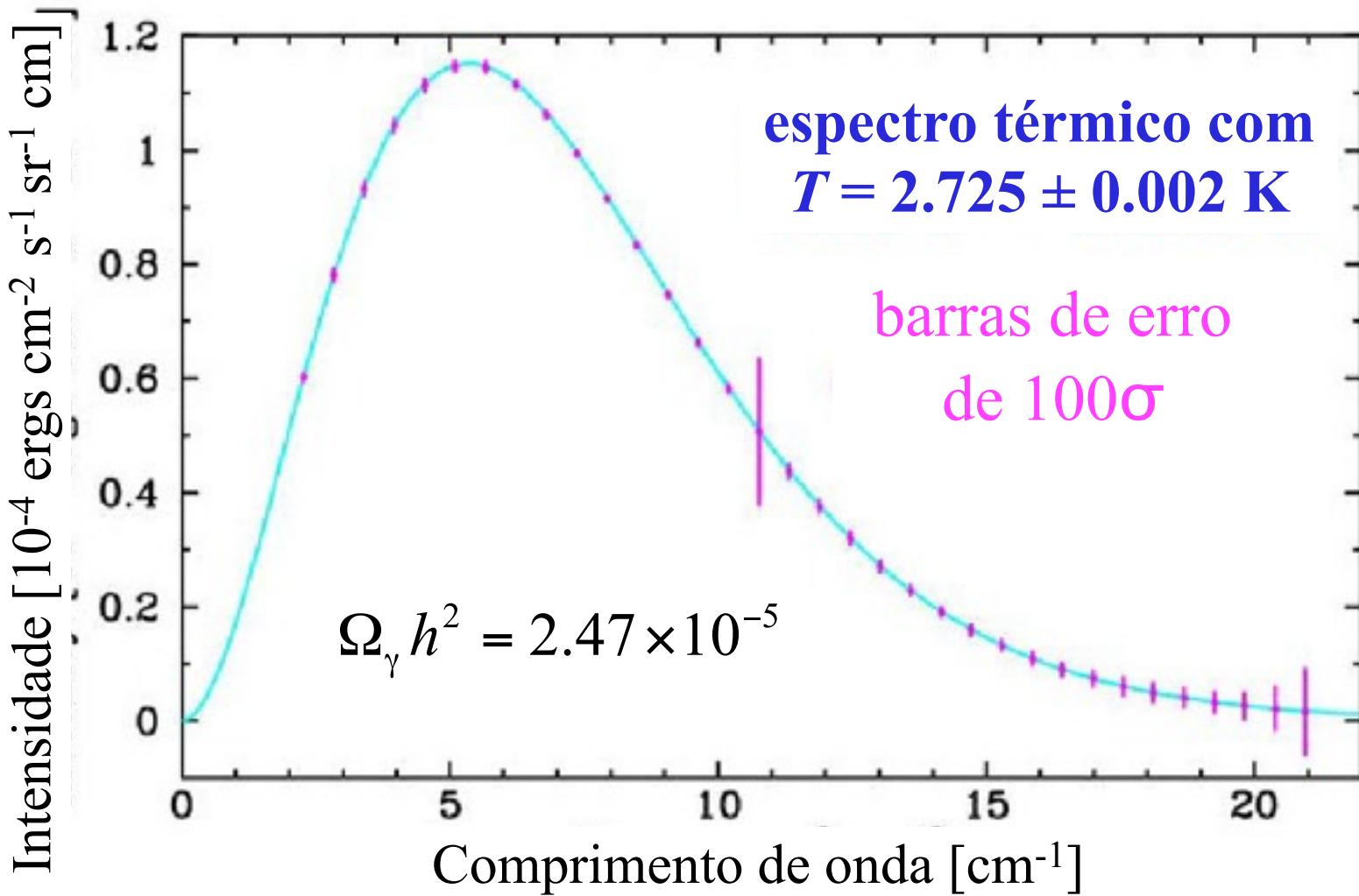


O Espectro da Radiação Cósmica de Fundo





O Espectro da Radiação Cósmica de Fundo





Radiação Cósmica de Fundo I

Mapa da Radiação Cósmica:

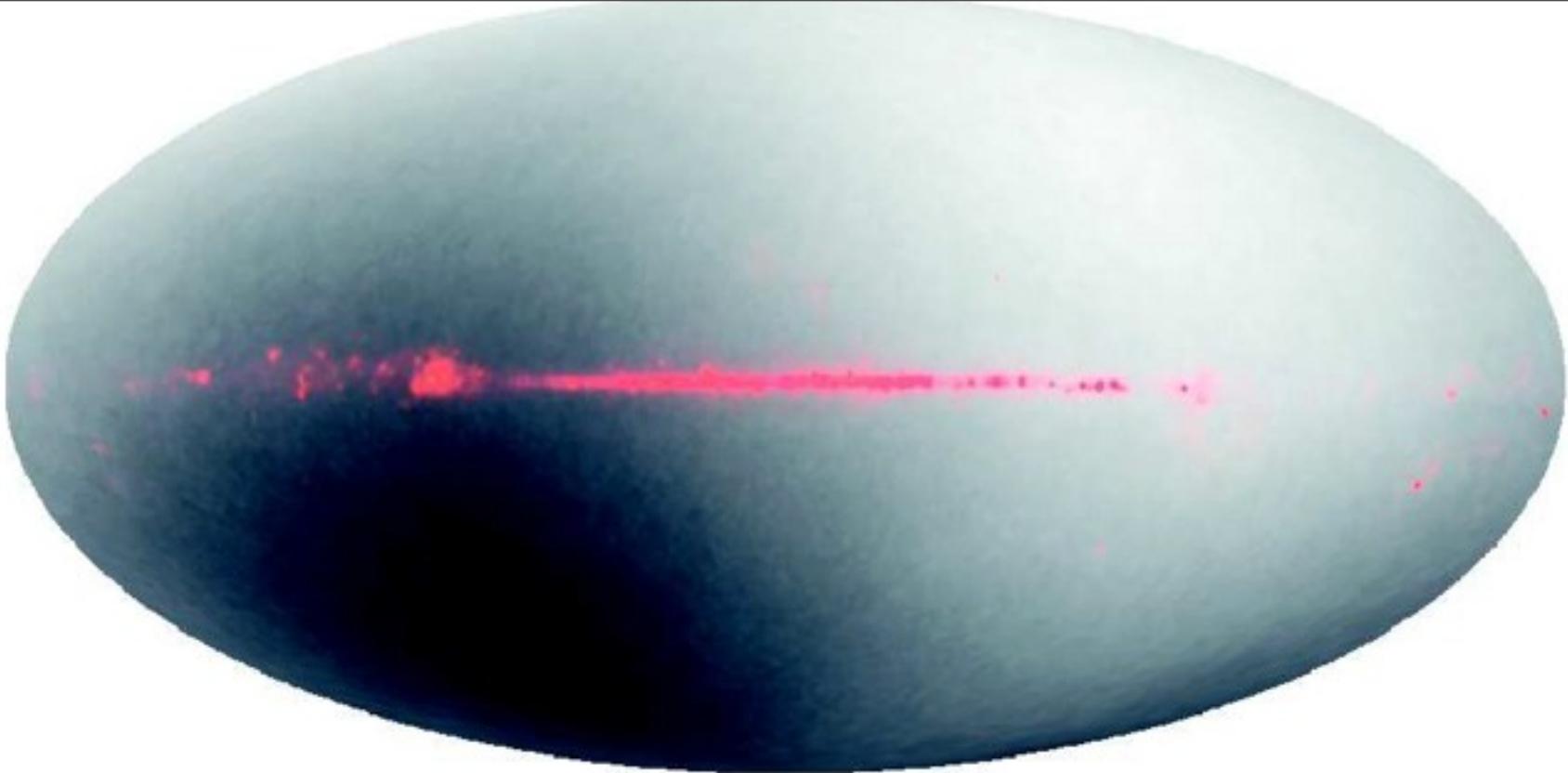


Contraste: 1x



400x

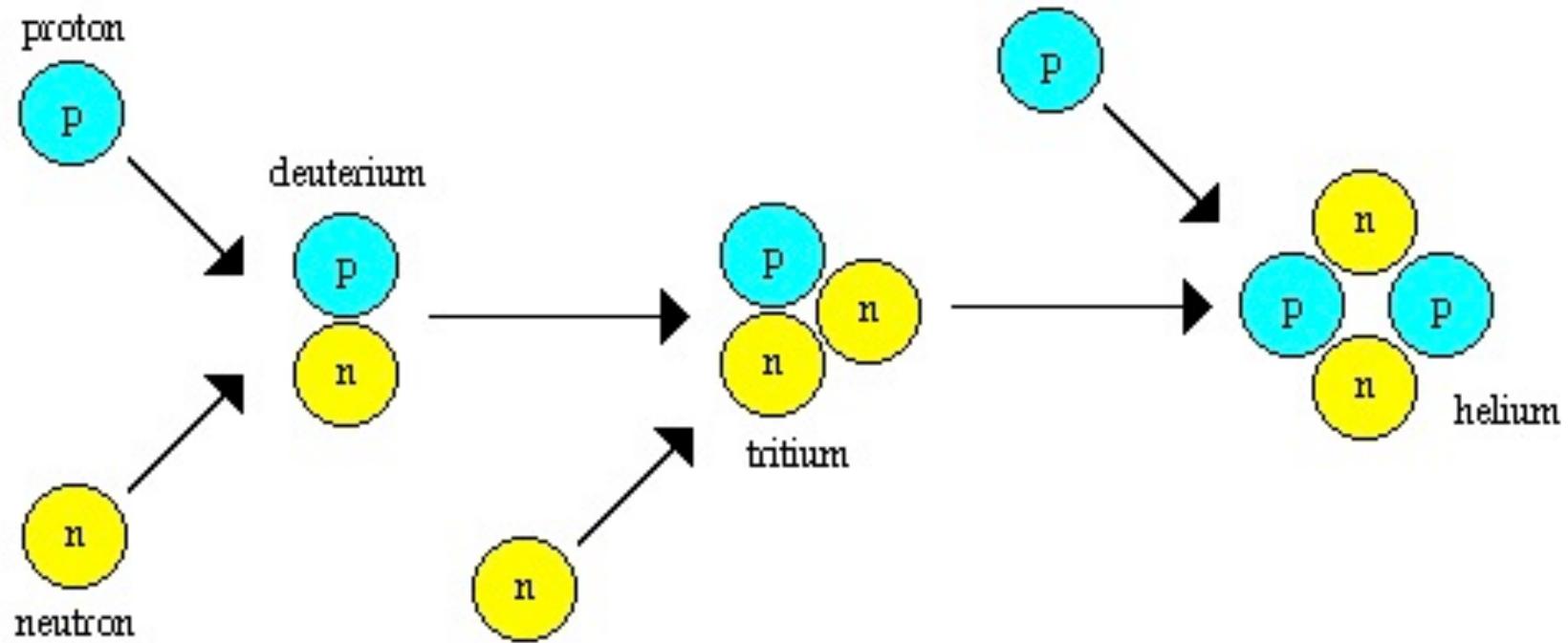
- Época do desacoplamento entre matéria e radiação (em torno de 380.000 anos após o “*Big-Bang*”).
- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$. Desvio para o vermelho, $z = 1089$.
- Universo primordial altamente homogêneo.
- Dipolo: $\Delta T = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK} \rightarrow v_{\text{gal}} = 360 \text{ Km/s}$



- 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: $\Delta T = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK} \rightarrow v_{\text{gal}} = 360 \text{ Km/s}$

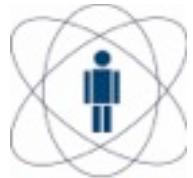
Nucleossíntese: Alquimia no Universo Primordial

Produção de ^7Li , ^3He , D, ^4He



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

Figura retirada de <http://blueox.uoregon.edu/~karen/astro123/lectures/lec20.html>



Produção de elementos leves

Universo dominado
pela radiação:

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



Produção de elementos leves

Universo dominado pela radiação:

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

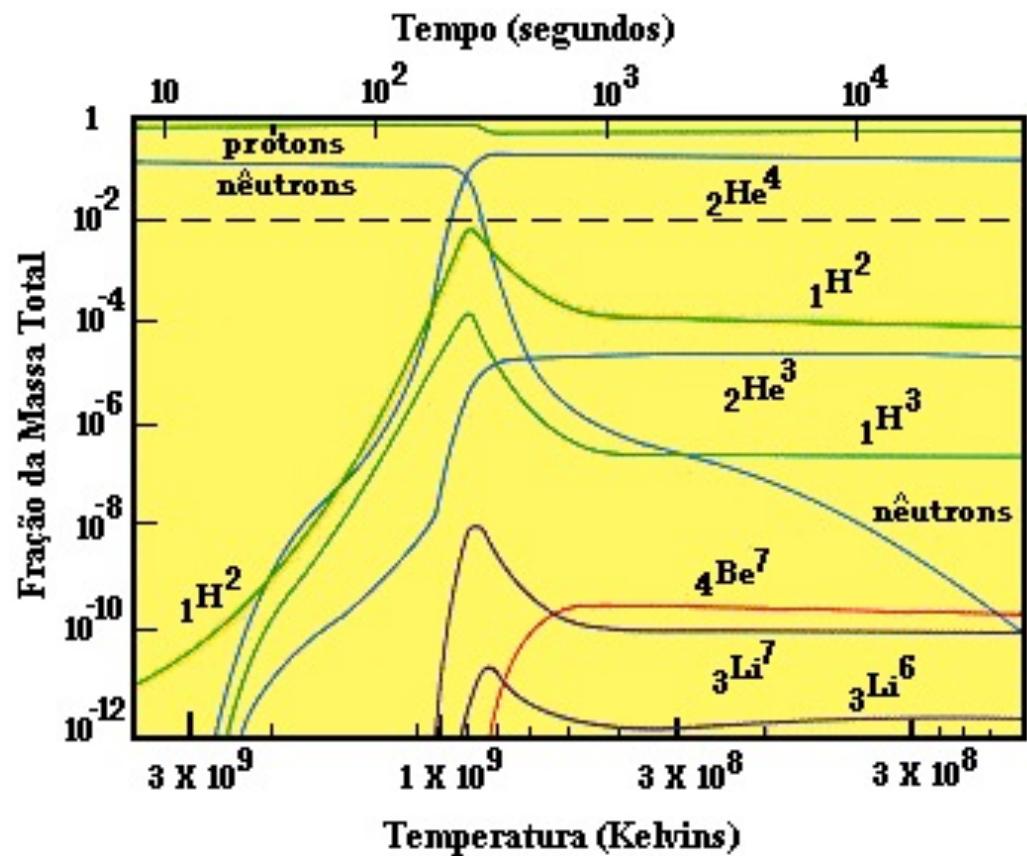


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva
Astronomia e Astrofísica, <http://astro.if.ufrgs.br/>



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: $a \propto t^{1/2}$

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

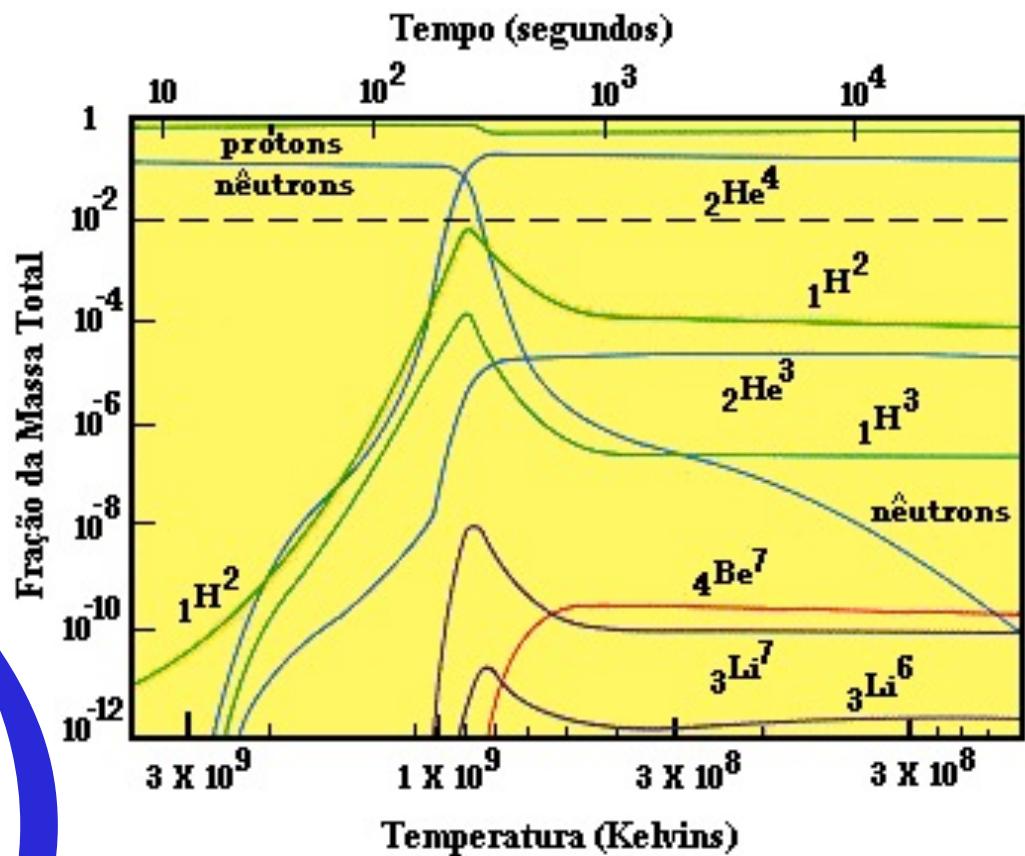
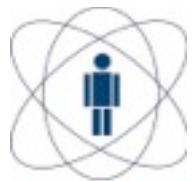
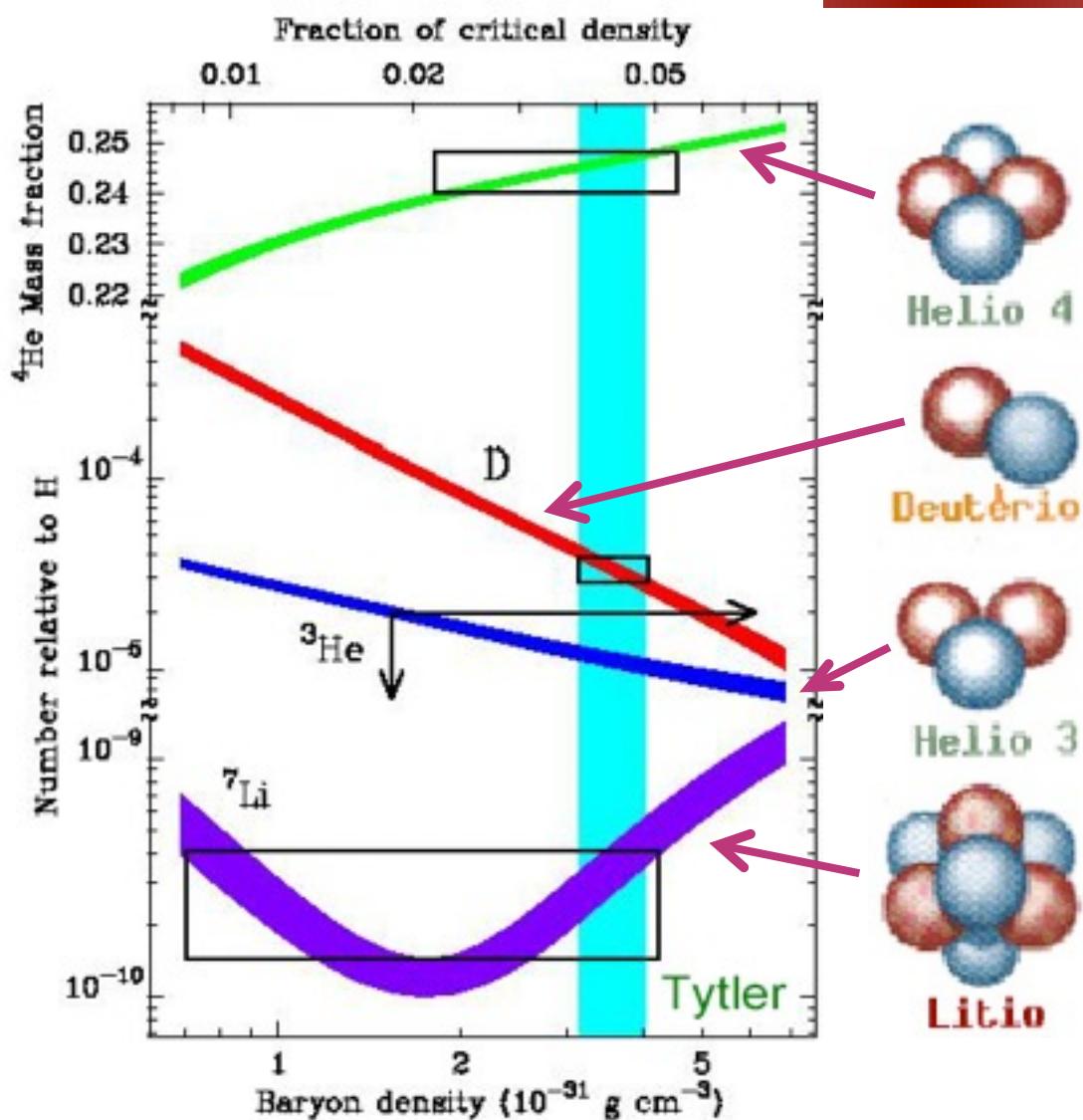
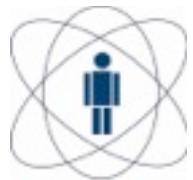


Figura: Kepler Oliveira, Maria de Fátima Saraiva
Astronomia e Astrofísica, <http://astro.if.ufrgs.br/>

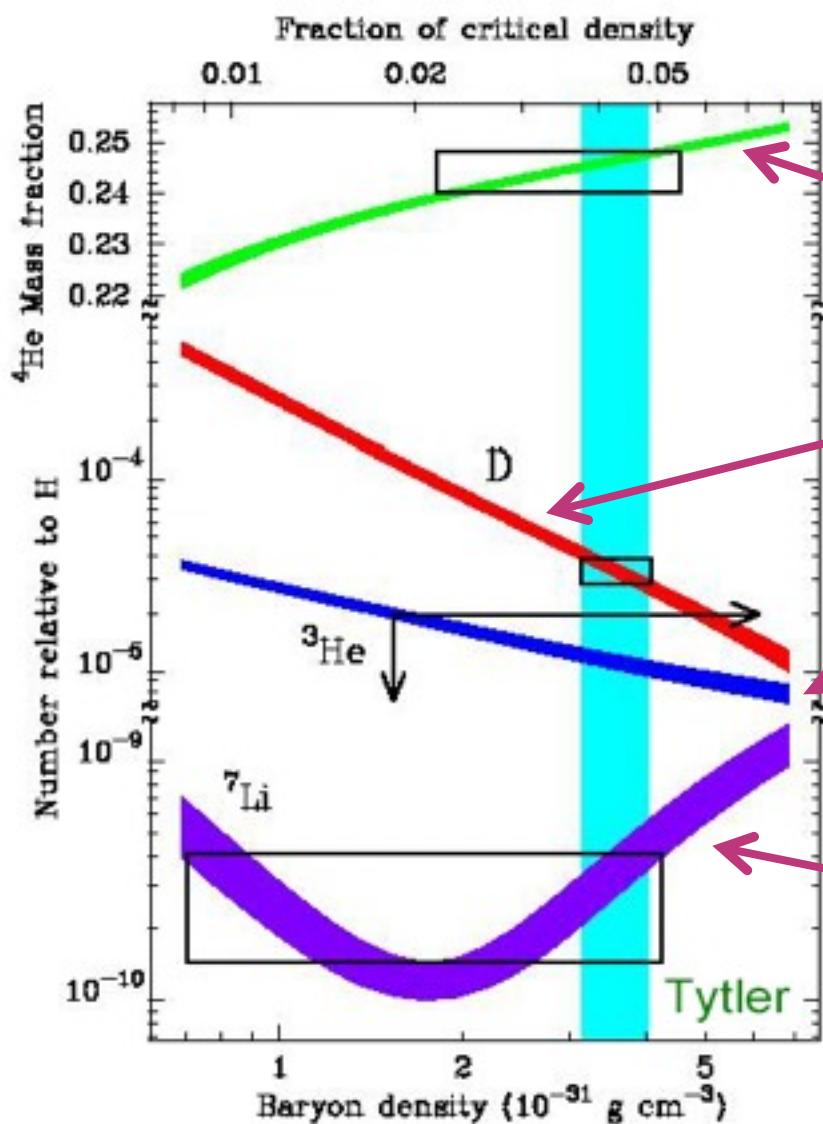


Abundância de Elementos Leves



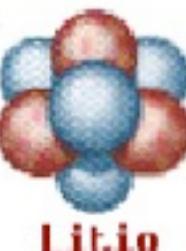


Abundância de Elementos Leves



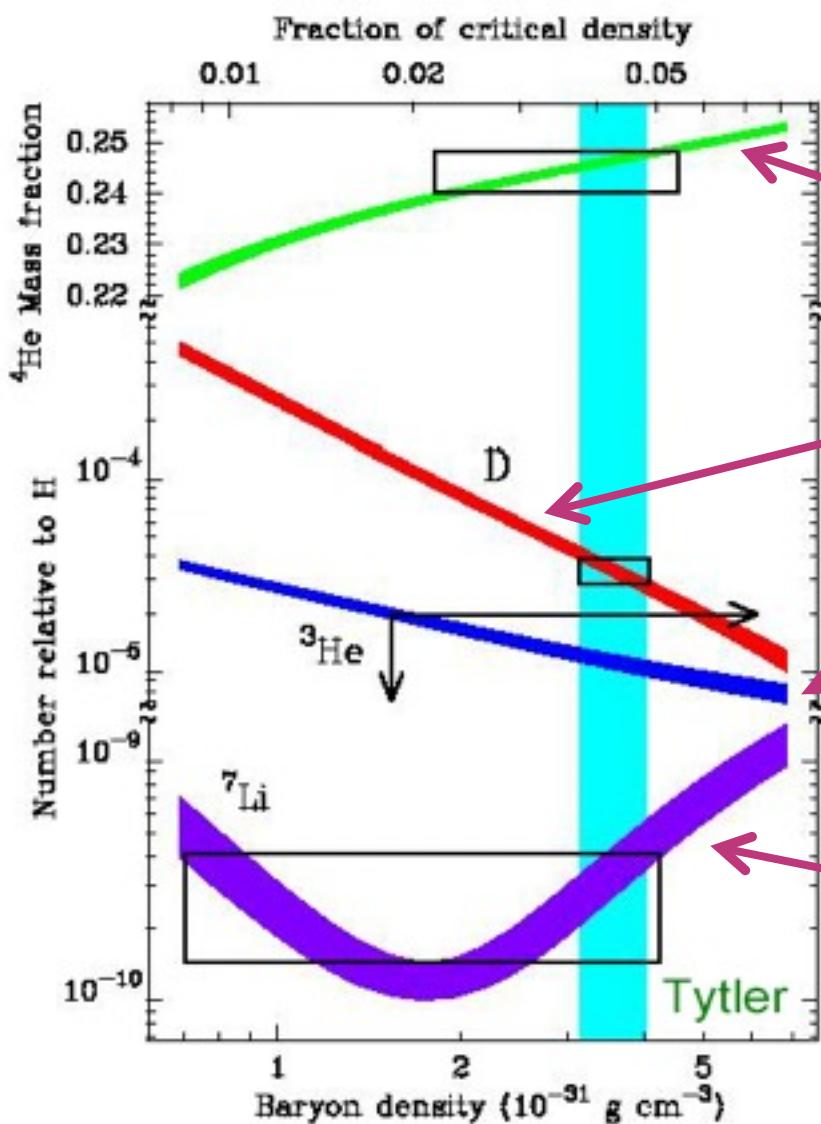
Produção de ^7Li , ^3He , D, ^4He
Todos com o mesmo η !

D é o melhor “barômetro”





Abundância de Elementos Leves



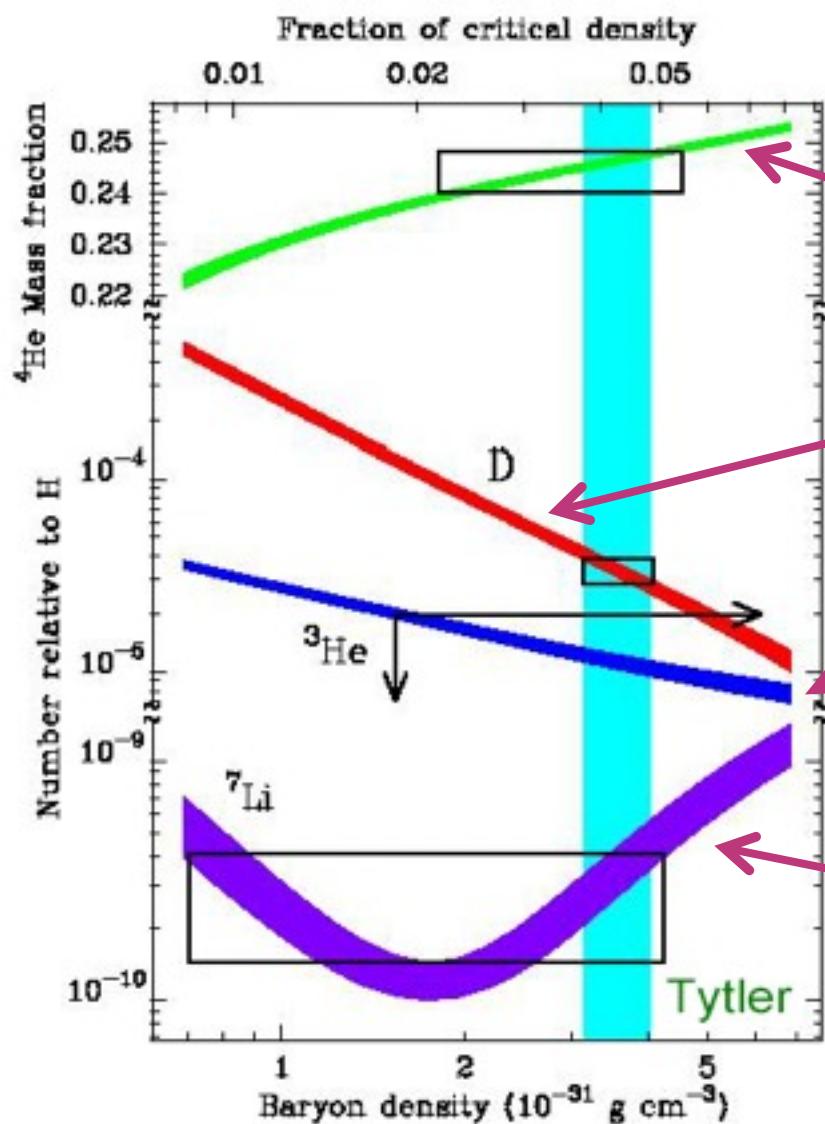
Produção de ${}^7\text{Li}$, ${}^3\text{He}$, D, ${}^4\text{He}$
Todos com o mesmo η !

D é o melhor “barômetro”



$$\Omega_b \simeq 0,04$$

Abundância de Elementos Leves



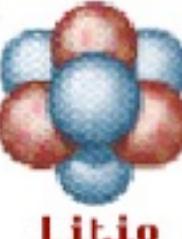
Produção de ^7Li , ^3He , D, ^4He Todos com o mesmo η !



D é o melhor “barômetro”



Independente da matéria escura

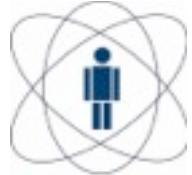


$$\Omega_b \simeq 0,04$$



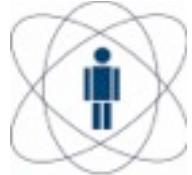
Assimetria Matéria/Anti-Matéria

- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (**equipartição**)



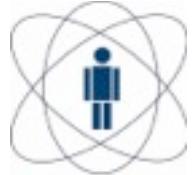
Assimetria Matéria/Anti-Matéria

- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (**equipartição**)
- $T \sim 175$ MeV ($t \sim 10^{-5}$ s “DBB”):



Assimetria Matéria/Anti-Matéria

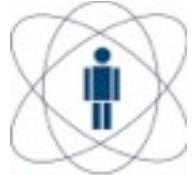
- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (**equipartição**)
- $T \sim 175 \text{ MeV}$ ($t \sim 10^{-5} \text{ s}$ “DBB”):
Meio quark-glúon \Rightarrow Hadronização



Assimetria Matéria/Anti-Matéria

- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (**equipartição**)
- $T \sim 175$ MeV ($t \sim 10^{-5}$ s “DBB”):
Meio quark-glúon \Rightarrow Hadronização

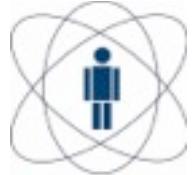
$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n} = 6 \times 10^{-10}$$



Assimetria Matéria/Anti-Matéria

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

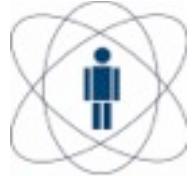
$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n} = 6 \times 10^{-10}$$



Assimetria Matéria/Anti-Matéria

- No universo primordial: equilíbrio entre partículas e anti-partículas (**equipartição**)
- $T \sim 175$ MeV ($t \sim 10^{-5}$ 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 Matéria/Anti-Matéria

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

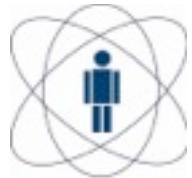
$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n} = 6 \times 10^{-10}$$



Assimetria Matéria/Anti-Matéria

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

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

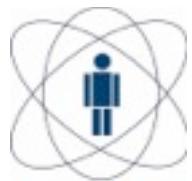


Assimetria Matéria/Anti-Matéria

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

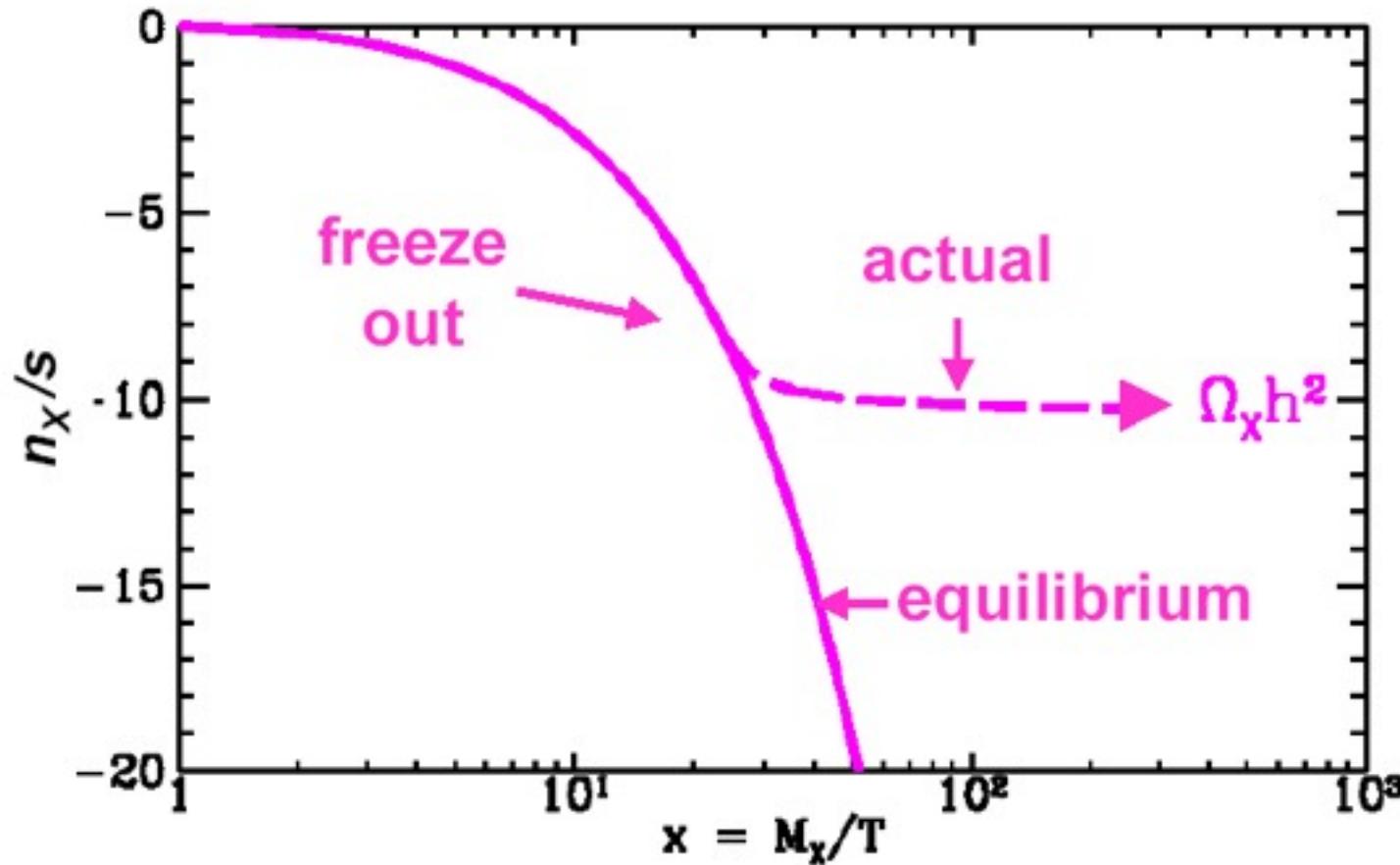
$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n} = 6 \times 10^{-10}$$

- Assimetria de 1 parte em 10^9 !



Relíquias Térmicas Frias e Matéria Escura

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



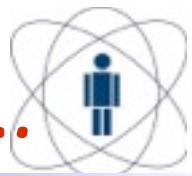
$$\Omega_X \propto \sigma_A^{-1} \text{ (independente da massa)}$$



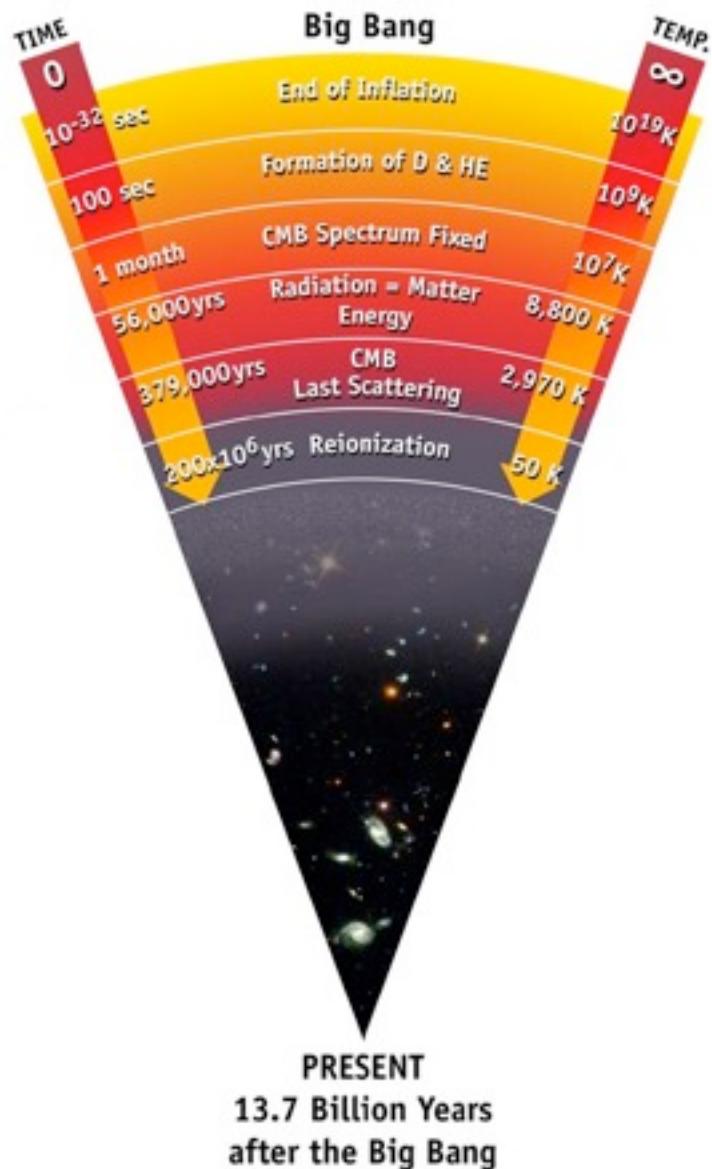
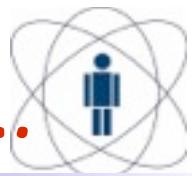
Alguns Marcos da História do Universo

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 hadron anti-hadron)
1000 GeV	Transição de fase eletrofraca
10^{15} GeV	Bariossíntese? Grande Unificação?
10^{19} GeV	Fim da era quântica? Inflação?

Endireitando a seta do tempo...

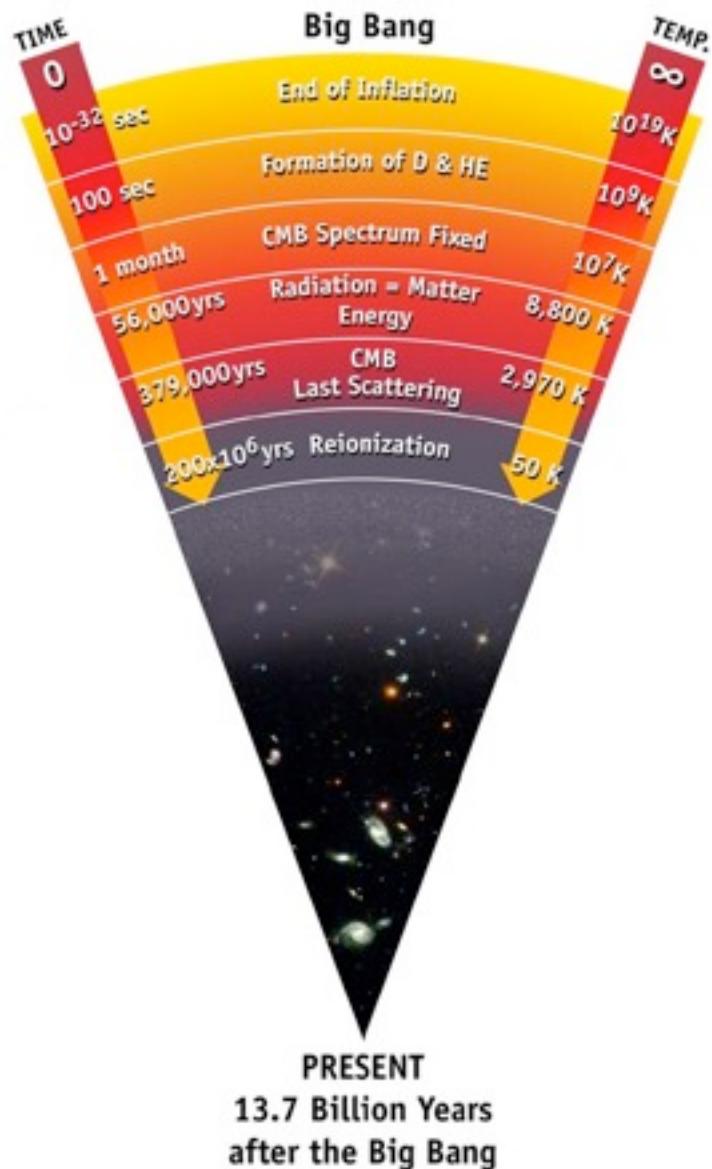
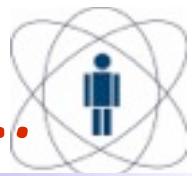


Endireitando a seta do tempo...

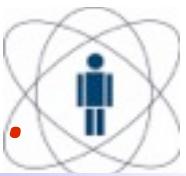


- Fase inicial densa e quente
→ *Big-Bang*

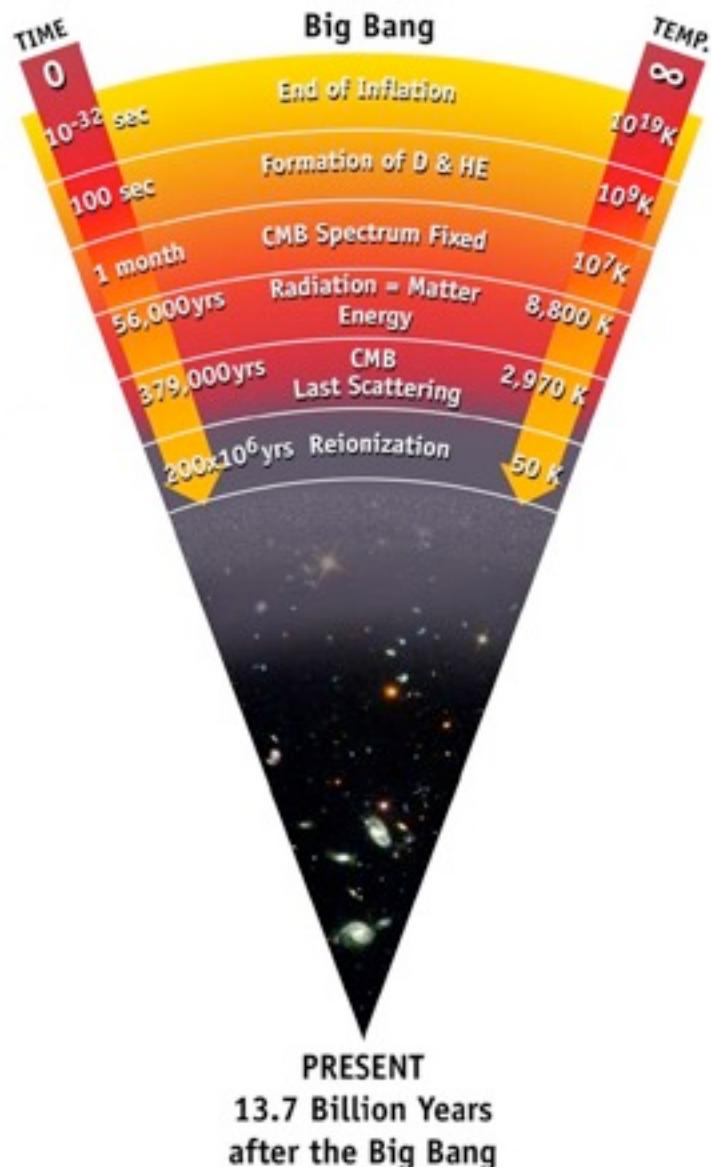
Endireitando a seta do tempo...



- Fase inicial densa e quente
→ **Big-Bang**
- Processos físicos:
 - ⓐ Síntese dos elementos
 - ⓐ Fósseis:
 - Abundância primordial
 - Radiação cósmica de fundo



Endireitando a seta do tempo...



- Fase inicial densa e quente
→ **Big-Bang**
- Processos físicos:
 - ⓐ Síntese dos elementos
 - ⓐ Fósseis:
 - Abundância primordial
 - Radiação cósmica de fundo
- Formação de estruturas:
 - Estrutura em grande escala



Parte Id

O Universo perturbado

Radiação Cósmica de Fundo e
Estrutura em Grande Escala

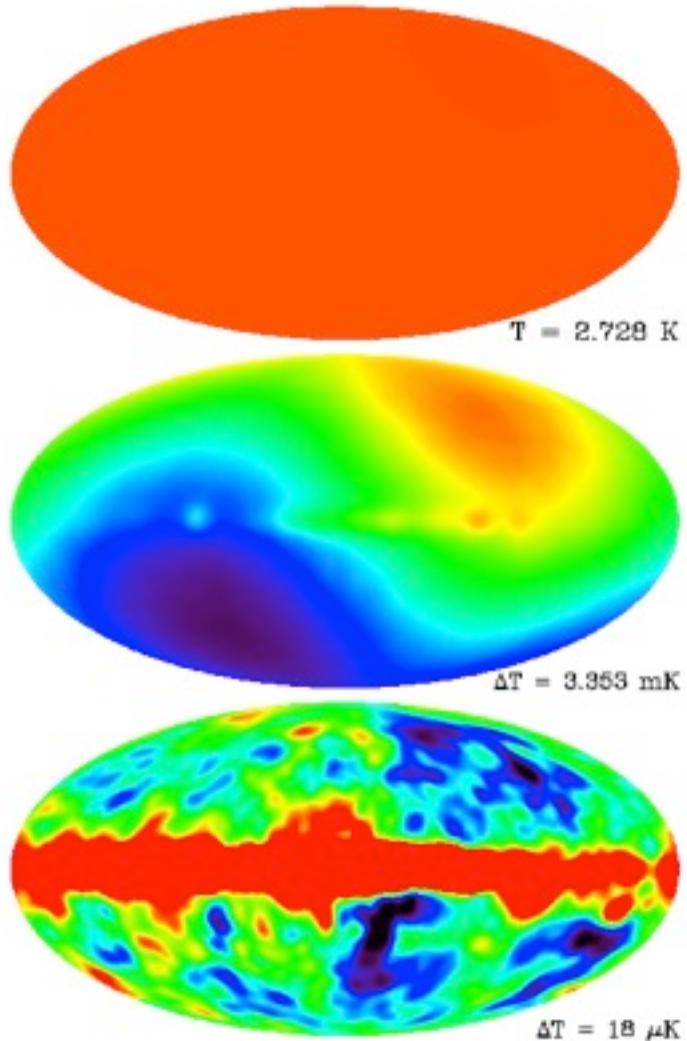


Flutuações na radiação cósmica de fundo

Anisotropias



Anisotropias na Radiação Cósmica de Fundo

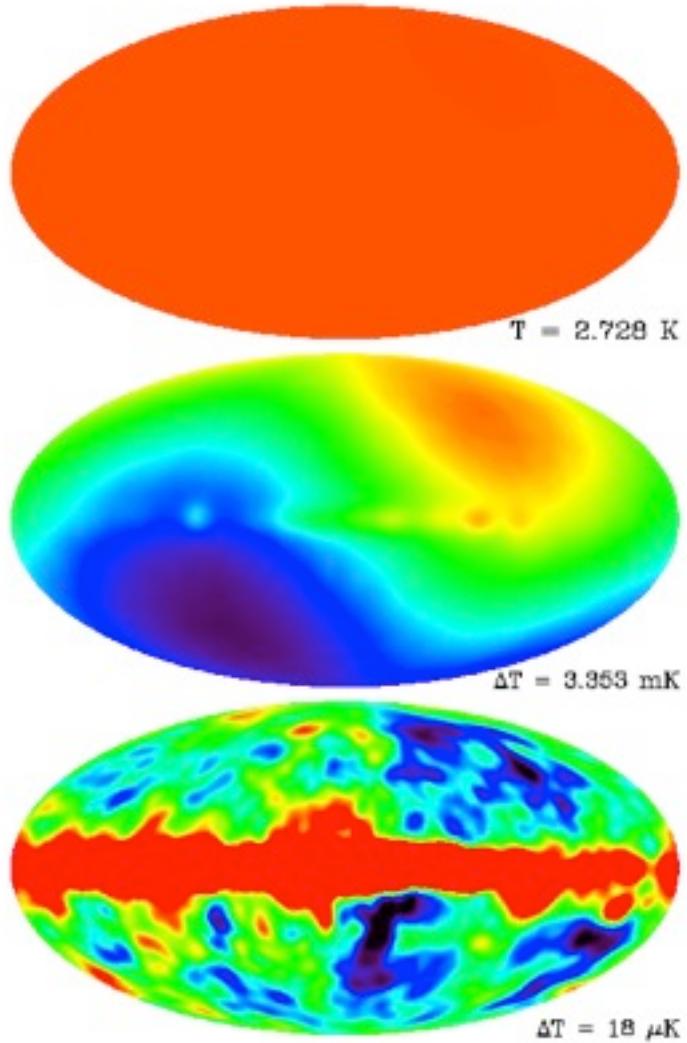


- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$. Desvio para o vermelho, $z = 1089$
- Universo primordial altamente homogêneo
- Dipolo:
 $\Delta T = 3.346 \pm 0.017 \text{ mK}$
 $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360 \text{ Km/s}$
- Flutuações de temperatura:

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



Anisotropias na Radiação Cósmica de Fundo

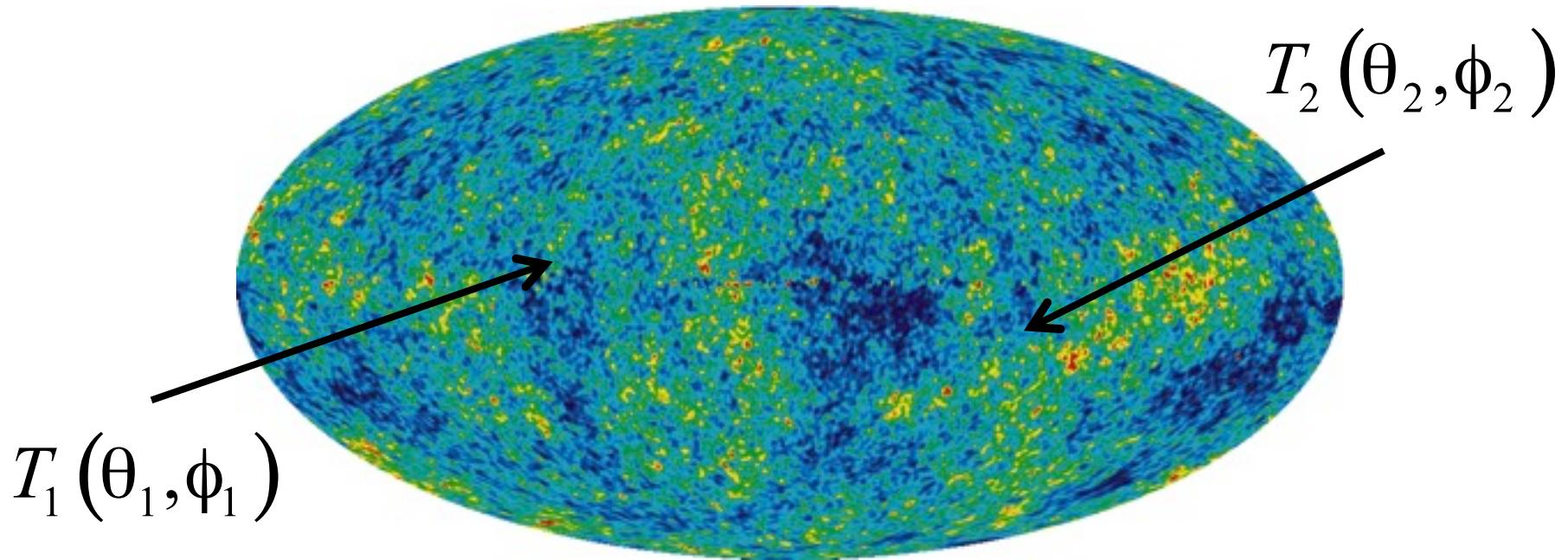


- $T_0 = 2.725 \pm 0.002$. Desvio para o vermelho, $z = 1089$
- Universo primordial altamente homogêneo
- Dipolo:
 $\Delta T = 3.346 \pm 0.017$ mK
 $\Rightarrow v_{\text{gal}} = 360$ Km/s
- Flutuações de temperatura:

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

Prêmios Nobel: 1978, 2006

Espectro de Potência da Radiação Cósmica de Fundo



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

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

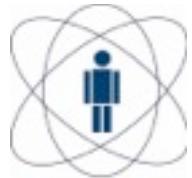
WMAP2008



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

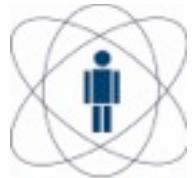


Anisotropias na RCF

● Anisotropias primárias

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

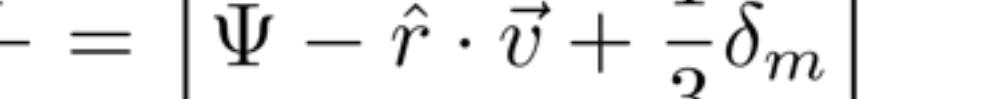
↑ ↑
Efeito Flutuação intrínseca
Doppler de temperatura

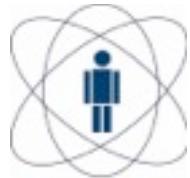


Anisotropias na RCF

● Anisotropias primárias

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

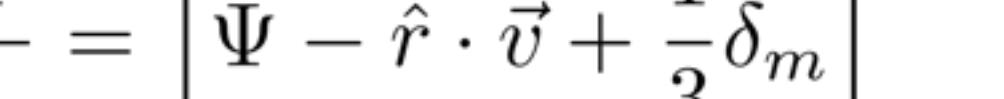

 Efeito Sachs-Wolfe Efeito Doppler Flutuação intrínseca de temperatura



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