



Universidade Federal do ABC

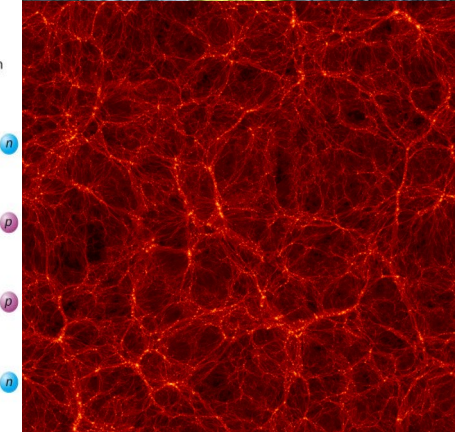
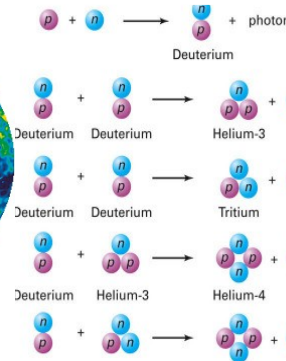
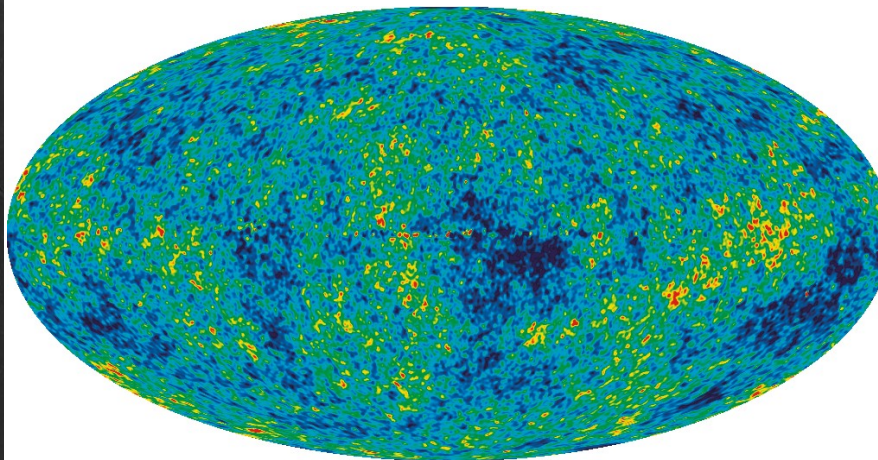
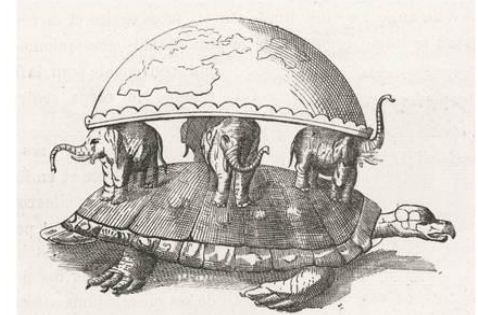
# Introdução à Cosmologia

## 07. Radiação Cós mica de Fundo I

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

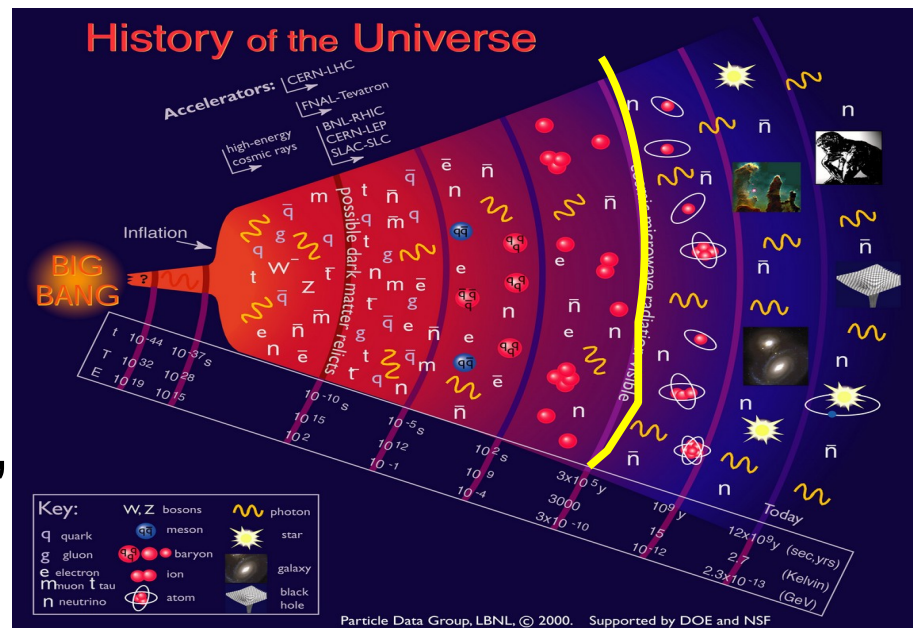
## Radiação Cósmica de Fundo

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

# Radiação Cósmica de Fundo

É uma **radiação eletromagnética** que permeia o Universo inteiro, e que foi emitida, ou melhor, **espalhada** pela **última vez**, na época da "**re-combinação**", quando o Universo tinha umas **380 000 anos** de idade, em *redshift*  $\sim 1089$ .

Antes, **fótons**, **elétrons** e **íons** (principalmente  $H^+$  e  $He^{++}$ ) **interagem** constantemente.

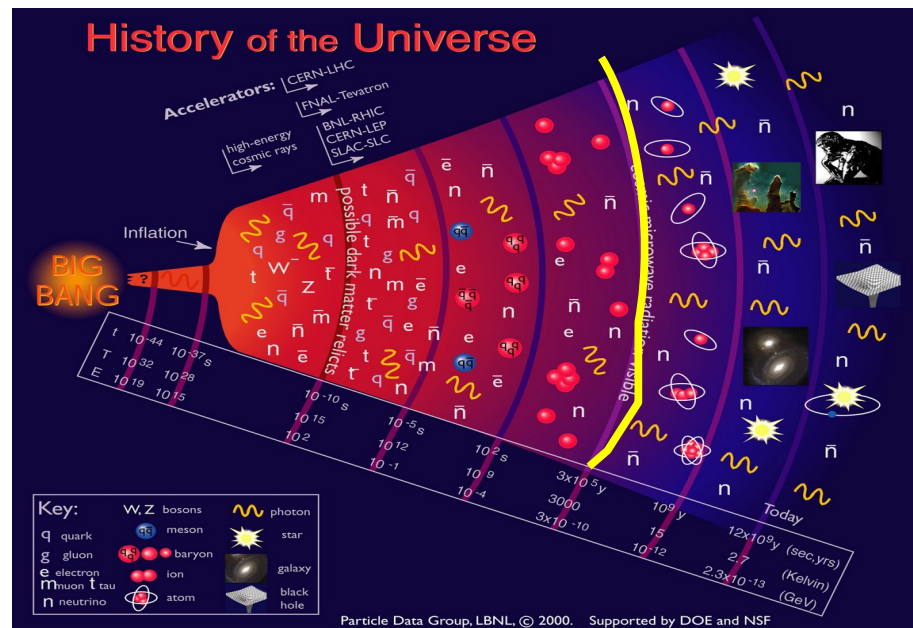


# Radiação Cósmica de Fundo

Na re-combinação, estes elétrons e íons se **juntaram** para formarem **átomos nêutros\***, que **não interagem** mais com os **fótons**, que desde lá podem se **propagar livremente** pelo espaço.

O Universo se tornou "transparente".

\*pela primeira vez, o processo deveria se chamar apenas combinação



# Radiação Cósmica de Fundo

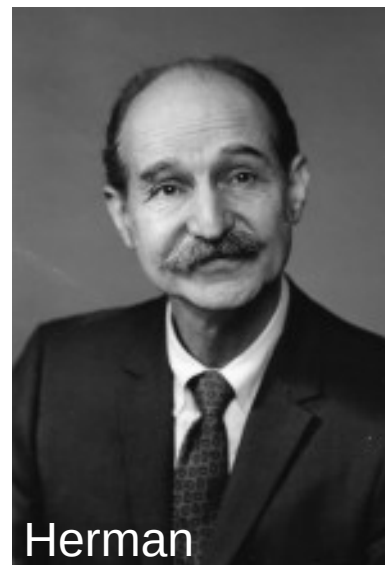
A temperatura na época era  $\sim 3000\text{ K}$ , e a radiação era uma radiação de **Corpo Negro** desta temperatura, mas ela sofreu em *redshift* no caminho pra cá, tal que agora, ela corresponde a uma radiação de Corpo Negro de  $\sim 2.7\text{ K}$  (lembrem da Lei de Wien?).

A Radiação Cósmica de Fundo pode ser detectada como uma radiação em **microondas** vindo de **todas as direções**, às vezes chamada **Superfície do Último Espalhamento**.

Ela bloqueia a visão para além dela (i. e. para as épocas antes de re-combinação), pelo menos por radiação eletromagnética.

# Radiação Cósmica de Fundo: História

Em 1948, Ralph Alpher, Robert Herman e George Gamov preveram a existência de uma **radiação** refletindo o **estado denso** e **quente** no **início** do Universo, hoje **permeando** o **espaço**, e estimaram que hoje, esta radiação deveria ter uma temperatura da ordem de 5 K, na faixa das microondas.

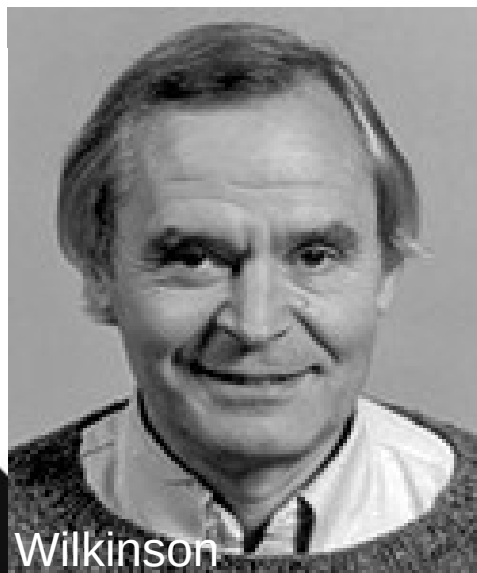


# Radiação Cósmica de Fundo: História

Nos anos 60, alguns grupos de pesquisa tentaram **detectar** a RCF, incluindo um de **Robert Dicke** (com David Todd Wilkinson, o "W" no nome do satélite WMAP e Peter G. Roll), que tinha desenvolvido um tipo de detector chamado **radiômetro Dicke**, com aquele a detecção deveria ser possível.



Roll



Wilkinson



Dicke

# Radiação Cósmica de Fundo: História

Mas foram os físicos

**Arno Penzias**

e **Robert Woodrow Wilson**,

**testando** um radiômetro Dicke(!)  
para uma empresa de  
telecomunicações, que, em 1964,  
**descobriram** a RCF **por acaso**.


Teve um **ruido** vindo de todas as  
direções no sinal que eles detectaram, que eles não  
conseguiram eliminar de jeito nenhum.




# Radiação Cósmica de Fundo: História

Eles entraram em contato com o Dicke, que segundo a lenda reagiu com as palavras "Boys, we've been scooped."

Sobrou para ele e seus colegas Bernard Burke e Jim Peebles fornecer a **explicação** para este ruído misterioso.

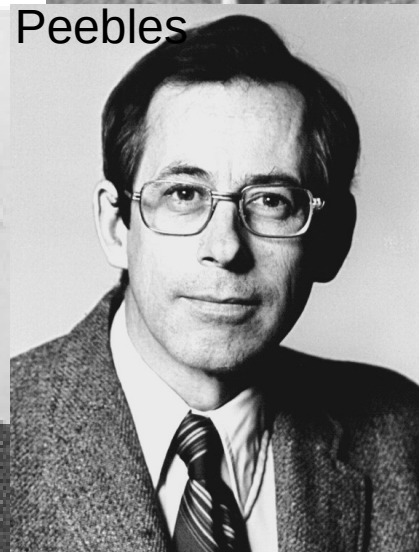
 Em 1978, Penzias e Wilson receberam o prêmio Nobel pela descoberta.

 E em 2019, Peebles o recebeu por contribuições na cosmologia teórica

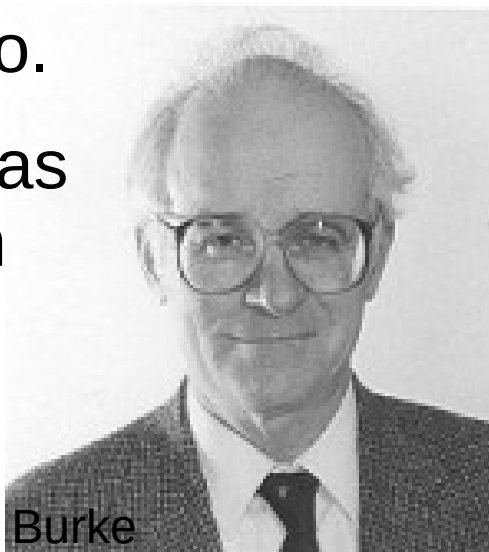
Penzias e Wilson



Peebles



Burke

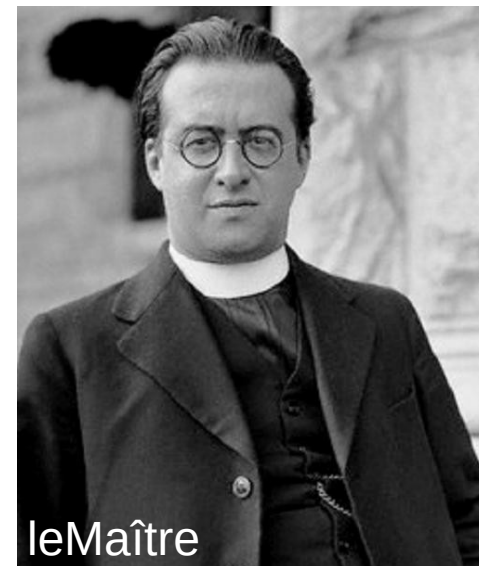


Dicke



# Radiação Cósmica de Fundo: História

Em 1966, internado em um hospital na Bélgica, leMaître recebeu com alegria a notícia, de que sua teoria do Átomo Primordial tinha sido confirmada pela descoberta de Penzias e Wilson e era tida como a teoria padrão pela comunidade científica.

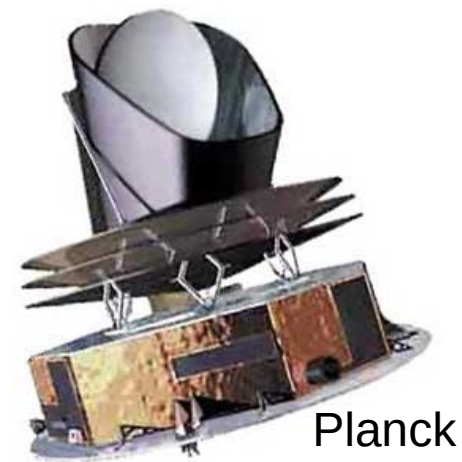
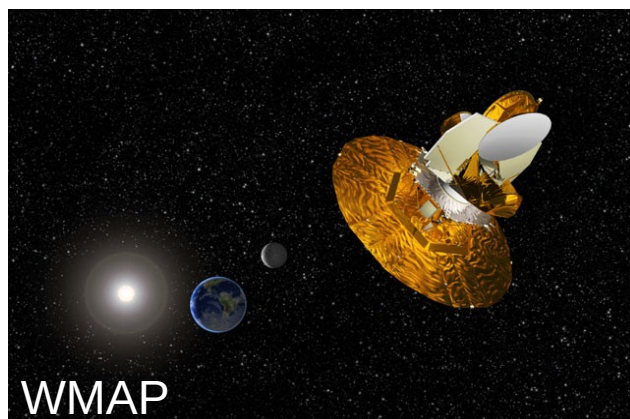
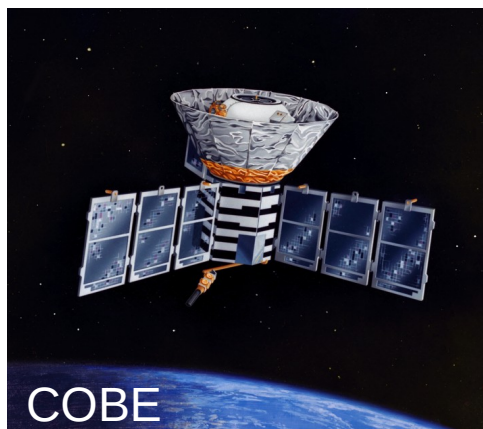


Gamov, ao contrário, achou que a previsão dele não tinha recebido o reconhecimento que merecia. Ele morreu em 1968 por falha de fígado.

# Radiação Cósmica de Fundo: História

Desde então, a RCF foi **estudada** usando balões na altura e pelos **satélites**:

- **COBE** (*Cosmic Background Explorer*):  
lançado em 1989, resultados 1992
- **WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*):  
lançado em 2001, resultados 2003/2006
- **Planck**: lançado em 2009, mediu até 10/2013,  
mediu polarização também



# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

Precisamos determinar, quando (isto é, em qual **temperatura** do Universo) os **átomos** do **gás primordial** mudaram de **ionizados** para **neutros**.

Para estimar a fração dos átomos em estado ionizado, precisamos calcular as **funções de partição**  $Z$  para os estados neutro e ionizado do elemento de interesse:

$$Z = \sum_{j=1}^{\infty} g_j e^{-(E_j - E_1)/kT} ,$$

onde  $E_j$  é a **energia** do  $j$ -ésimo estado do átomo ou íon ( $E_1$  sendo o estado fundamental), e  $g_j$ , o grau de degenerescência do  $j$ -ésimo estado.

A função de partição é basicamente a **soma ponderada** do **número** de **estados** possíveis do átomo ou íon, os pesos sendo  $e^{-(E_j - E_1)/kT}$ .

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

Usando as funções de partição dos estados **neutro** e **ionizado**,  $Z_i$  e  $Z_{i+1}$ , a **razão** dos **números** de **átomos** nos estados  $i+1$  e  $i$  é ( $\chi_i$  = energia de ionização a partir do estado fundamental)

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2Z_{i+1}}{n_e Z_i} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi_i/kT}$$

chamada **equação de Saha**.

A parte  $Z_{i+1}/Z_i \cdot e^{-\chi_i/kT}$  é análoga à equação de Boltzmann, e  $n_e$  é a densidade de elétrons livres.

O fator 2 no numerador também tem a ver com os elétrons livres (com seus dois estados de spin), assim como o fator  $(2\pi m_e kT/h^2)^{3/2}$ .

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

De certa forma, é lógico, a densidade de elétrons livres aparecer na equação (no denominador), já que elétrons livres dificultam a ionização, resp. facilitam a re-combinação.

Mais detalhes sobre a equação de Saha na disciplina Introdução à Física Estelar, onde ela é usada para estimar o grau de ionização dos átomos na fotosfera de estrelas, e a intensidade das linhas espectrais destas estrelas.

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

Para facilitar supomos, que o gás primordial é **hidrogênio** puro (Na verdade, H contribui ~75% em massa, ou ~90% em número de átomos).

Definindo:

$N_I$ : no. de **átomos neutros** (H I = H)

$N_{II}$ : no. de **átomos ionizados** (H II = H<sup>+</sup> = p<sup>+</sup>)

A Equação de Saha será: 
$$\frac{N_{II}}{N_I} = \frac{2Z_{II}}{n_e Z_I} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi_I/kT}$$

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

Para **hidrogênio** (H I e H II) temos:

-  $\chi_I = 13.6 \text{ eV}$

- Existe apenas **um** "estado" de H II, o **próton isolado**  
 $\Rightarrow Z_{II} = 1$

- Para H neutro, nas temperaturas aqui tratadas os **estados excitados**  $j$  entram com **peso**  $e^{-(E_j-E_1)/kT}$  **praticamente nulo**,  
o **estado fundamental**  $j = 1$  com peso  $e^{-(E_1-E_1)/kT} = 1$ ,  
e há **dois estados fundamentais**, correspondendo às duas **orientações** do **spin** do **elétron**  
(em relação ao spin do próton).

$\Rightarrow Z_I \approx 2 \cdot 1 = 2$

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

É útil definir a **fração** de **átomos ionizados**,  $f$ :

$$f = N_{II}/(N_I + N_{II}) = N_{II}/N_I / (1 + N_{II}/N_I)$$

$$\Rightarrow N_{II}/N_I = f/(1 - f)$$

Para **cada próton** há um **elétron livre** (o gás é neutro):

$$n_e = n_p = N_{II}/V \text{ e } n_H = N_I/V \Rightarrow n_e = f(n_p + n_H) = f\rho_b/m_H,$$

onde  $\rho_b = (n_p + n_H)m_H$  é a **densidade** da **matéria bariônica**.

Em termos da **densidade atual** da **matéria bariônica**:

$$n_e(R) = f\rho_{b,0}/m_H R^3.$$

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

Ainda usamos  $T=T_0/R$  (pela **Lei** de **Wien**, já que  $\lambda_0=\lambda/R$ ), com  $T_0 = 2.725$  K a **temperatura** da **RCF** medida **hoje** e substituindo tudo na equação de Saha:

$$\frac{f}{1-f} = \frac{m_H R^3}{f \rho_{b,0}} \left( \frac{2\pi m_e k T_0}{h^2 R} \right)^{3/2} e^{-\chi_I R / k T_0}$$

Dá para achar  $R$  numericamente para um valor desejado de  $f$ .

Por exemplo, metade do H estava ionizada ( $f = 0.5$ ) para

$R \approx 7.25 \cdot 10^{-4}$  ( $z \approx 1380$ ) e  $T \approx 3760$  K

# Estimando Temperatura e *Redshift* da RCF

Para o **desacoplamento** dos **fótons** (superfície do último espalhamento), a densidade de H ionizado tinha que ser um pouco menor ainda. Acha-se:

$$z_{\text{desac}} = 1089 \pm 1,$$

$$T_{\text{desac}} = T_0(1+z_{\text{desac}}) = 2970 \text{ K e}$$


$$t_{\text{desac}} = 378\,000 \text{ anos}$$

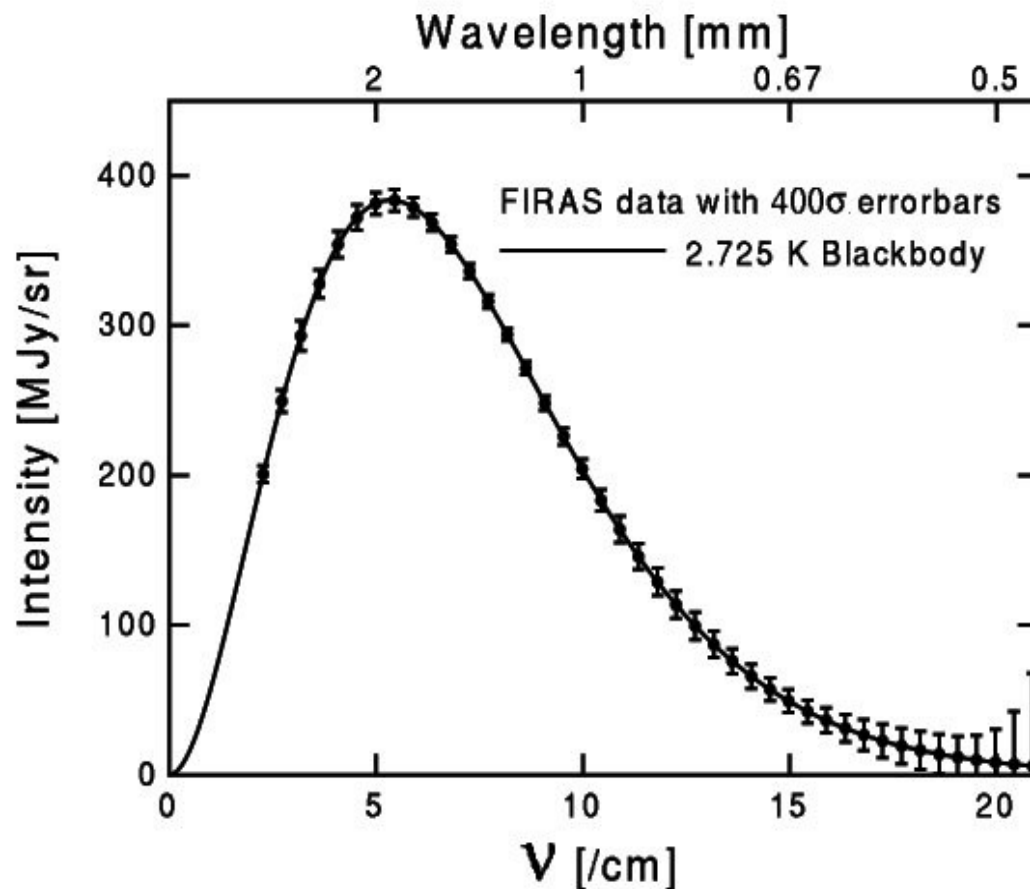
Na verdade, a superfície do último espalhamento teve uma certa "espessura", isto é, o desacoplamento ocorreu durante um certo **intervalo** de tempo/*redshift*:

$$\Delta t_{\text{desac}} = 118\,000 \text{ anos, } \Delta z_{\text{desac}} = 195$$

# Radiação Cósmica de Fundo

De fato, observa-se um **espectro** de **Corpo Negro** quase perfeito de **2.725 K**.

 Esta descoberta e a da **anisotropia** ( $\Rightarrow$  jájá) da RCF rendeu o prêmio Nobel de física de 2006 aos responsáveis pelo projeto COBE,



John C. Mather e George F. Smoot

# Radiação Cósmica de Fundo

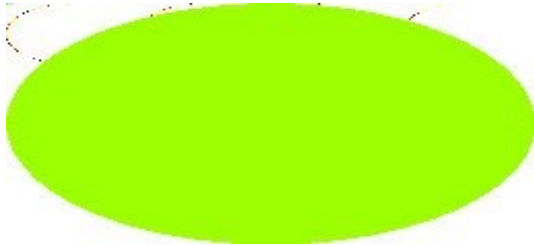
Mas dá para tirar muito **mais informação** da Radiação Cósmica de Fundo.

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

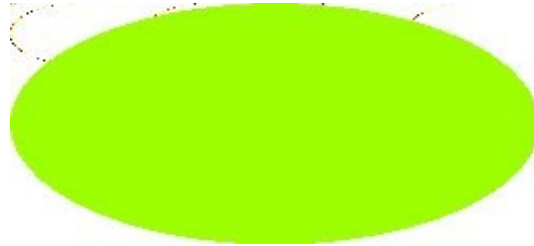
# Radiação Cósmica de Fundo

## Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE



WMAP



- Extremamente **homogênea**:  
Azul 0 K  
Vermelho 4 K

# Radiação Cósmica de Fundo

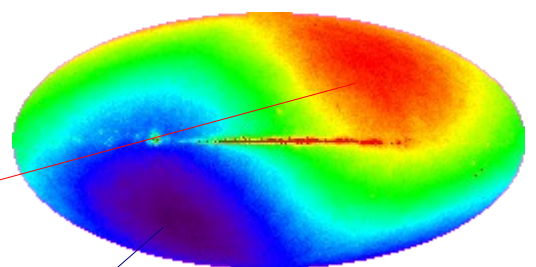
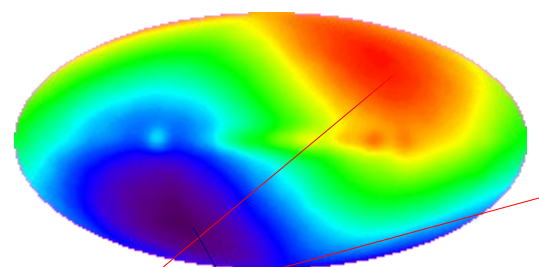
## Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE

WMAP



- Extremamente **homogênea**:  
Azul 0 K  
Vermelho 4 K



Numa escala mais fina:  
Azul 2.721 K  
Vermelho 2.729 K  
aparece o momento dipolo  
devido ao **movimento do Sol**

O Sol está se movimentando **nesta direção** (direção constelação do Leão) em relação ao referencial da Radiação Cósmica

=> efeito Doppler: detectamos a radiação com **comprimentos de onda mais curtos**

=> medimos uma **temperatura** da radiação **mais alta**

O Sol está indo pra **direção oposta** desta direção (Aquário)

=> **comprimentos de onda maiores** => **temperatura mais baixa**

# Radiação Cósmica de Fundo

## O Momento Dipolo da Radiação de Fundo

Usando a fórmula que calcula a **temperatura medida**  $T_{\text{mov}}$  em função do ângulo  $\theta$  entre a **direção de movimento** do **observador** em relação ao *Hubble Flow* e a **direção da medição** (=> lista),

$$T_{\text{mov}} = \frac{T_{\text{rep}} \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - (v/c) \cos \theta}$$

e que para  $v \ll c$  pode ser aproximada por (=> tb. lista)

$$T_{\text{mov}} \simeq T_{\text{rep}} \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

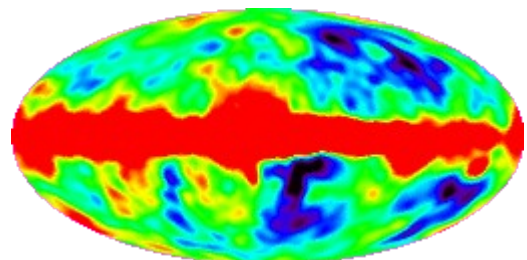
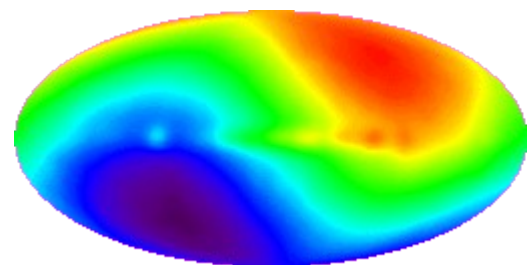
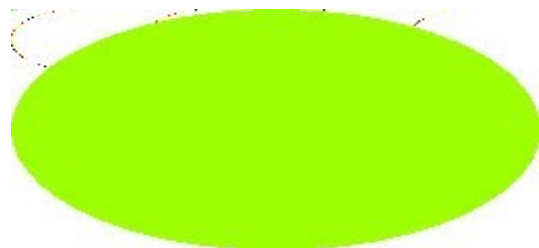
concluimos que estamos nos **movimentando** com **~371 km/s** em relação ao *Hubble Flow*.

( $T_{\text{rep}}$  é a temperatura que um observador movimentando-se com o *Hubble Flow* mediria em todas as direções.)

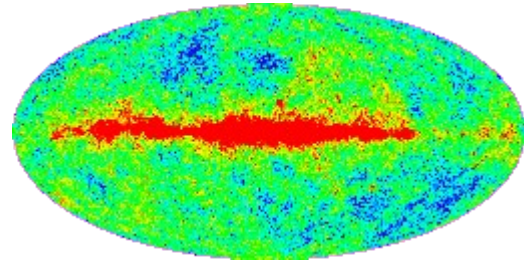
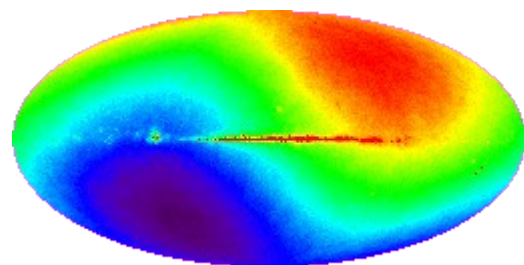
# Radiação Cósmica de Fundo

## Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE



WMAP



- Extremamente **homogênea**:  
Azul 0 K  
Vermelho 4 K

Numa escala mais fina:  
Azul 2.721 K  
Vermelho 2.729 K  
aparece o momento dipolo  
devido ao **movimento do Sol**

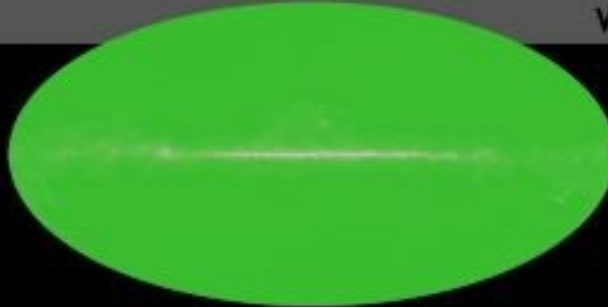
Depois de subtraído o efeito do  
movimento do Sol:  
As regiões azuis são **0.0002 K** mais  
frias que as vermelhas.  
A região mais quente no meio é a  
contribuição da **Via Láctea**

# Radiação Cósmica de Fundo

1965



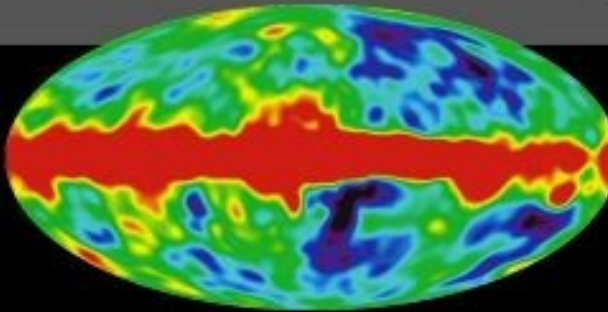
Penzias and  
Wilson



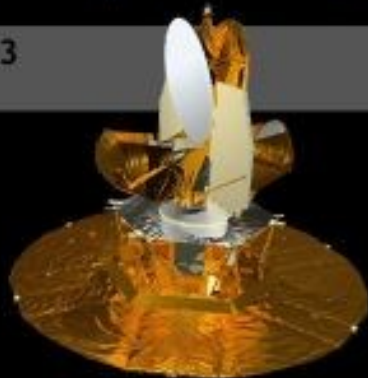
1992



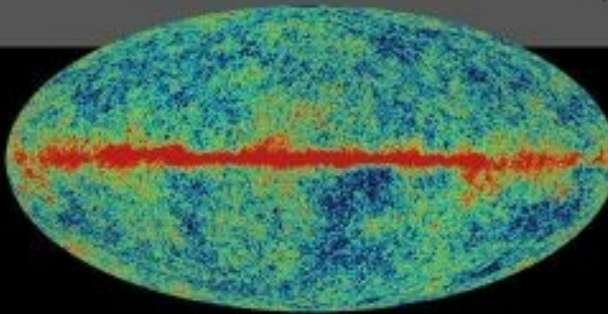
COBE



2003



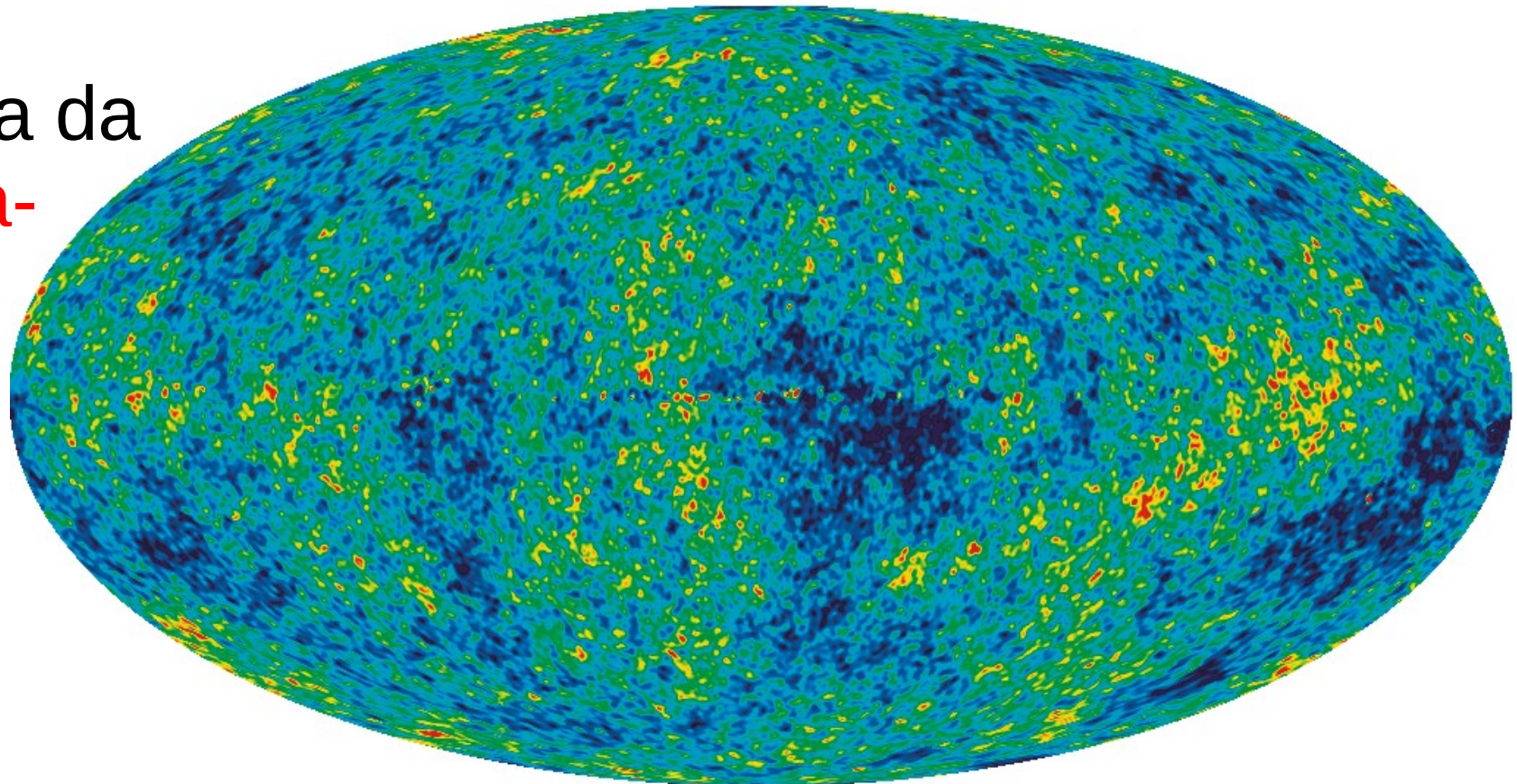
WMAP



# Radiação Cósmica de Fundo

Após subtraída a contribuição da Via Láctea:

=> Mapa da  
tempera-  
tura  
da  
RCF.



As flutuações de temperatura são da ordem de  $\delta T/T \approx 1-7.5 \cdot 10^{-5}$ .

# Radiação Cósmica de Fundo

O que significam estas **flutuações** na **temperatura** da **Radiação Cósmica de Fundo**?

Elas refletem as **variações** de **densidade** na época, devidas às **ondas de som** propagando-se pelo plasma e comprimindo e descomprimindo este.

As regiões mais **densas** estavam **aquecidas** pela **compressão**, por da ordem de  $\delta T/T \approx 10^{-5}$ .

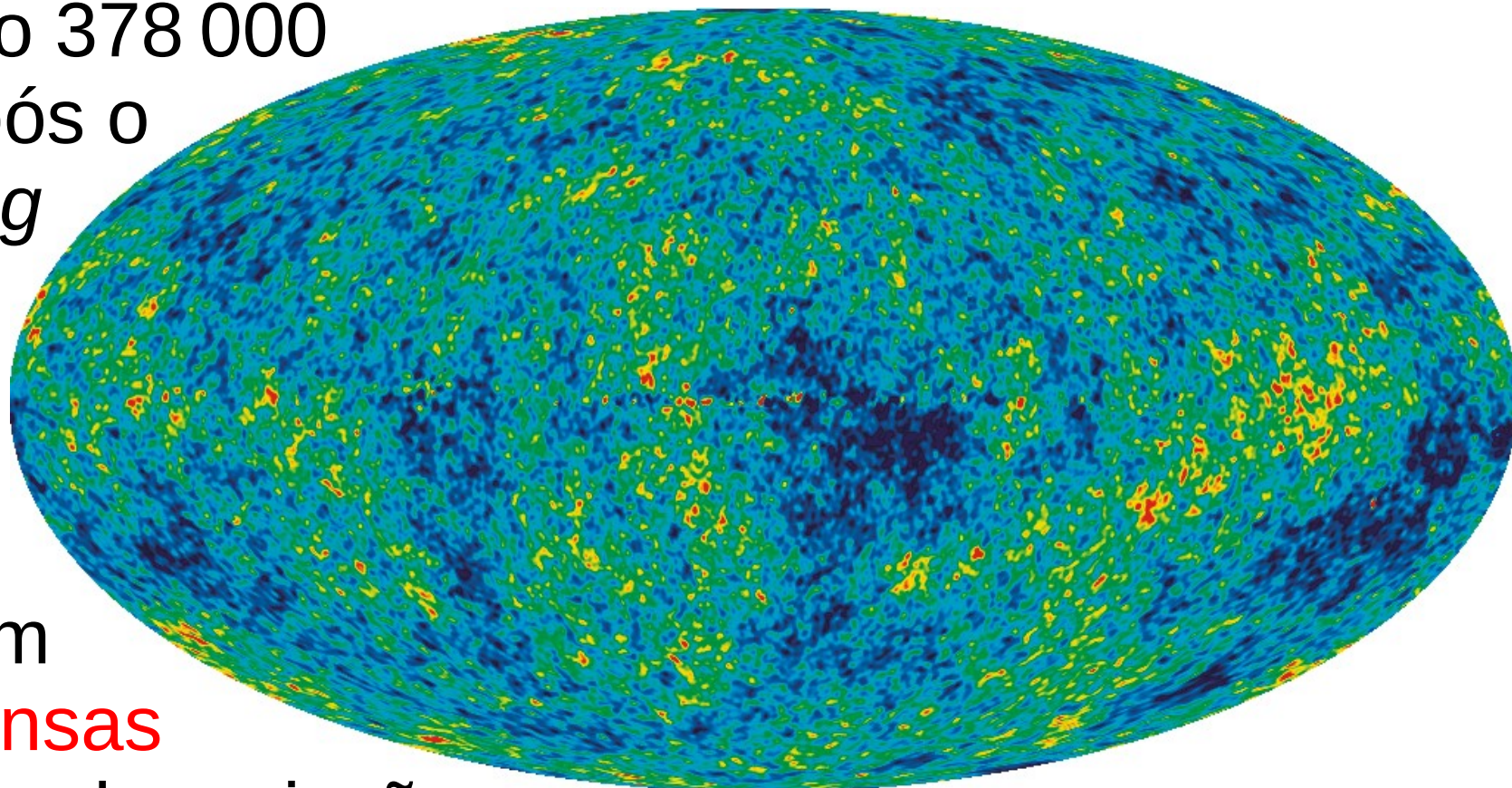
Por outro lado, os fótons tiveram que "subir" do potencial gravitacional mais fundo nestas regiões, sofrendo um **redshift gravitacional** (=> Aula Relatividade Geral), o que **diminui** a **temperatura detectada**, chamado efeito Sachs-Wolfe.

O efeito somado dá:  $\rho \text{ prop. } T^3 \Rightarrow \delta\rho/\rho = 3 \cdot \delta T/T$

# Radiação Cósmica de Fundo

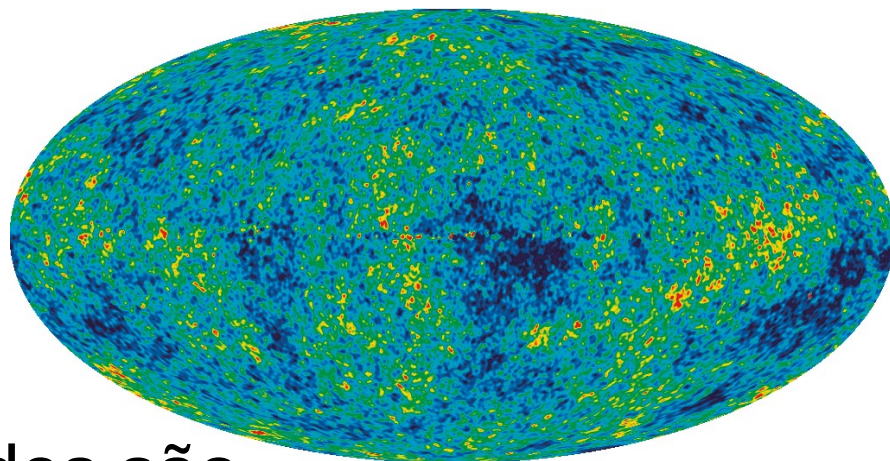
=> Mapa da **densidade** da **matéria visível** do Universo 378 000 anos após o *Big Bang*

As regiões vermelhas eram **mais densas** na época da emissão



# Radiação Cósmica de Fundo

As partes **vermelhas** estavam da ordem de **uma parte em 100 000 mais densas** que as partes verdes.



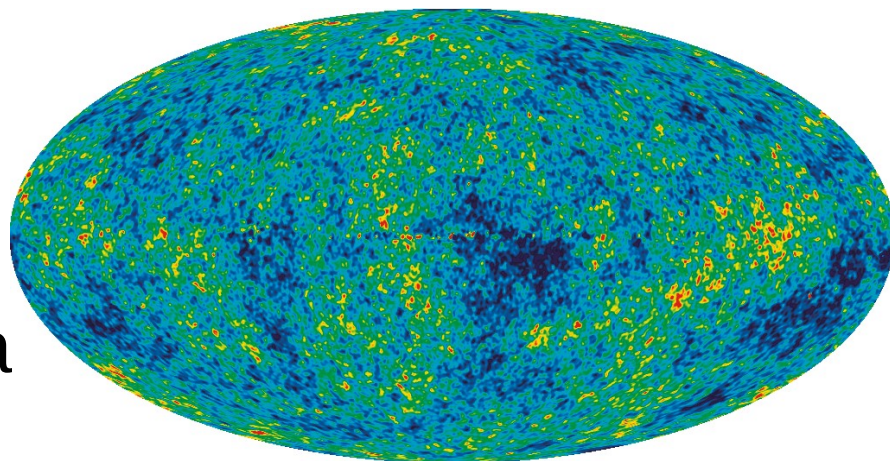
Será que estas sobredensidades são as **sementes** das **estruturas observadas hoje** (galáxias, aglomerados de galáxias, ...)?

Pode se **calcular** como estas regiões mais densas deveriam ter **evoluído** até hoje, por **colapso gravitacional** (=> aulas Evolução de Estruturas e Matéria Escura).

O resultado é, que as sobredensidades da matéria visível **não** eram **suficientes** para **formar** as estruturas atuais. Elas deviam ter sido uns 1000 vezes maiores.

# Radiação C3smica de Fundo

=> Deve ter tido **mais mat3ria** que a **vis3vel**, e que na 3poca da re-combina33o j3 estava **mais estruturada** que a vis3vel (bari3nica).

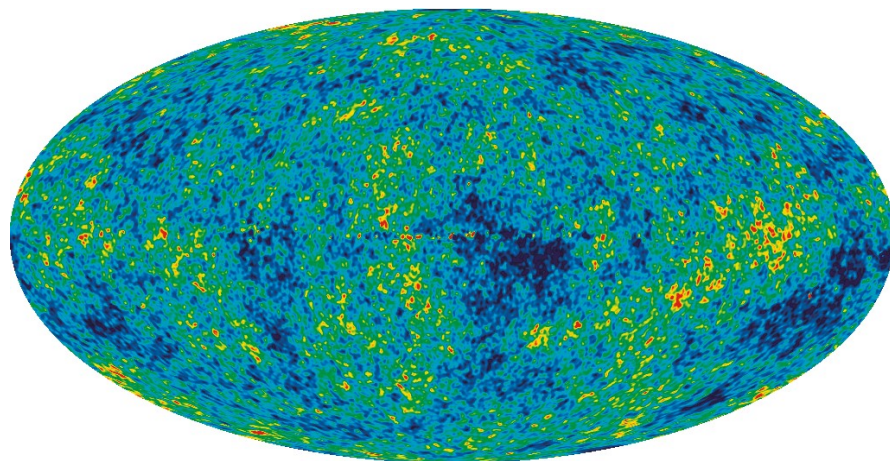


=> Uma **evid3ncia** para a **Mat3ria Escura** n3o-bari3nica.

C3culos detalhados (=> aula Mat3ria Escura) mostram, que esta **Mat3ria Escura** n3o-bari3nica **excede** o montante de **mat3ria bari3nica** por um fator ~5!

# Radiação Cósmica de Fundo

Enquanto esta **matéria não-bariônica**, que praticamente **não interage** com a bariônica (só pela gravitação) já tinha conseguido se **aglomerar**, os **elétrons** e **núcleos atômicos** ainda estavam **interagindo** intensamente com os **fótons** e não conseguiram se aglomerar, resultando na sua extrema **homogeneidade**.



Na re-combinação, a **matéria bariônica** se **desacoplou** dos **fótons** e começou a cair dentro dos **poços** de **potencial gravitacional** da **Matéria Escura**, onde se **formaram** as **galáxias** e **Aglomerados** de galáxias.

(Mais detalhes sobre a formação das estruturas na próxima aula)

# Cosmologia Newtoniana

Na nossa coletânea de **parâmetros cosmológicos** podemos acrescentar a distinção entre **matéria bariônica** (comum, visível) e **Matéria Escura** (não-bariônica):

Constante de Hubble:  $H_0 = 67.7 \text{ km/sMpc}$

$\Rightarrow$  Densidade crítica hoje:  $\rho_{c,0} = 8.63 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$

$\Omega_{\text{mat},0} = 0.31 \Rightarrow \rho_{\text{mat},0} = 0.31 \rho_{c,0} = 2.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$

$\Omega_{b,0} = 0.05 \Rightarrow \rho_{b,0} = 4.2 \cdot 10^{-28} \text{ kg m}^{-3}$  (matéria bariônica)

$\Omega_{\text{DM},0} = 0.26 \Rightarrow \rho_{\text{DM},0} = 2.24 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$

(Matéria Escura não-bariônica)

$\Omega_{\text{rad},0} = 9.1 \cdot 10^{-5} \Rightarrow \rho_{\text{rad},0} = 7.85 \cdot 10^{-31} \text{ kg m}^{-3}$

Parâmetro de desaceleração hoje:  $q_0 = 0.15$

# Radiação Cósmica de Fundo

Os **tamanhos angulares** das **estruturas** na RCF trazem ainda mais informações, por exemplo, sobre a **geometria** do **Universo**, e (ligada a esta), a **densidade** de "tudo" nele.

Isto será tratado em uma segunda aula sobre a RCF, na segunda metade da disciplina.



Universidade Federal do ABC

# Introdução à Cosmologia

## FIM PRA HOJE

