

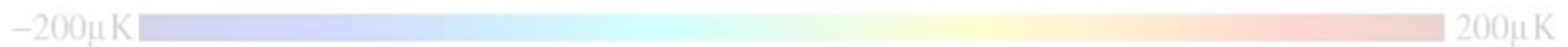


# COSMOLOGIA - I

## Introdução

Carlos Alexandre Wuensche

ca.wuensche@inpe.br





# O que é Cosmologia?

- ✓ Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo
- ✓ Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro.
- ✓ Principais ferramentas utilizadas: Física, Astronomia, Matemática, Química, Filosofia.
- ✓ Problemas... é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos.







# A descrição do Universo

- ☑ Qualquer modelo realista do Universo deve ser capaz de explicar as seguintes observações:
  - A expansão do Universo, dada pela velocidade de recessão das galáxias distantes
  - A observação recente da aceleração da expansão
  - A radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM)
  - A nucleossíntese primordial





# Preliminares – Grandes números

- ✓ Nossa galáxia possui cerca de **100 bilhões ( $10^{11}$ ) de estrelas.**
- ✓ No Universo observável há cerca de  **$10^{11}$  galáxias.**
- ✓ No Universo observável há, portanto, cerca de  **$10^{22}$  estrelas**
- ✓ Um balde cheio de areia possui cerca de **1 bilhão de grãos de areia.**
- ✓ Cem baldes cheios de areia terão  **$10^{11}$  grãos de areia** que é igual ao número de estrelas na galáxia.
- ✓ Em todas as praias do mundo há cerca de  **$10^{23}$  grãos de areia.**
- ✓ Número de células no corpo humano:  $10^{14}$
- ✓ Número de átomos em um grama:  $6 \times 10^{23}$
- ✓ Número de átomos no corpo humano:  $6 \times 10^{23} \times (100 \times 10^3 \text{ g}) = 6 \times 10^{28}$
- ✓ **Número de prótons no Universo observável -  $10^{78}$**







# Em consequência...

- ☑ As unidades “padrão” não são adequadas... o metro é curto, o quilo é “leve” e o segundo é “breve”...
- ☑ Em cosmologia lidamos com
  - $10^9$  anos (Giga-anos)
  - $10^9$  parsec (Gigaparsec) =  $10^9 \times 3,26 \times 10^{18}$  cm
  - $10^{15}$  massas solares (massa de superaglomerados)
- ☑ Estranhamente, também lidamos com coisas muito pequenas, no Universo jovem, e “igualamos” massa a energia....





# Sistema Planckiano de unidades

☑ Baseado nas constantes universais  $G$ ,  $k$ ,  $\hbar$  ( $=h/2\pi$ ),  $c$ ...

➤ Comprimento de Planck:  $l_P = \left(\frac{G\hbar}{c^3}\right)^{1/2} = 1,6 \times 10^{-33} \text{ cm}$

➤ Massa de Planck  $M_P = \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{1/2} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ g}$

➤ Tempo de Planck  $t_P = \left(\frac{G\hbar}{c^5}\right)^{1/2} = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s}$

➤ Energia de Planck  $E_P = M_P c^2 = 1,2 \times 10^{28} \text{ eV}$

➤ Temperatura de Planck  $T_P = E_P / \kappa = 1,4 \times 10^{32} \text{ K}$

**Medindo as grandezas físicas em unidades de Planck adequadas,  $c = k = h/2\pi = G = 1$ !!!!**



# COSMOLOGY MARCHES ON



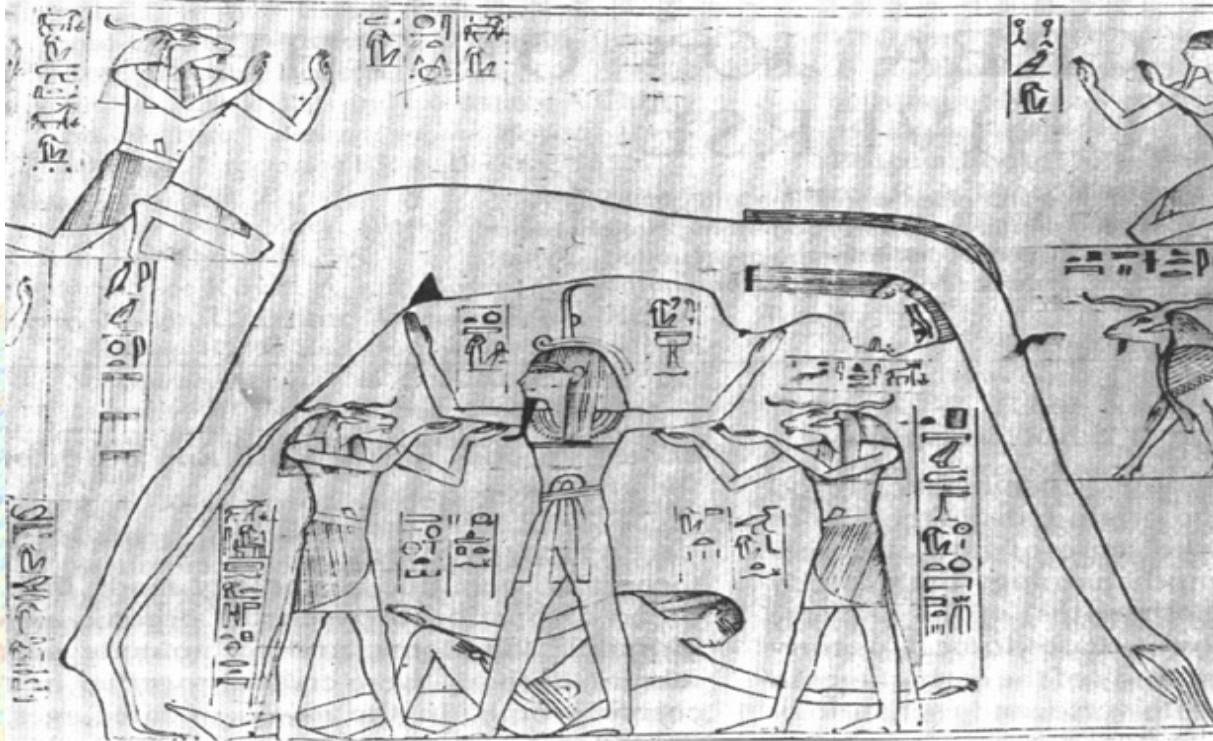


# UM POUCO DE HISTÓRIA...





# Uma visão do Universo por volta de 2000 AC



O deus-sol Ra criou a si mesmo, juntou-se a sua sombra e tornou-se pai de gêmeos, Shu, o deus do ar, e Tefnut, a deusa da chuva. Shu e Tefnut uniram-se e também tiveram gêmeos, o deus-terra Geb e a deusa-céu Nut. Geb e Nut por sua vez uniram-se, mas o avô, Ra, zangado e ciumento ordenou que Shu os separasse e que mantivesse Nut bem acima da Terra, como convém a uma deusa-céu. Desde então, Nut toca a Terra somente com as pontas de seus dedos das mãos e dos pés. Sua barriga, coberta de estrelas, que são seus filhos, formam o arco do firmamento.

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K



# O tempo de Ptolomeu



O modelo Ptolomaico, com as esferas concêntricas, e as "estrelas distantes" como o limiar do Universo, predominou por mais de 1000 anos.



# Uma visão do Universo por volta de 1000 AC

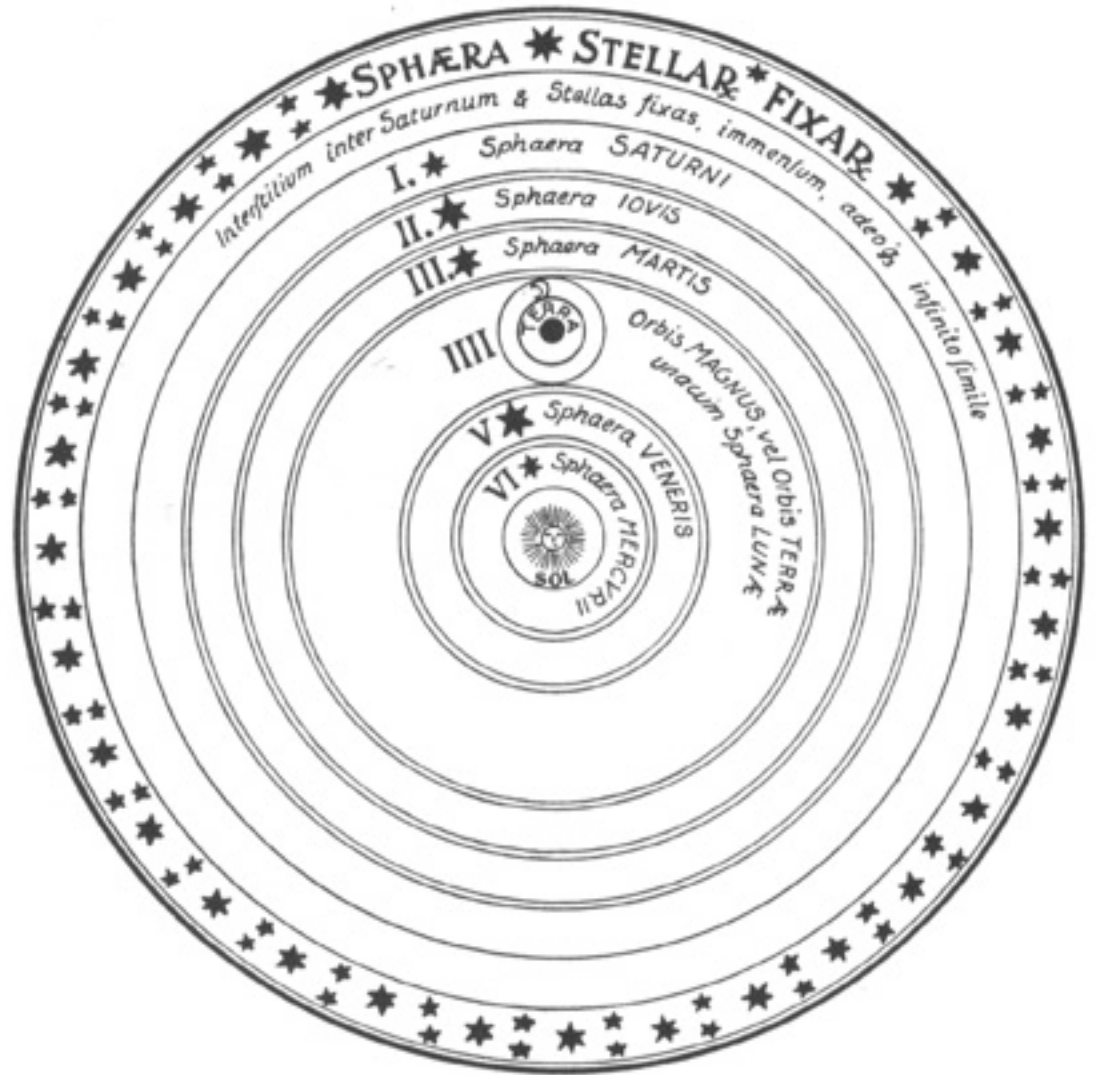


Nessa época os modelos de Universo consideravam que a Terra estava no centro de tudo e que o céu era uma tampa com buracos. A luz proveniente de fogos ardendo no lado de fora brilharia através dos buracos e alcançaria a Terra como a luz das estrelas.

# Uma visão do Universo por volta de 1500 AC



Niclas Kopernik  
(1473 – 1543)



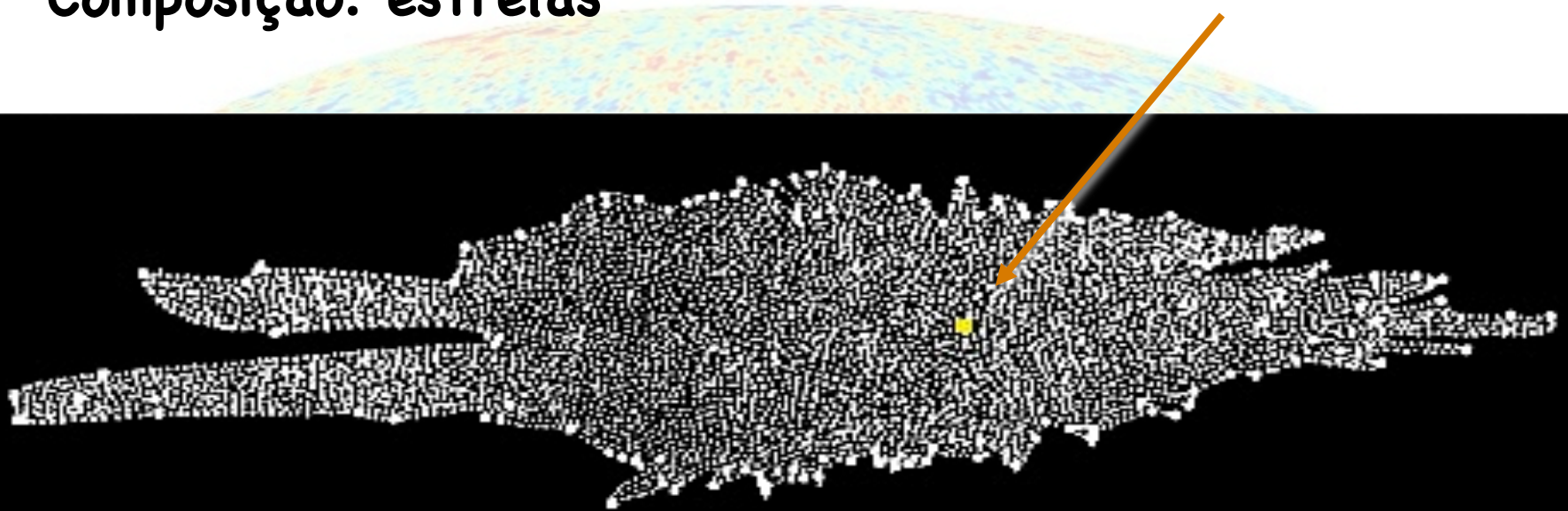




# Uma visão do Universo por volta do final do séc. XIX

Composição: estrelas

Sistema Solar



30,000 anos luz

Origem: ?

William Herschel  
(1738-1822)

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

Uma visão do  
Universo no séc.

XXI





# Uma comparação com a Cosmologia do Séc. XIX

## ☑ Final do século XIX e início do século XX

- Observação: telescópios ópticos e chapas fotográficas
- Universo "restrito" à Galáxia ( $\sim 100$  kpc)
- Descrição do Universo: Física Clássica (Eletromagnetismo, Mecânica Clássica e Termodinâmica)

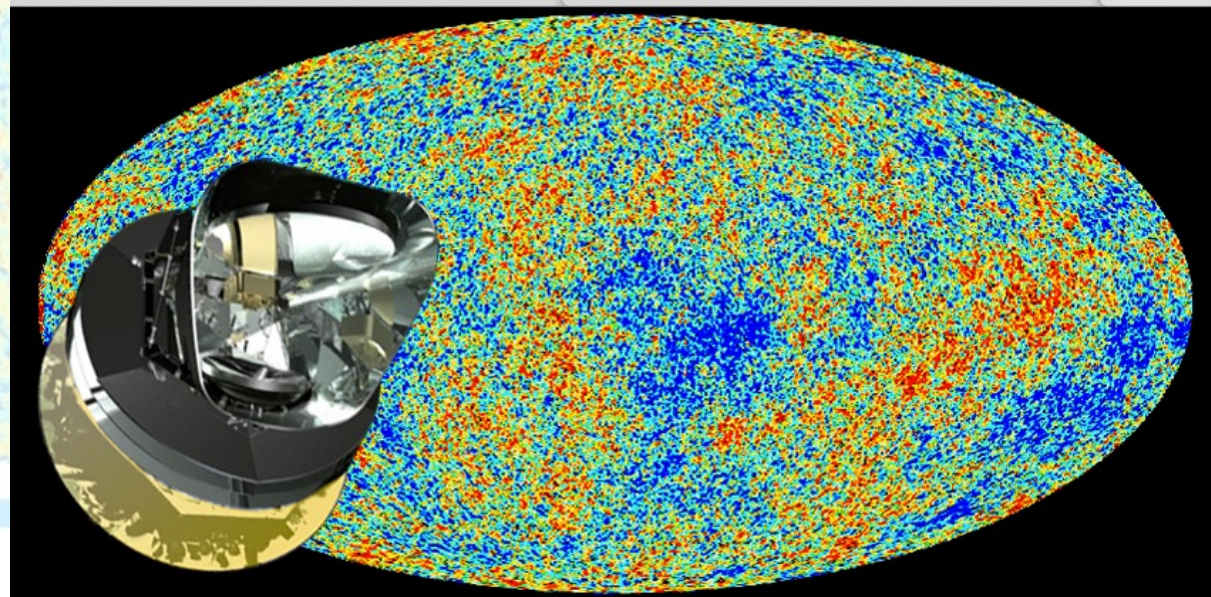
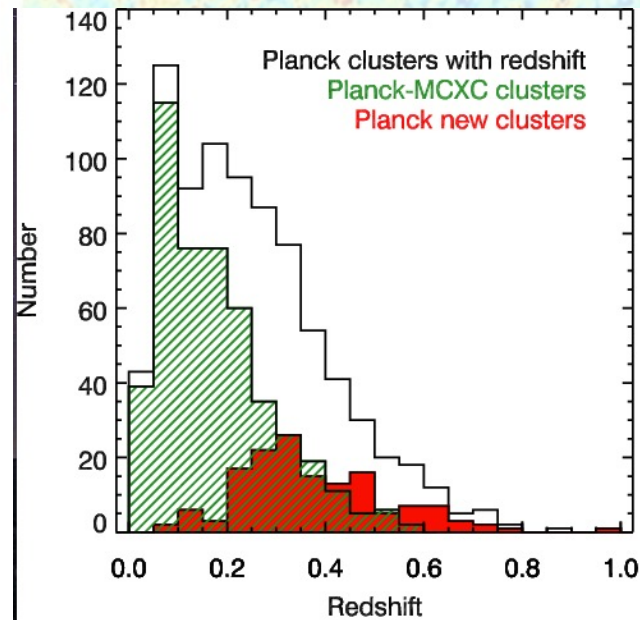
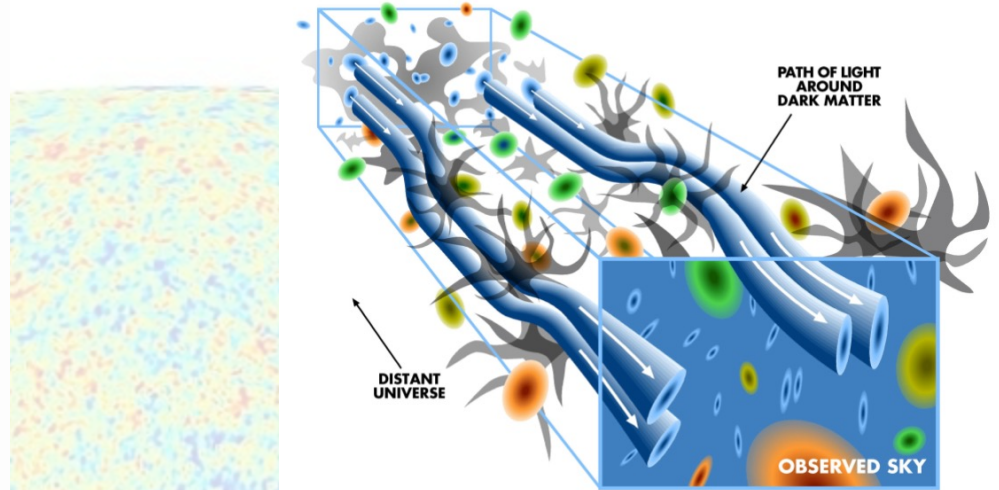
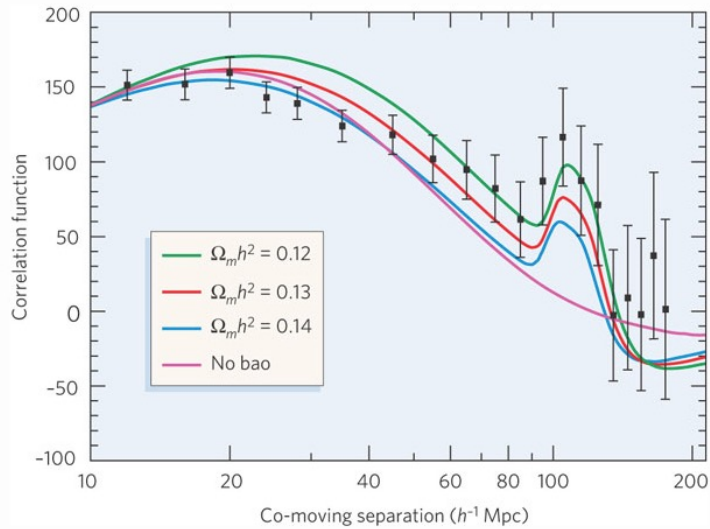
## ☑ Início do século XXI

- Observação: de comprimentos de onda em rádio a raios cósmicos
- Universo observável:  $\sim 3000$  Mpc
- Descrição do Universo: Relatividade Geral + Física de Partículas Elementares + Teoria de Campos





# Cosmologia no séc. XXI







# Questões importantes em 2021

- ✓ O que gerou a assimetria bariônica? Por que há uma quantidade desprezível de antimatéria e o que define a proporção de bárions para fótons?
- ✓ O que é a matéria escura? É uma partícula supersimétrica massiva primordial ou algo (ainda) mais exótico?
- ✓ O que é a energia escura? É a constante cosmológica de Einstein ou é um fenômeno dinâmico com um grau de evolução observável?
- ✓ A inflação aconteceu? Podemos detectar resíduos de uma fase inicial de expansão dominada pelo vácuo?
- ✓ A cosmologia padrão é baseada nos princípios físicos corretos?
- ✓ As características, como artefatos de energia escura, de uma lei da gravidade diferente, talvez estejam associadas a dimensões extras?
- ✓ As constantes fundamentais podem realmente variar?



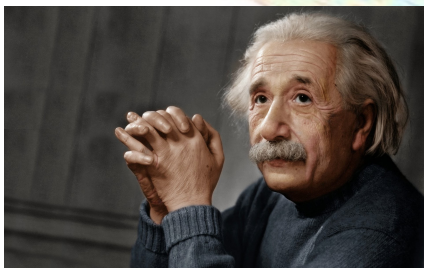


# O modelo cosmológico padrão - MCP



- ✓ Idade do Universo: ~ 14 bilhões de anos
  - ✓ Composição: matéria bariônica, matéria escura, energia escura
  - ✓ Dinâmica descrita pela Teoria Geral da Relatividade e Métrica de Robertson-Walker
- 
- ✓ Suporte observacional
    - Expansão do Universo
    - Composição do Universo (nucleossíntese primordial)
    - Existência da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (em inglês, CMB ou CMBR)
    - Aceleração da expansão do Universo

Einstein



200 $\mu$ K



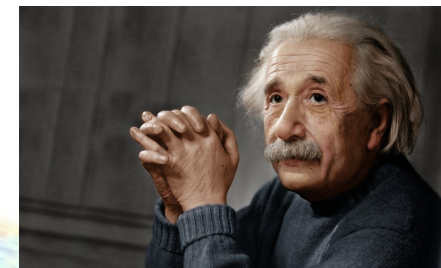
# O universo observável

- ☑ Podemos olhar para as observações que dão suporte ao MCP de duas formas:
  - Através de observáveis que definem as escalas de tamanho das quais o Universo se ocupa (SN Ia, aglomerados de galáxias, grandes estruturas, RCF)
  - Através do estudo das componentes e processos físicos que permitem identificar as diferentes fases do Universo (matéria bariônica e escura, antimatéria, energia escura, “resíduos” do Big Bang, expansão e idade do Universo)



# O modelo cosmológico padrão – MCP

- ✓ A cosmologia moderna parte de algumas hipóteses de trabalho.
  - As leis da física válidas no sistema solar valem também para o resto do Universo.
  - As leis da física podem também ser extrapoladas para o passado.



Alexander  
Friedmann

- ✓ Princípio de Copérnico: não ocupamos um lugar privilegiado – somos observadores comuns..
- ✓ Princípio Cosmológico: o Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico.
  - isotropia local + homogeneidade = isotropia global
- ✓ Gravitação é dominante em grandes escalas: alcance das interações fraca e forte  $\sim 10^{-13}$  cm.
- ✓ Embora  $e^2/GM_p^2 \gg 1$ , os grandes agregados são eletricamente neutros.

Georges  
Lemaître

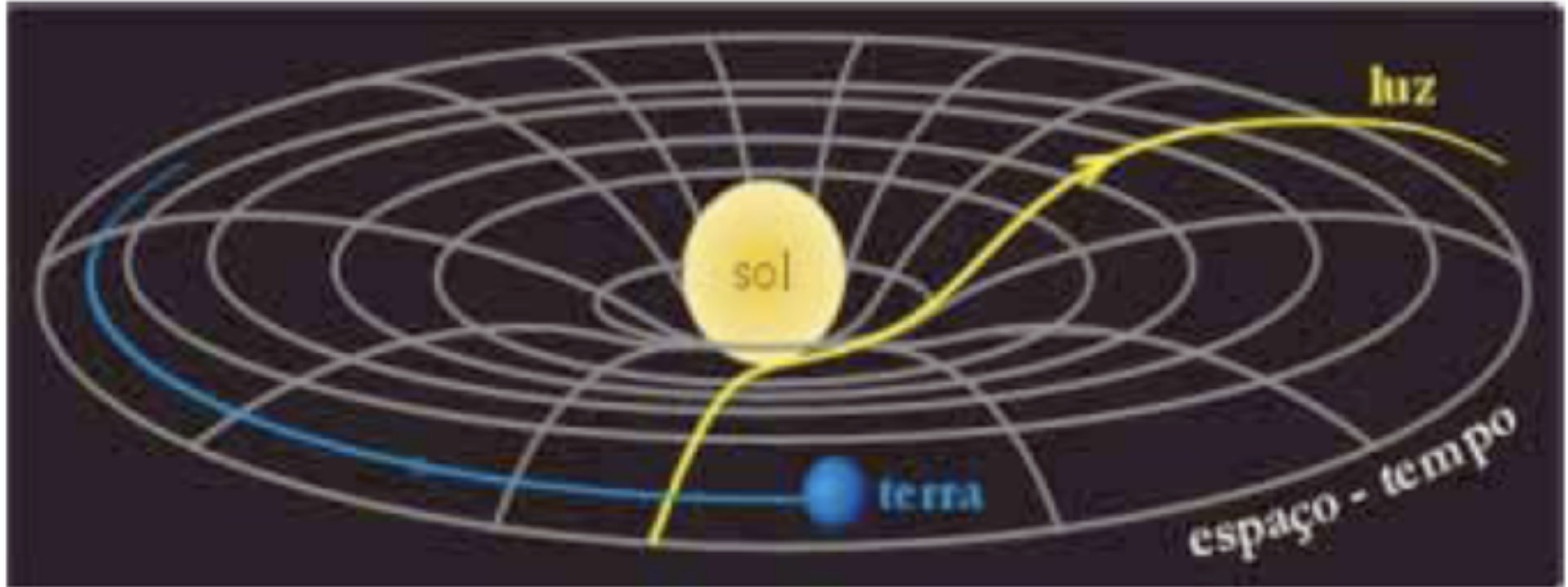


-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K



# As equações do MCP



Métrica de Robertson-Walker

(define um espaço-tempo maximamente simétrico).

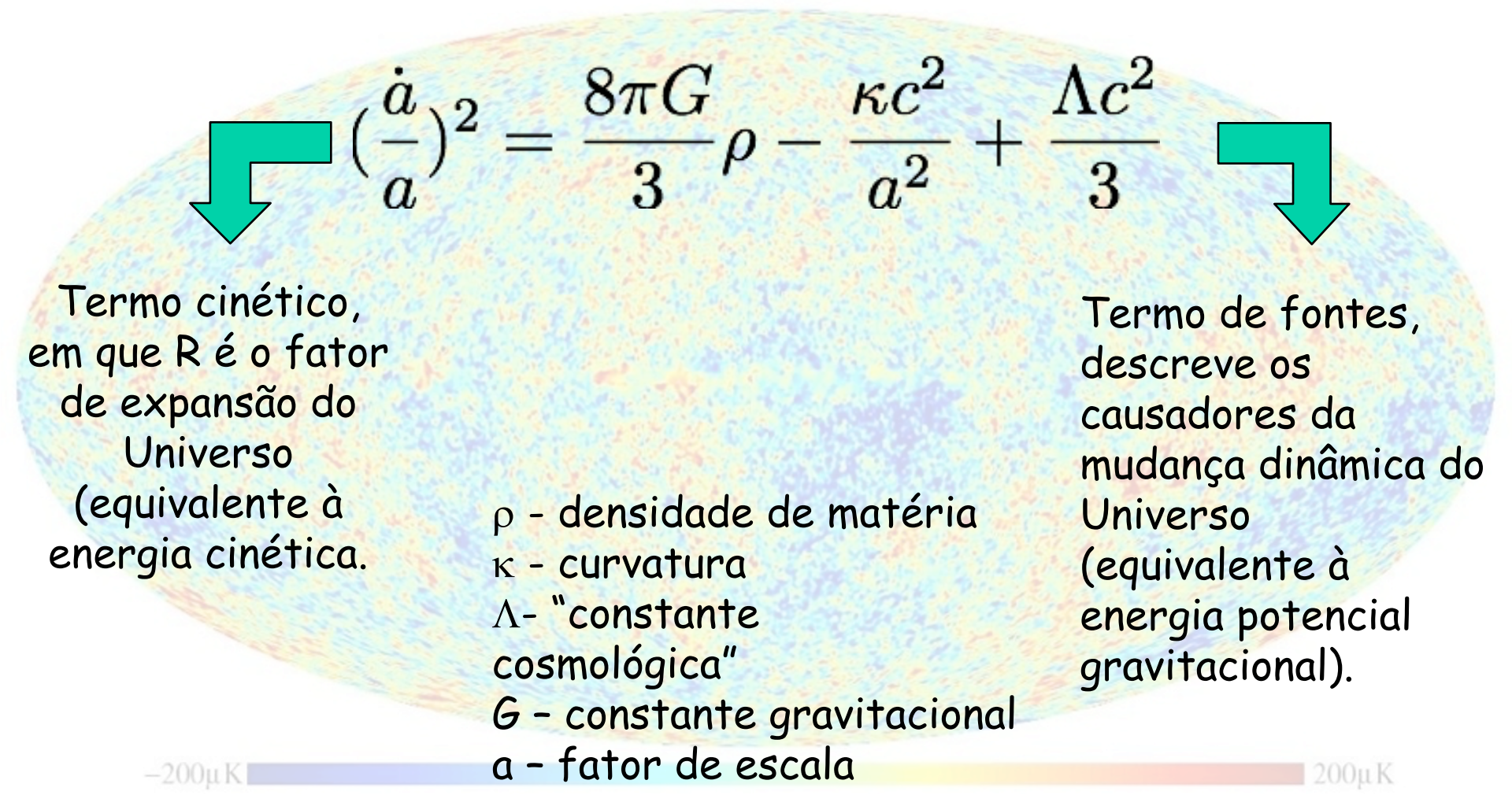
$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[ \frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$

Fator de escala, define a expansão do Universo

Coordenadas esféricas, com o termo de curvatura  $\kappa$

# As equações do MCP

## Equações de Einstein-Friedmann


$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{\kappa c^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Termo cinético,  
em que  $R$  é o fator  
de expansão do  
Universo  
(equivalente à  
energia cinética).



$\rho$  - densidade de matéria  
 $\kappa$  - curvatura  
 $\Lambda$  - "constante  
cosmológica"  
 $G$  - constante gravitacional  
 $a$  - fator de escala

Termo de fontes,  
descreve os  
causadores da  
mudança dinâmica do  
Universo  
(equivalente à  
energia potencial  
gravitacional).



# As equações do MCP

- Equações de Einstein-Friedmann


$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$


Termo dinâmico, envolve uma aceleração

$\rho$  - densidade de matéria  
 $p$  - pressão do fluido  
 $\Lambda$  - "constante cosmológica"  
 $G$  - constante gravitacional  
 $R$  - fator de escala  
 $c$  - velocidade da luz

Termo de fontes, contém implicitamente a 1a. Lei da Termodinâmica.



# Evolução Cósmica

Relatividade Geral  
(Einstein)

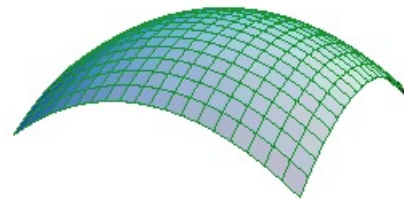
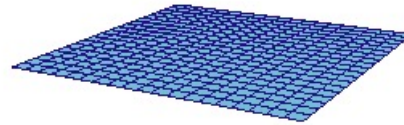
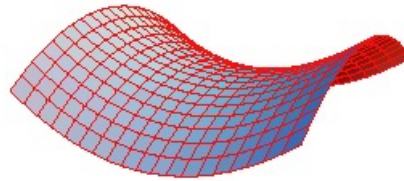
$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m - \rho_k$$

expansão

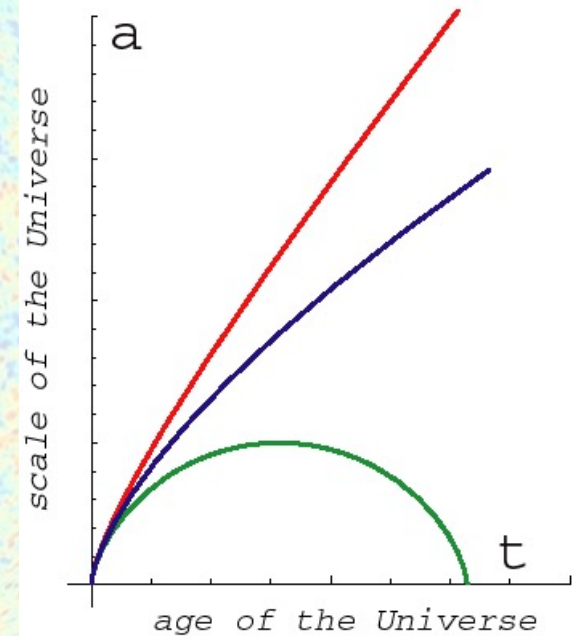
matéria

curvatura

Geometria



Cosmologia



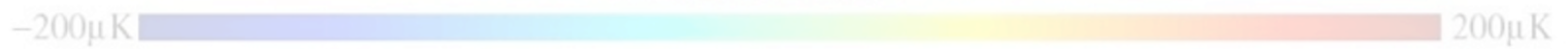
-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

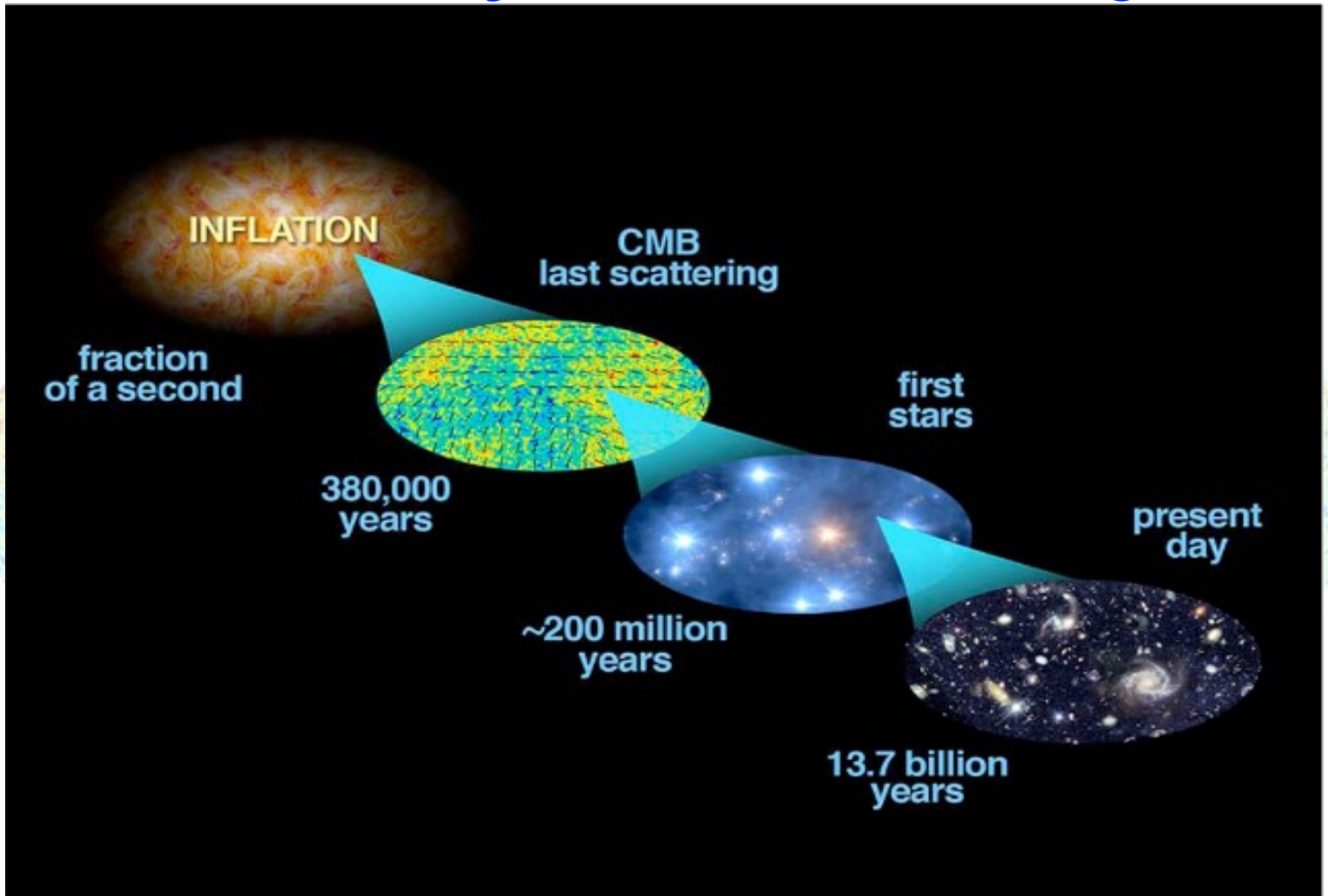




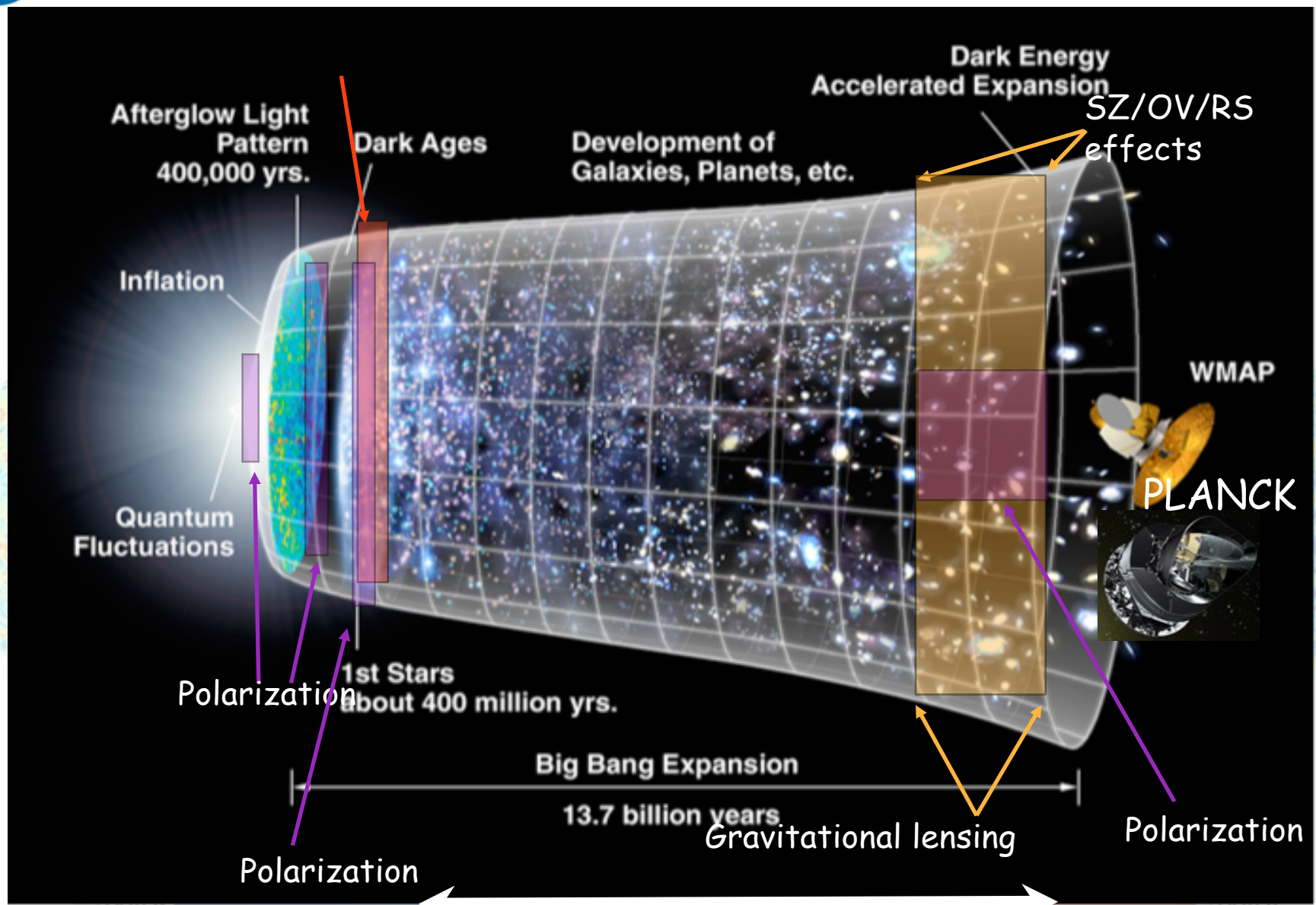
# OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS



# Observações em Cosmologia









# OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS

## O paradoxo de Olbers





# Por que o céu é escuro à noite?

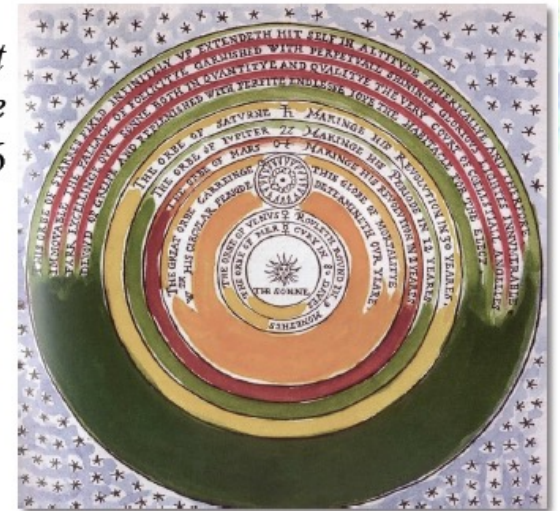
- ☑ Se o universo é infinito e possui infinitas estrelas, porque o céu é escuro à noite? Paradoxo de Olbers!!!! (Heinrich Olbers, 1823)
- ☑ A questão foi proposta, na verdade, por Thomas Digges em 1576
- ☑ Com muitas estrelas no céu, para onde quer que olhemos, haverá alguma para interceptar nossa linha de visada...

Cunningham,  
*The Cosmological  
Glass*, 1559



Estrelas fixas na esfera celeste: não há paradoxo

Digges, *A Perfect  
Description of the  
Celestial Orbs*, 1576



Estrelas distribuídas num universo infinito: há paradoxo!

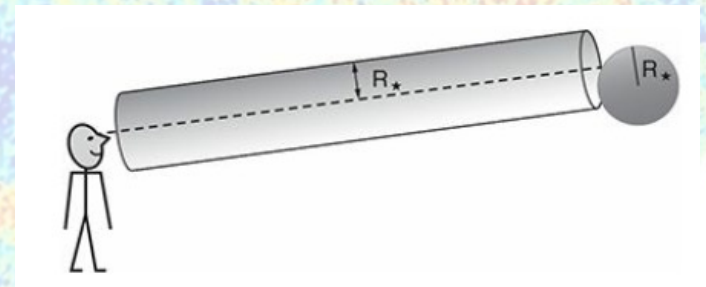
200µK

## ✓ Hipóteses para cálculo da luminosidade do céu sob o paradoxo de Olbers....

- $n_* = 10^9$  estrelas/Mpc<sup>3</sup>;  $L_* = L_{sol}$ ;  $R_* = R_{sol}$  ( $\sim 2 \times 10^{-14}$  Mpc)
- Com a densidade e dimensões estimadas para a estrela, o número total de estrelas visto no volume de um cilindro em olhamos para o céu é dado por  $N = n_* V = n_* (d \cdot \pi R_{sol}^2)$

Qual é a distância medida em que poderemos ver **UMA** estrela, com esses valores?

$d \sim 10^{18}$  Mpc (distância muito grande, mas não infinita)



Mas os brilhos superficiais do céu e do Sol são muito diferentes!!!!

$$B_{\odot} = 5 \times 10^{-3} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{arcsec}^{-2}$$

$$B_{ceu} = 5 \times 10^{-17} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{arcsec}^{-2}$$

-200μK

200μK



- ☑ Se há uma diferença tão grande entre os brilhos, há algum erro no “paradoxo” do céu escuro à noite... As hipóteses são:
- Estrelas distantes são obstruídas por material opaco (não funciona a longo prazo.)
  - O universo tem tamanho finito:  $r \ll 10^{18}$  Mpc (ou as estrelas ocupam apenas um volume finito.)
  - Estrelas distantes têm baixo brilho superficial
  - O universo tem idade finita:  $ct \ll 10^{18}$  Mpc (ou estrelas existiram por um tempo finito.)





# OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS

Homogeneidade e isotropia





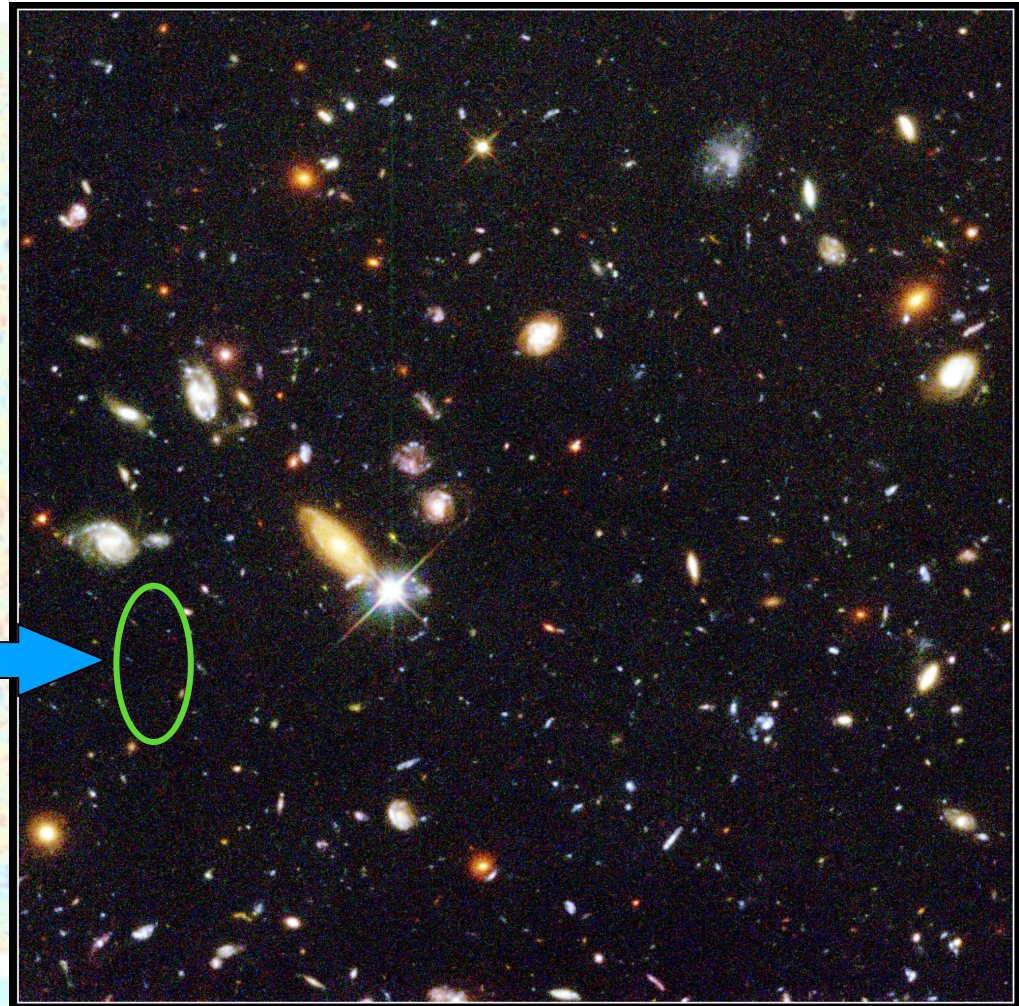
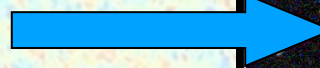


# Uma visão do Universo no séc. XXI

Hubble Deep Field  
([www.nasa.gov](http://www.nasa.gov))

100 bilhões  
em todo o céu

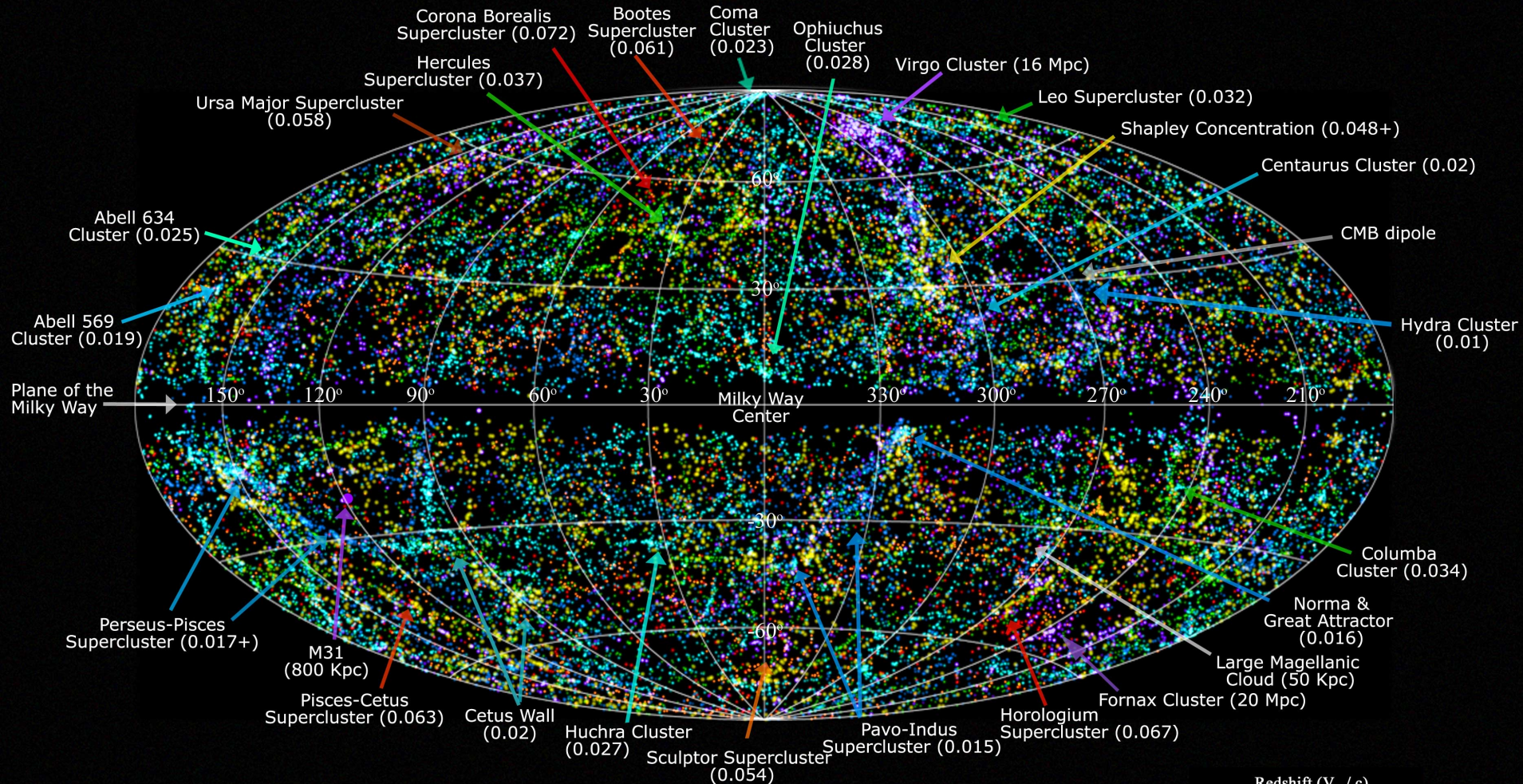
30.000  
galáxias aqui



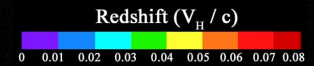
-200 $\mu$ K



# 2MASS Redshift Survey



**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by the 2MRS redshift (Huchra et al 2011); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).

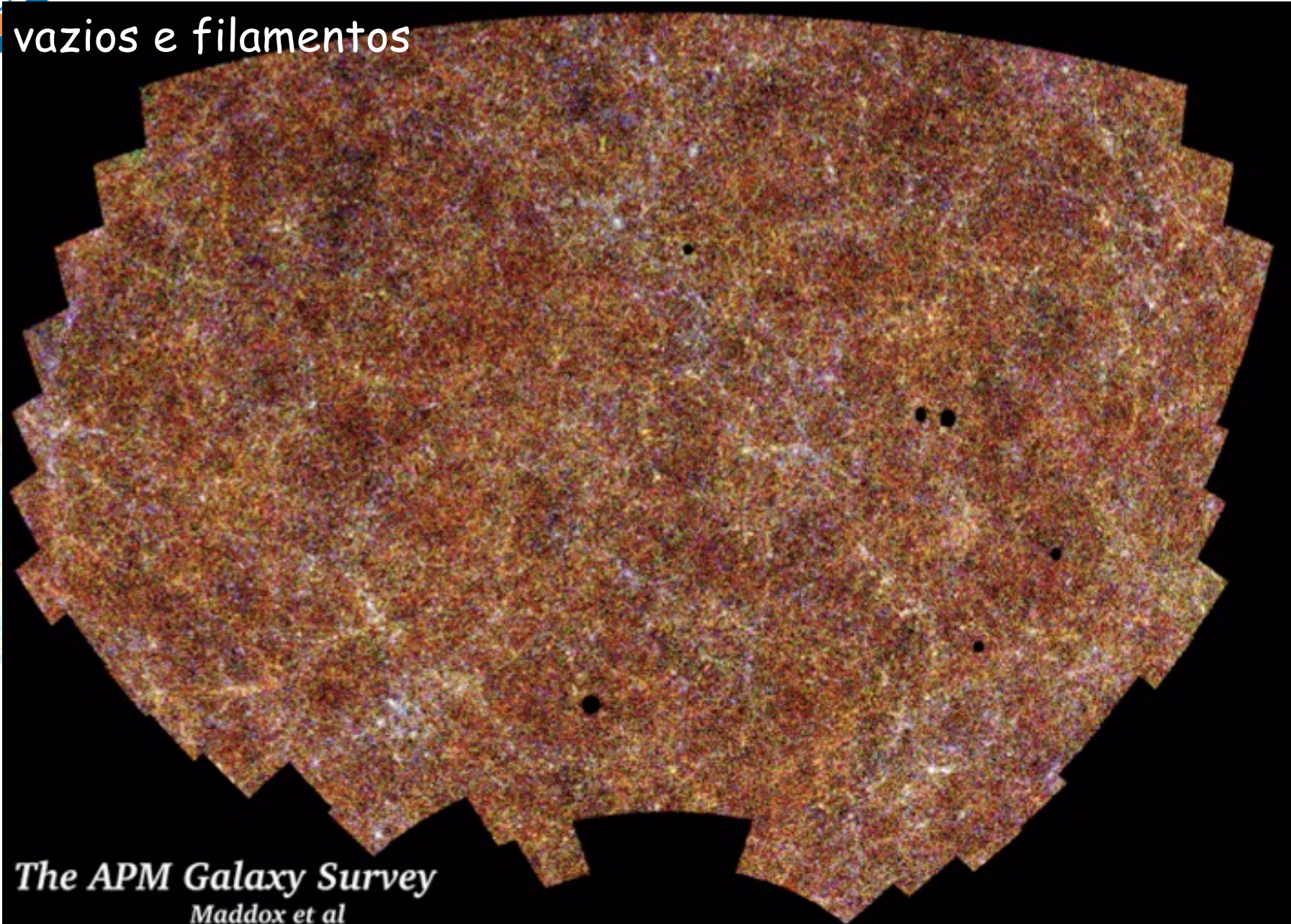


Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)





vazios e filamentos

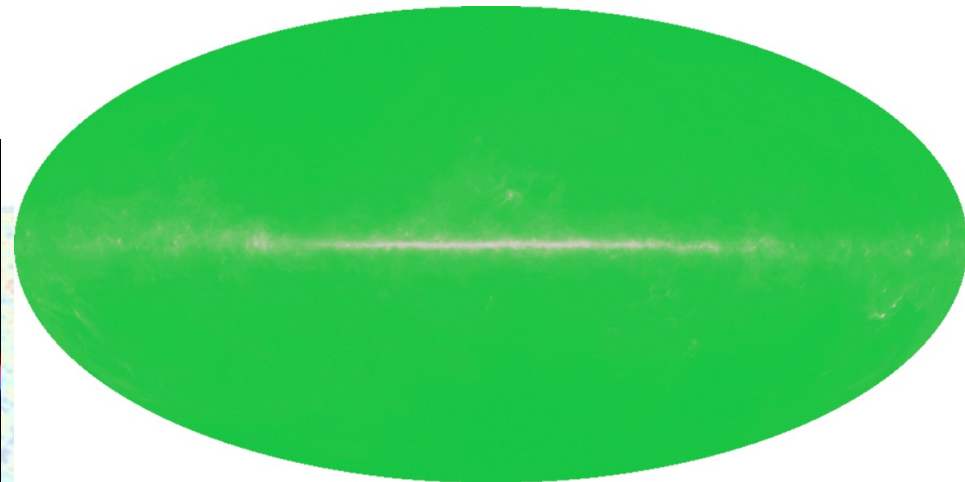


*The APM Galaxy Survey*  
Maddox et al

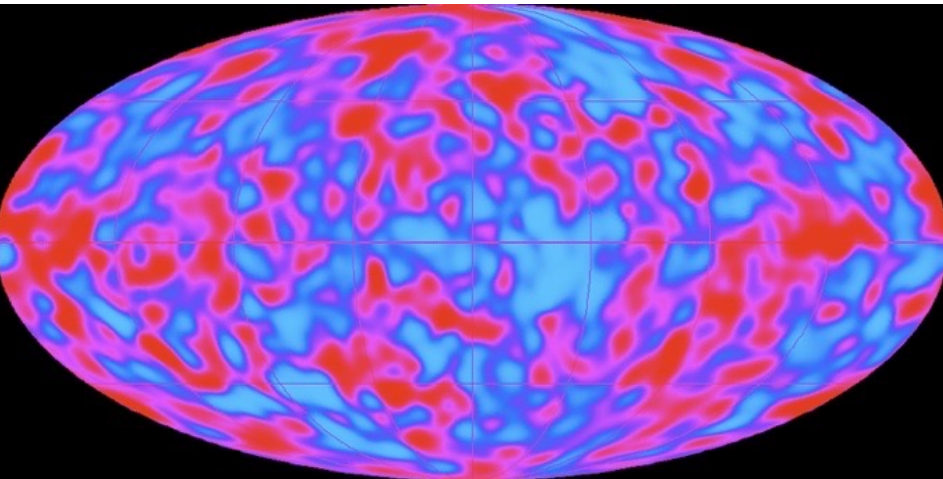




**Medida de Penzias e Wilson  
(1965, simulado)**



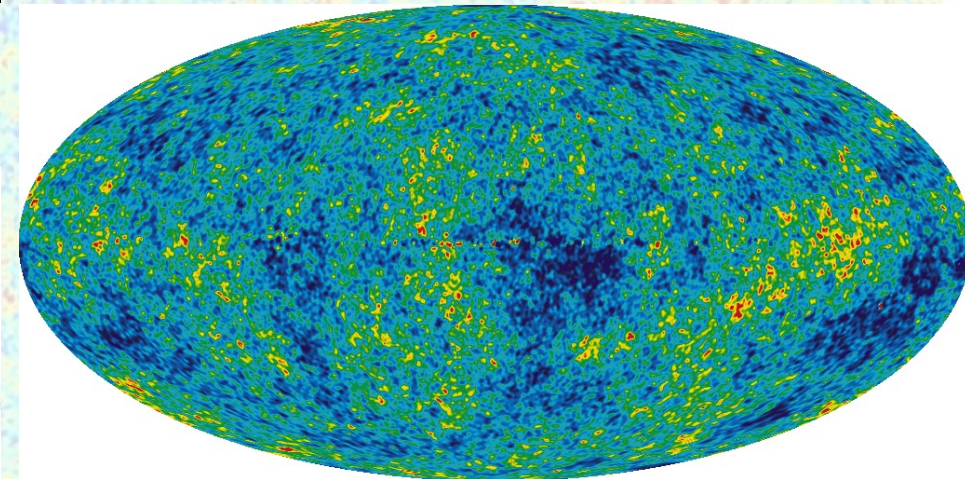
**Satélite COBE (1996)**



**Satélite WMAP (2011)**



**Satélite Planck (2018)**



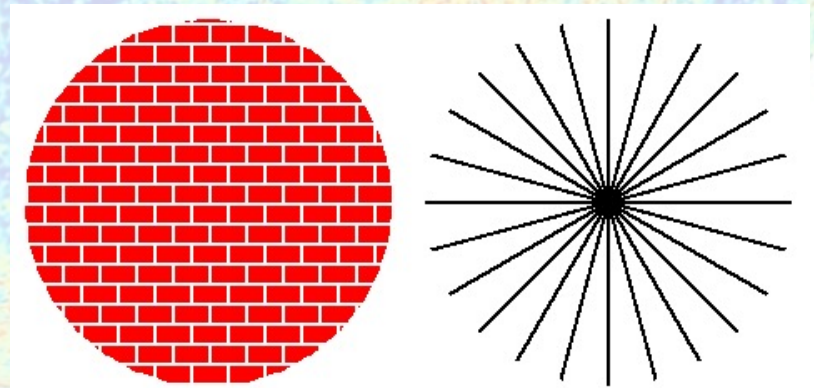
200 $\mu$ K



# Homogeneidade e isotropia

- ☑ Homogeneidade: todos os pontos do espaço, em grande escala, são equivalentes (não há localização preferencial)
- ☑ Isotropia: mesmas propriedades vistas a partir da posição do observador (não há direção preferencial)
- ☑ Isso só vale para escalas MUUUUITO GRANDES (>100 Mpc)
- ☑ Homogeneidade não implica em isotropia...

Isotropia em 2 ou mais pontos do Universo implica em homogeneidade!



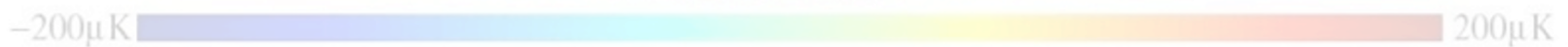
Homogêneo e anisotrópico

Não-homogêneo e isotrópico



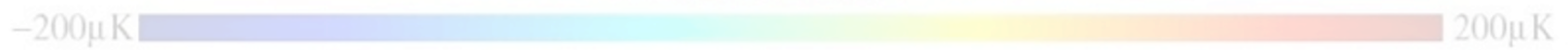
# O suporte observacional do MCP...

- ☑ Qualquer modelo realista do Universo deve ser capaz de explicar:
  - A expansão do Universo
  - A nucleossíntese primordial
  - A radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM)
  - A aceleração da expansão



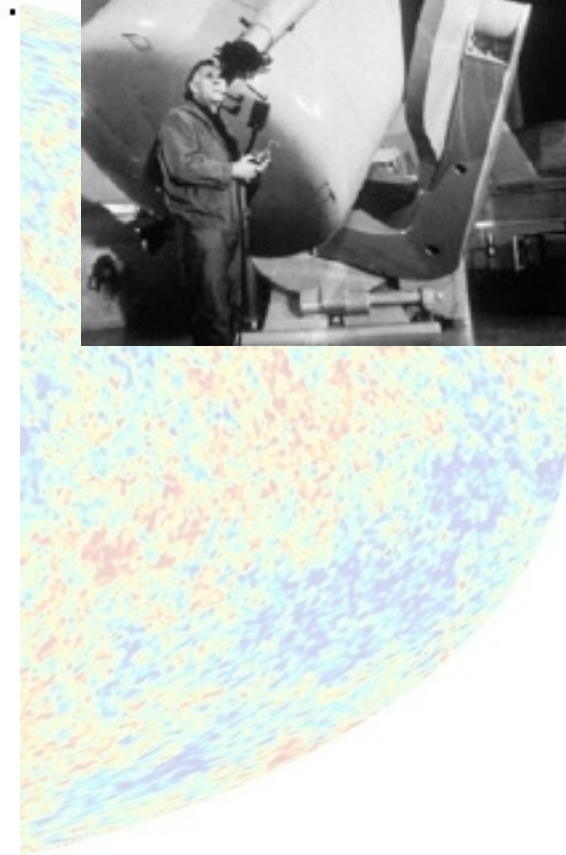
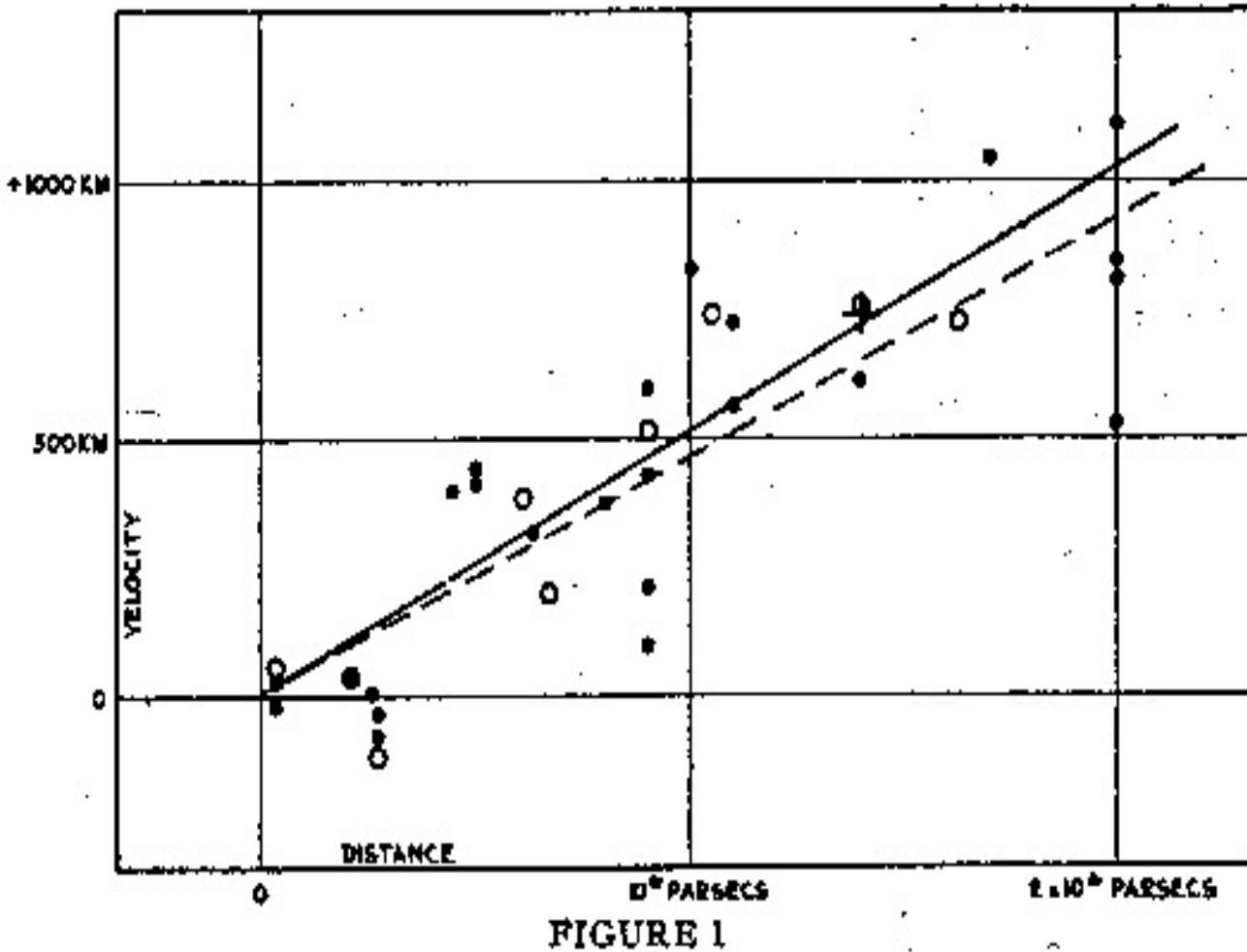


# A EXPANSÃO DO UNIVERSO



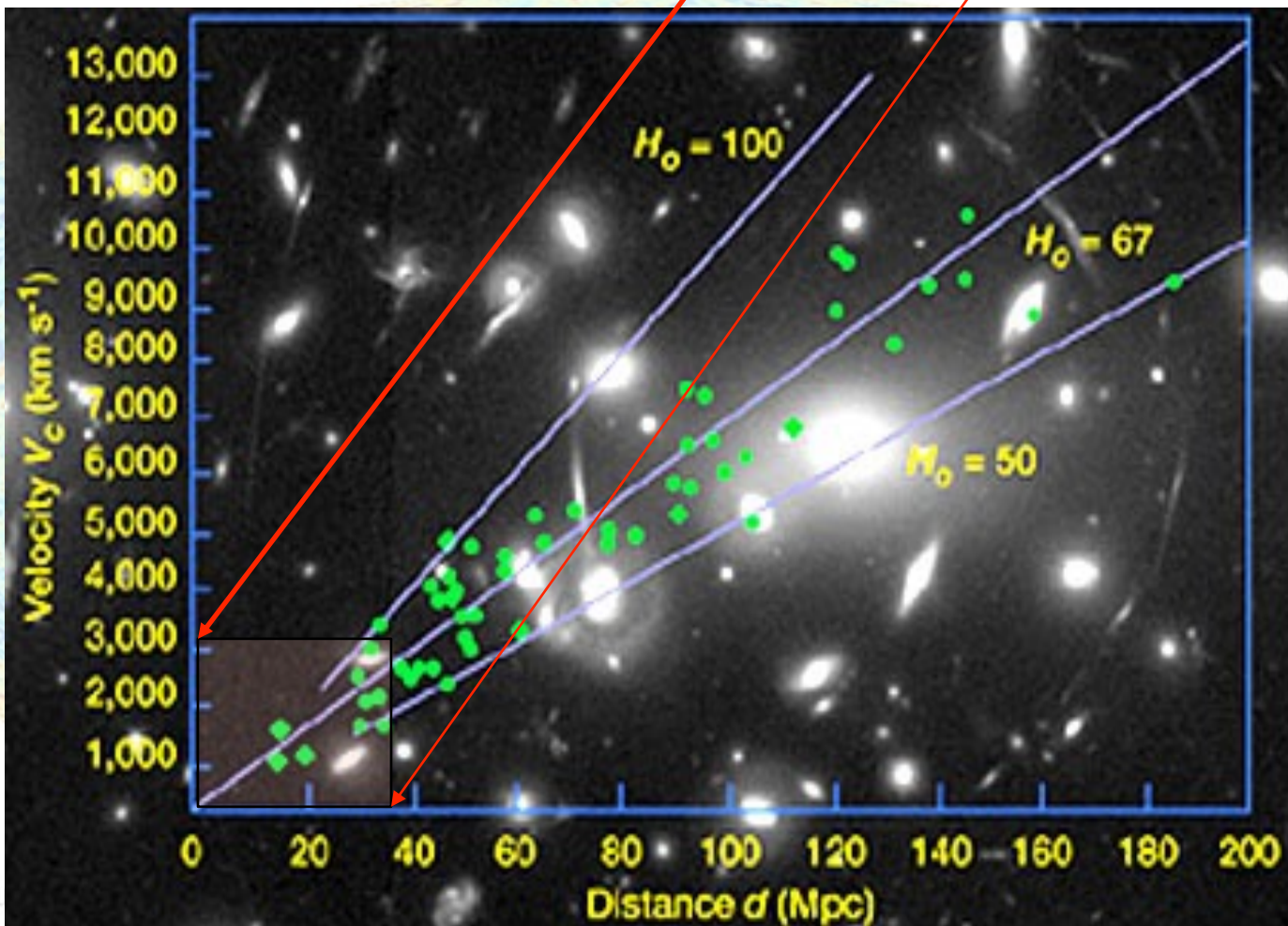
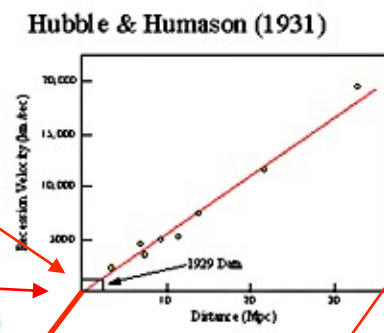
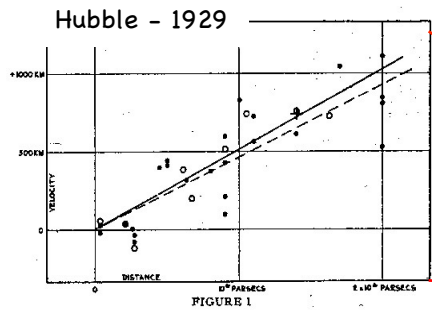
# A expansão do Universo

Hubble - 1929



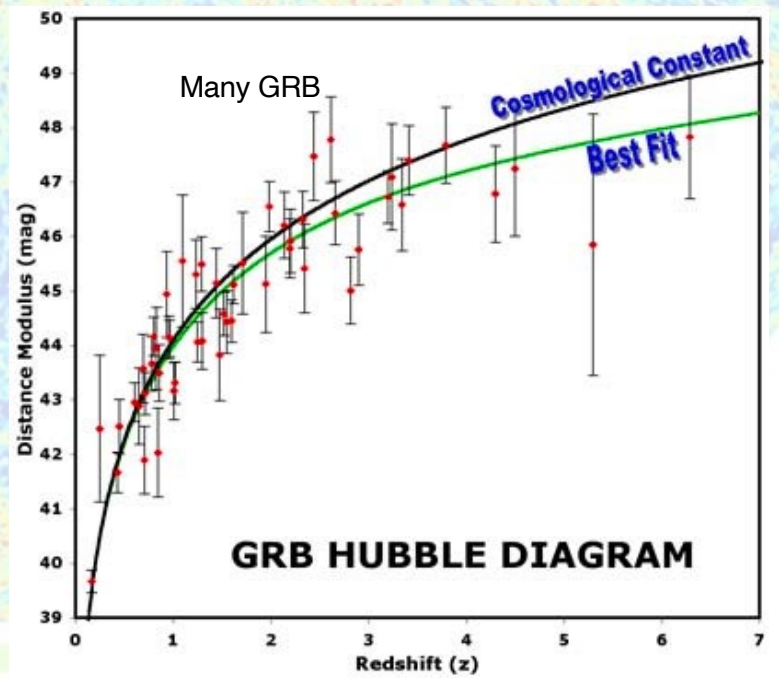
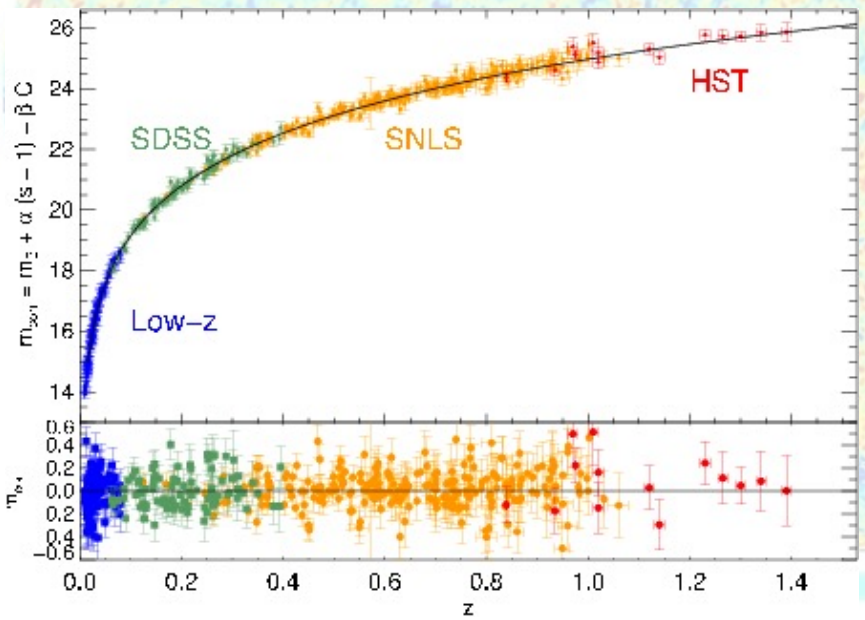
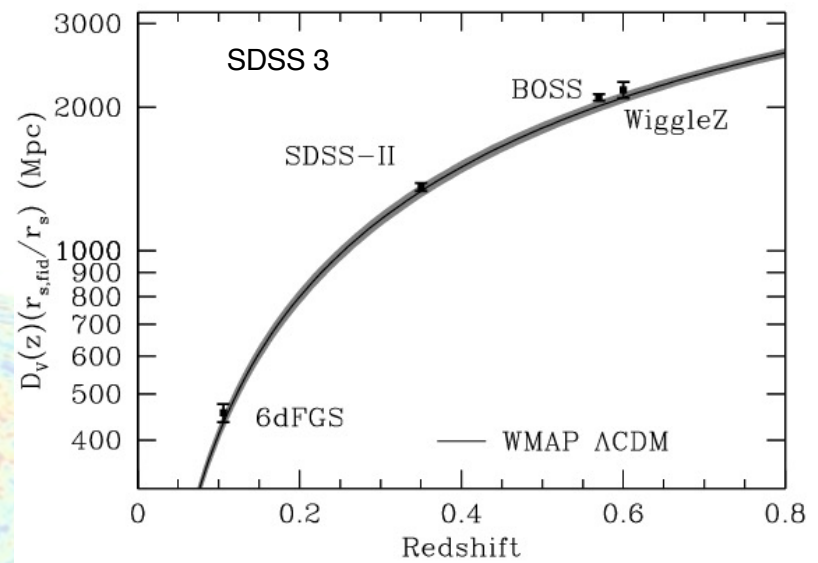
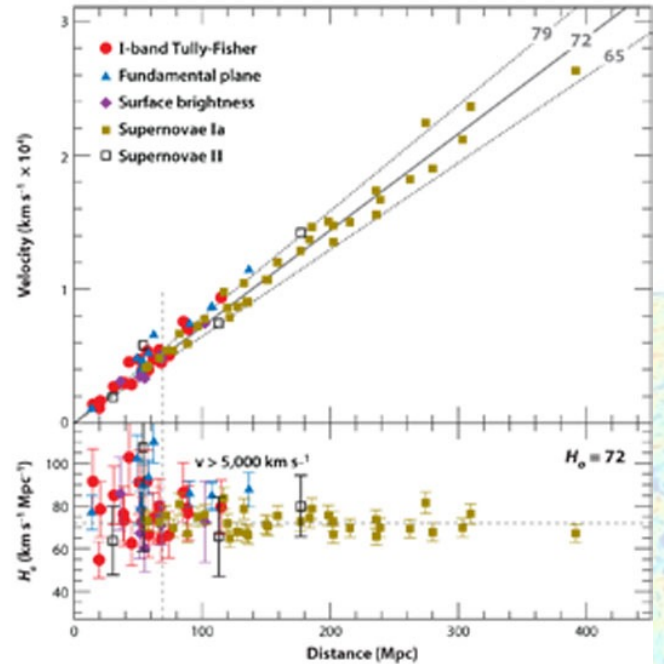
200 $\mu$ K





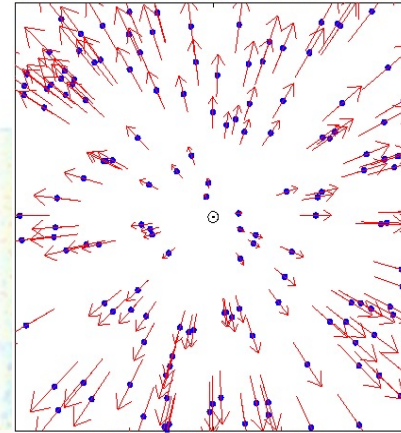


# Cepheid Key Project (Freedman 2001)

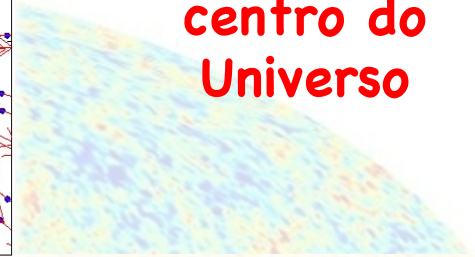




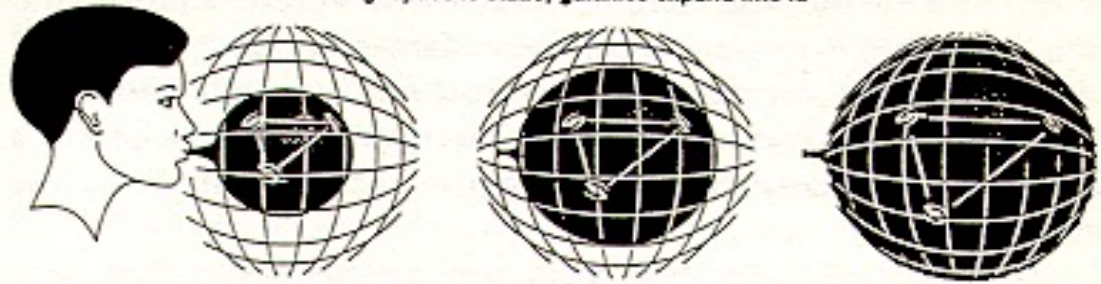
# A lei de Hubble



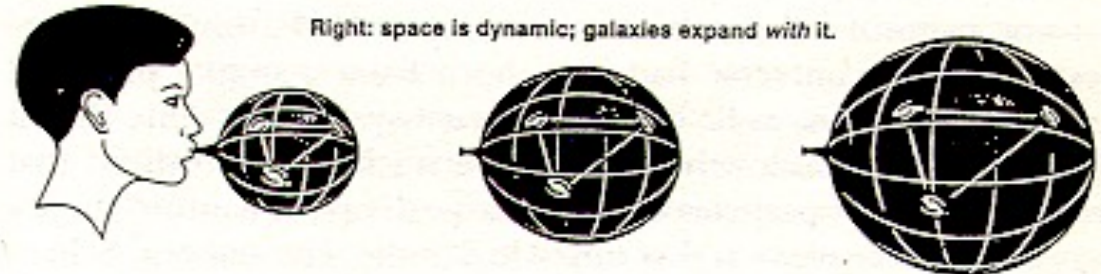
**Não há  
centro do  
Universo**



Wrong: space is static; galaxies expand into it.



Right: space is dynamic; galaxies expand with it.



Lei de Hubble:  $v = H_0 d$

-200  $\mu$ K

200  $\mu$ K

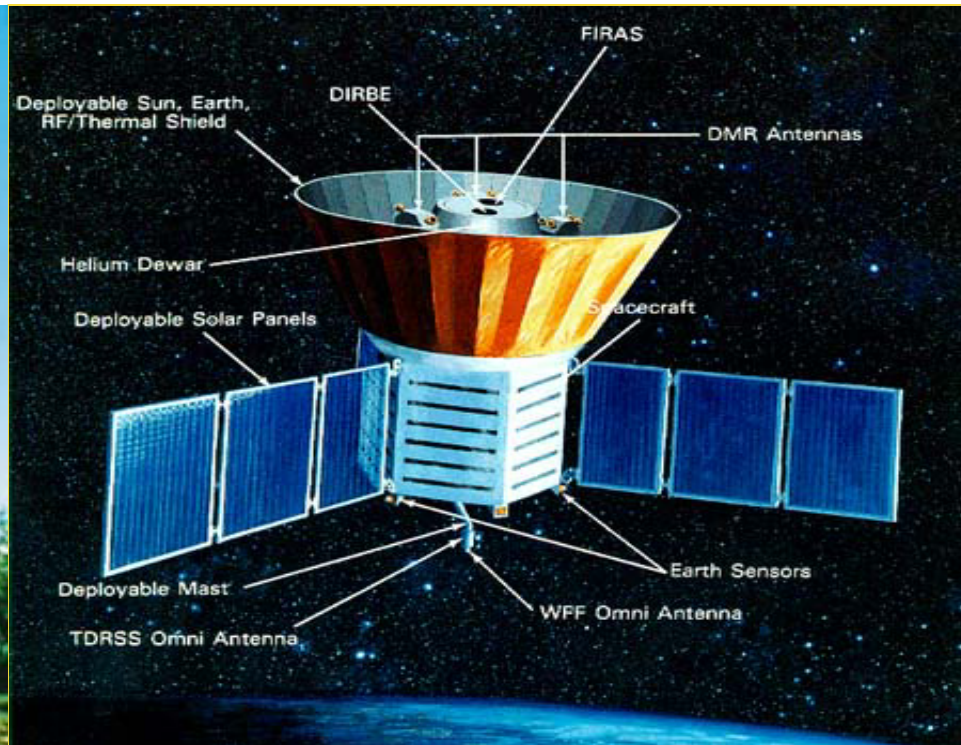
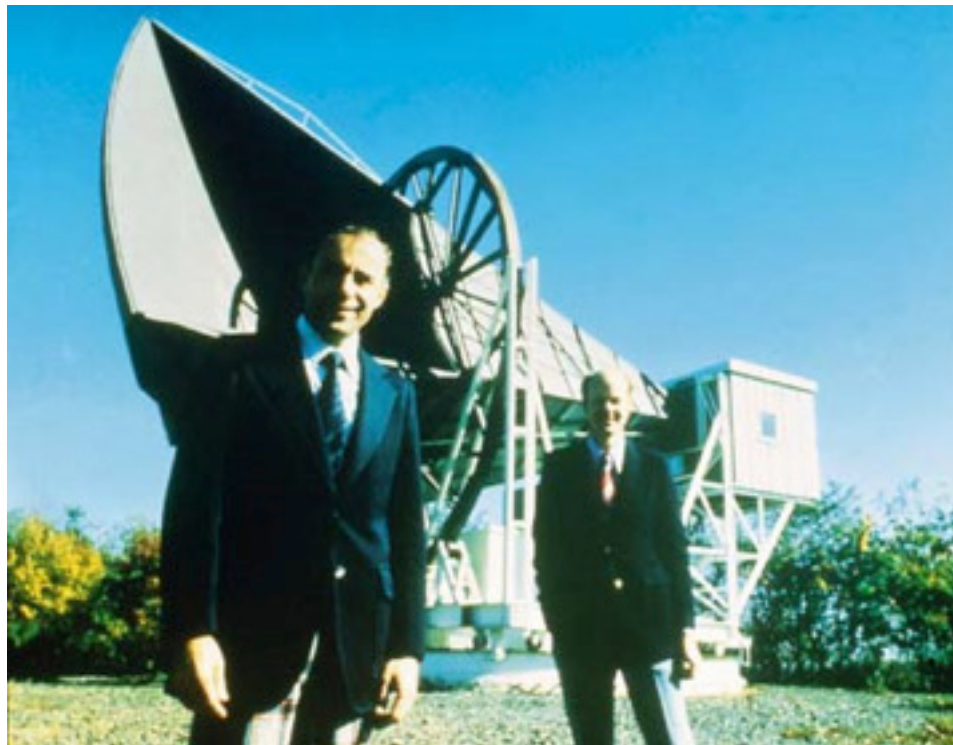
# A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS







# A Radiação C3smica de Fundo em Microondas (RCFM)



A. Penzias e R. Wilson

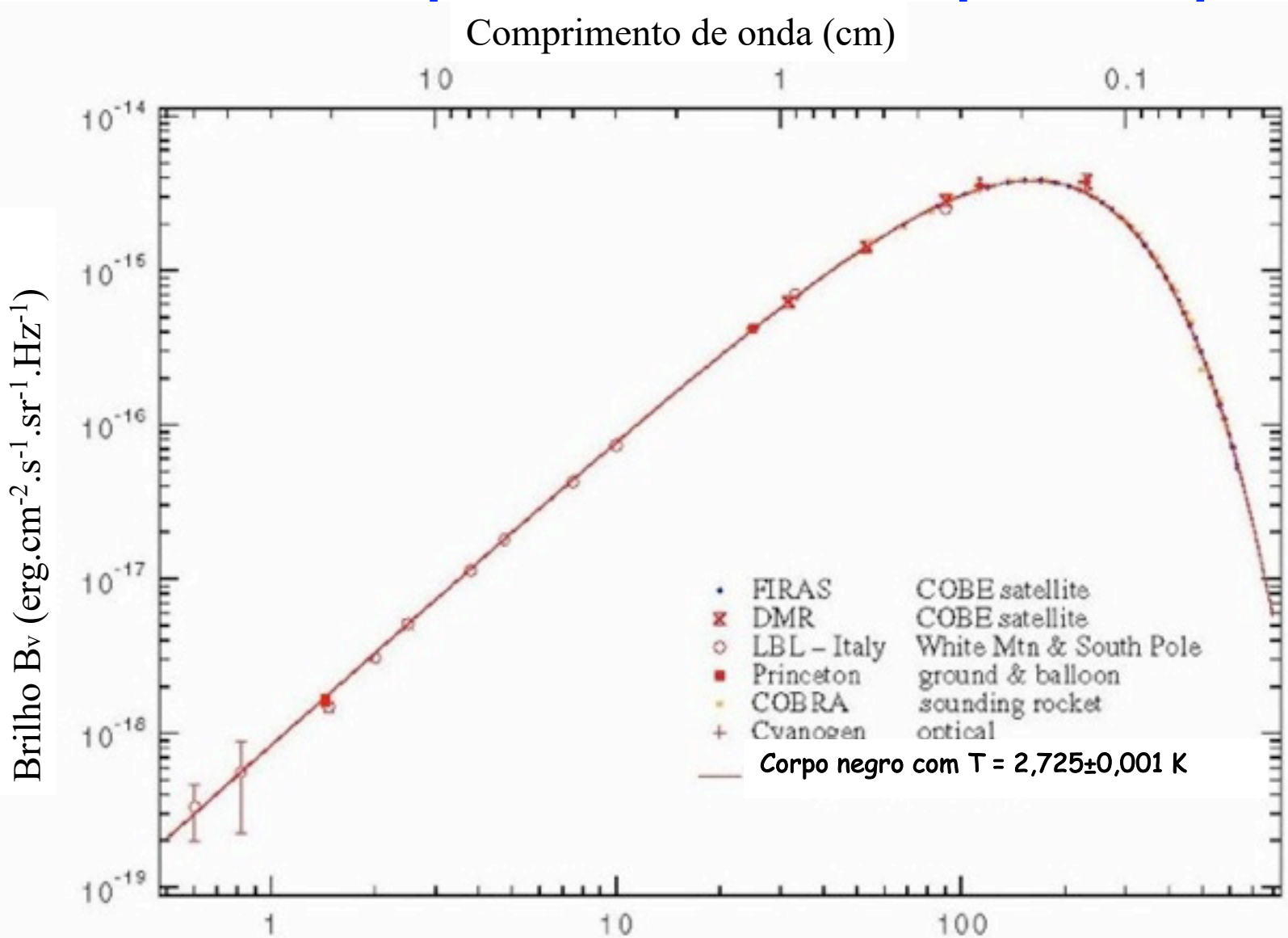
COBE (1989 - 1994)

Observamos seu espectro, **distribui33o angular**, **polariza33o**.

-200 $\mu$ K

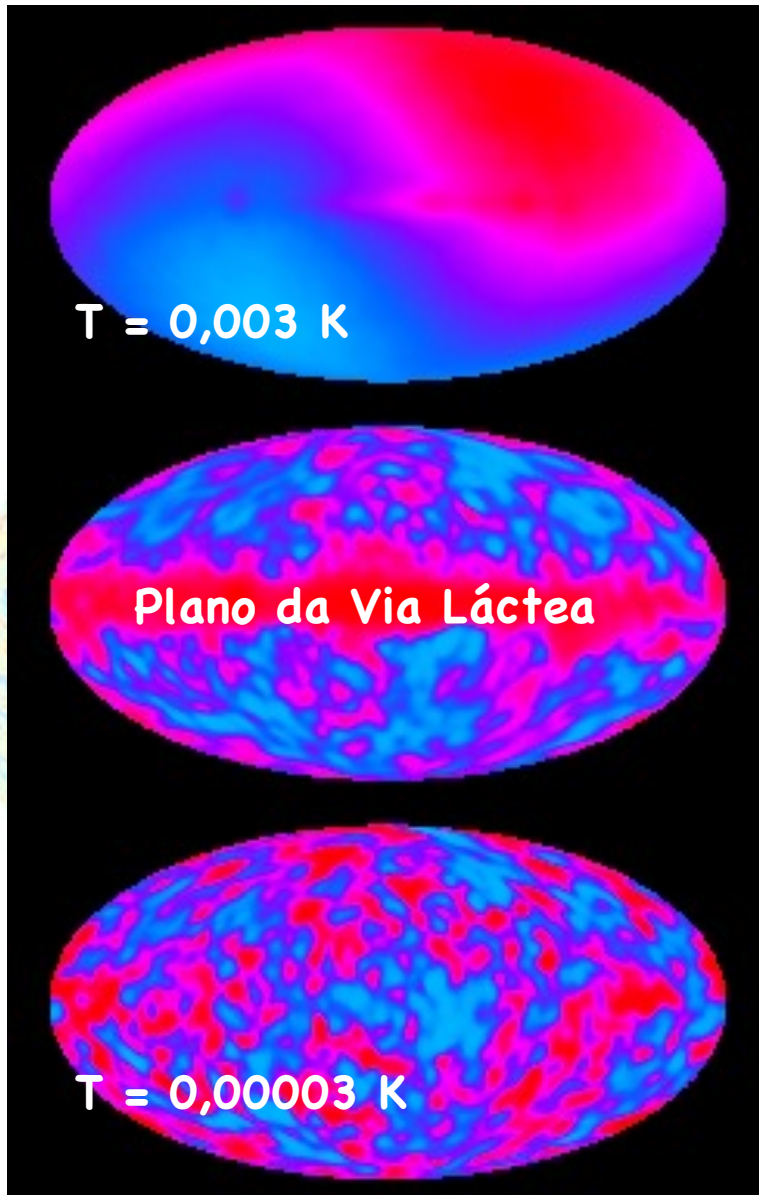
200 $\mu$ K

# RCF - espectro de corpo negro

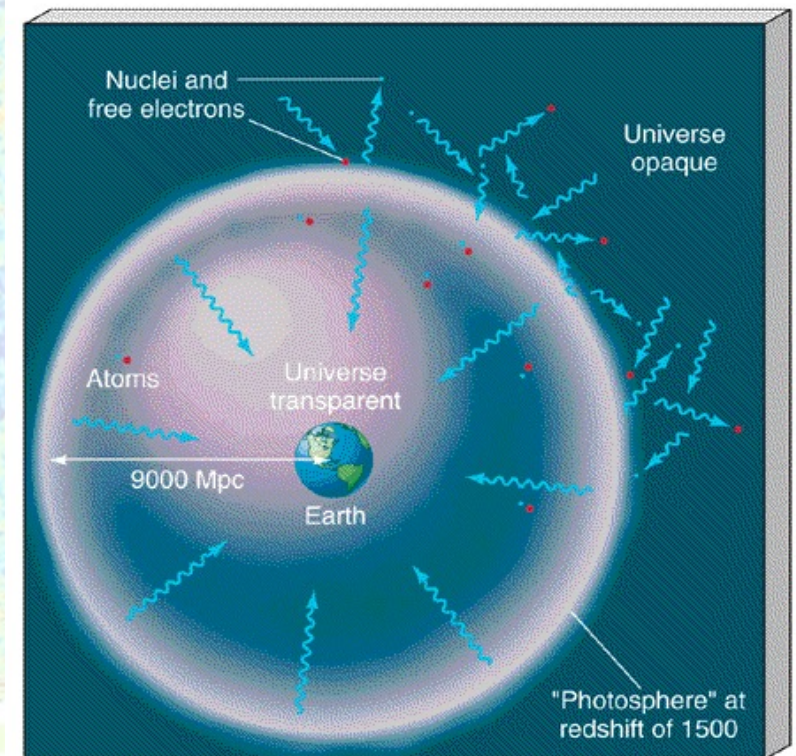




# RCF - distribuição angular

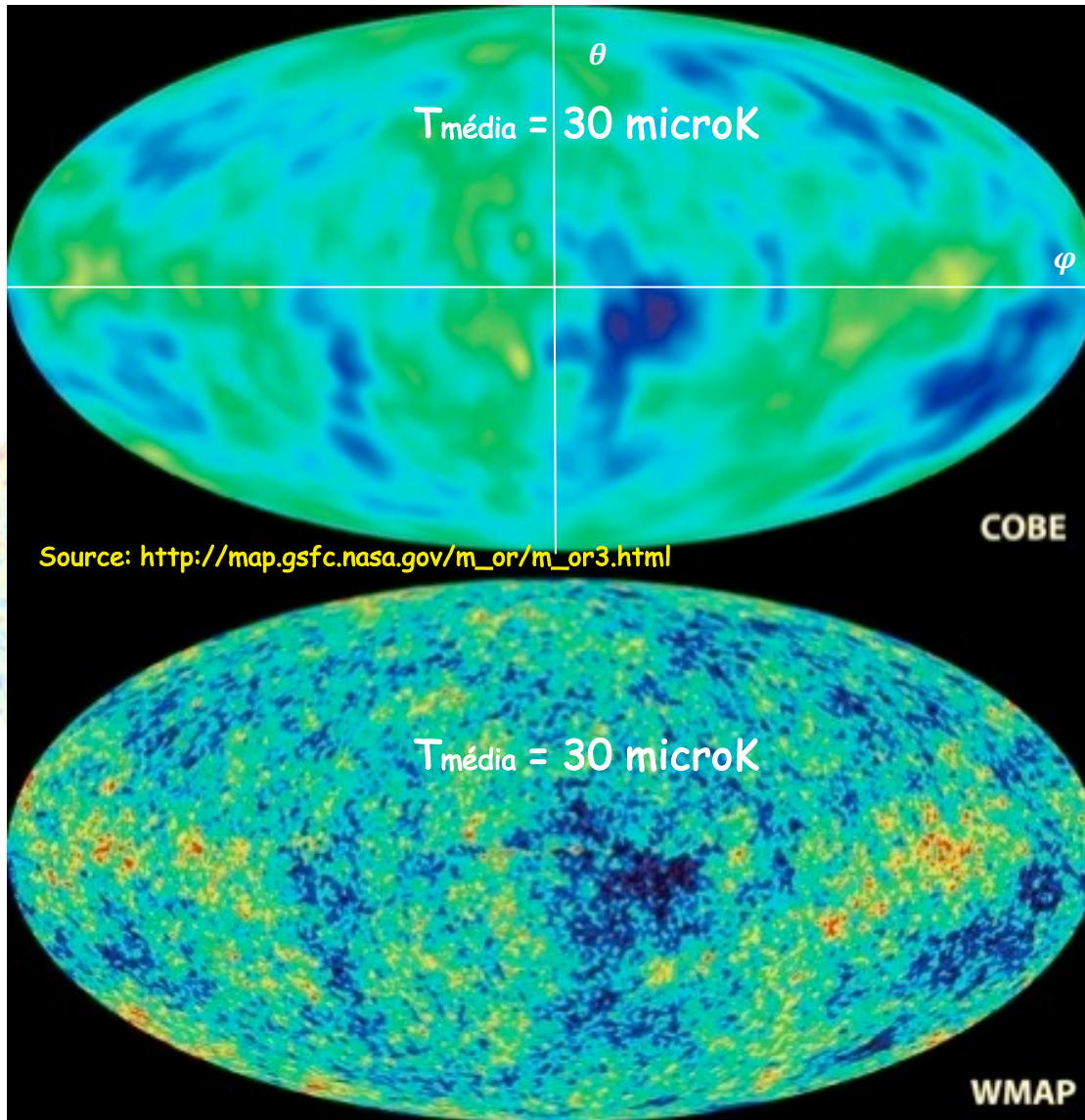


- ☑ Mapa 1: dipolo + emissão da galáxia + flutuações
- ☑ Mapa 2: emissão da galáxia + flutuações
- ☑ Mapa 3: flutuações de temperatura de 1 parte em 100000





# Flutuações de temperatura



- ☑ Oscilações aparecem como diferenças de temperatura no céu, da ordem de dezenas de microKelvin
- ☑ compressão  $\Rightarrow$  mais quente  $\Rightarrow$  diferença +
- ☑ Rarefação  $\Rightarrow$  mais frio  $\Rightarrow$  diferença -

$$T(\theta, \varphi) = T_{RCF} + \Delta T(\theta, \varphi)$$

200 $\mu$ K

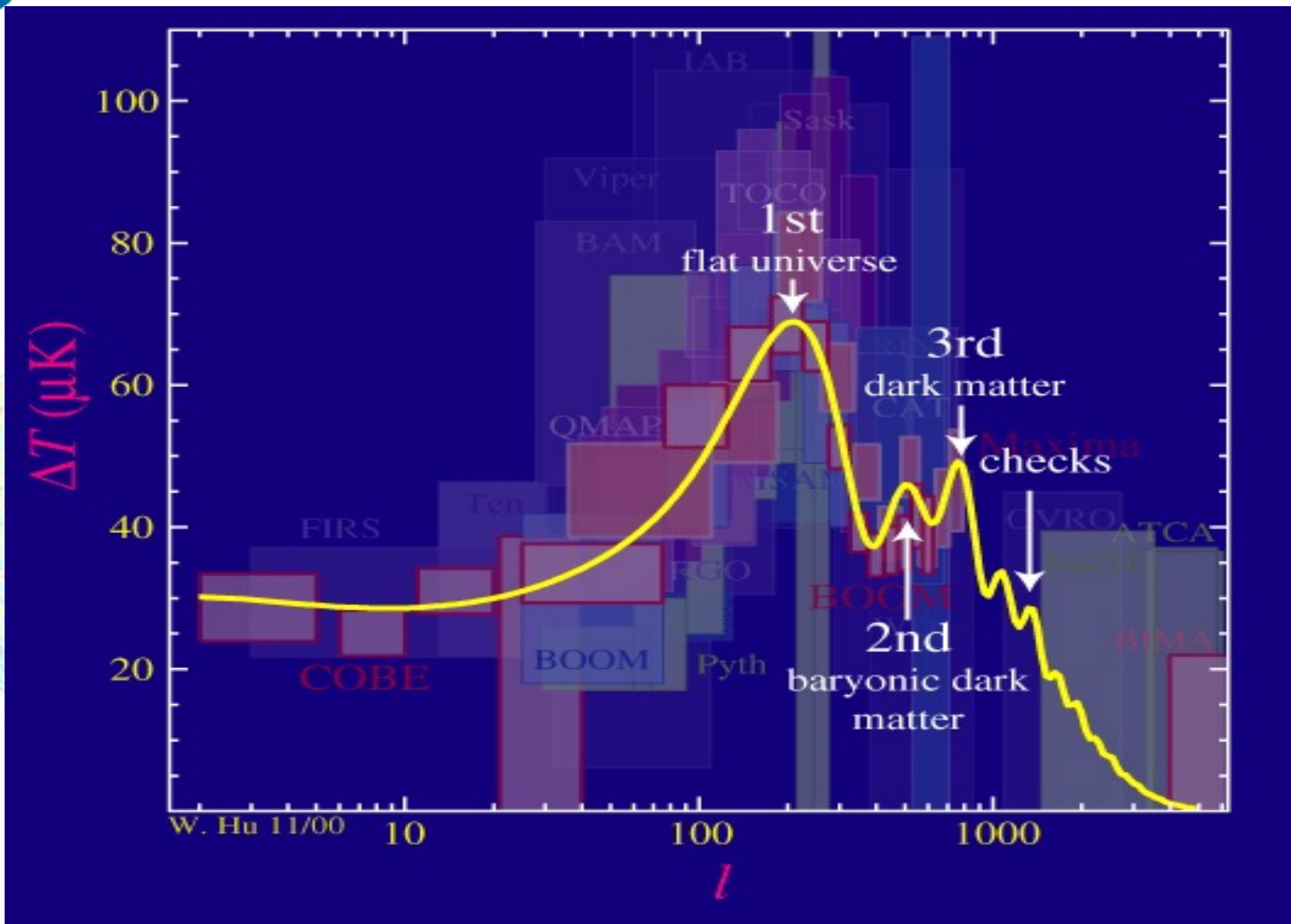




## Análise do mapa $\Rightarrow$ espectro de potência

- ☑ A posição e a altura dos picos de Fonte: home page Wayne Hu uma combinação dos parâmetros que descrevem nosso Universo:
  - $H_0$ : constante de Hubble (idade)
  - $\Omega_0$ : densidade total (geometria e dinâmica)
  - $\Omega_b$ : densidade de bárions (dinâmica)
  - $\Omega_\Lambda$ : densidade da energia escura (aceleração da expansão)
- ☑ A posição do primeiro pico depende do modelo cosmológico escolhido



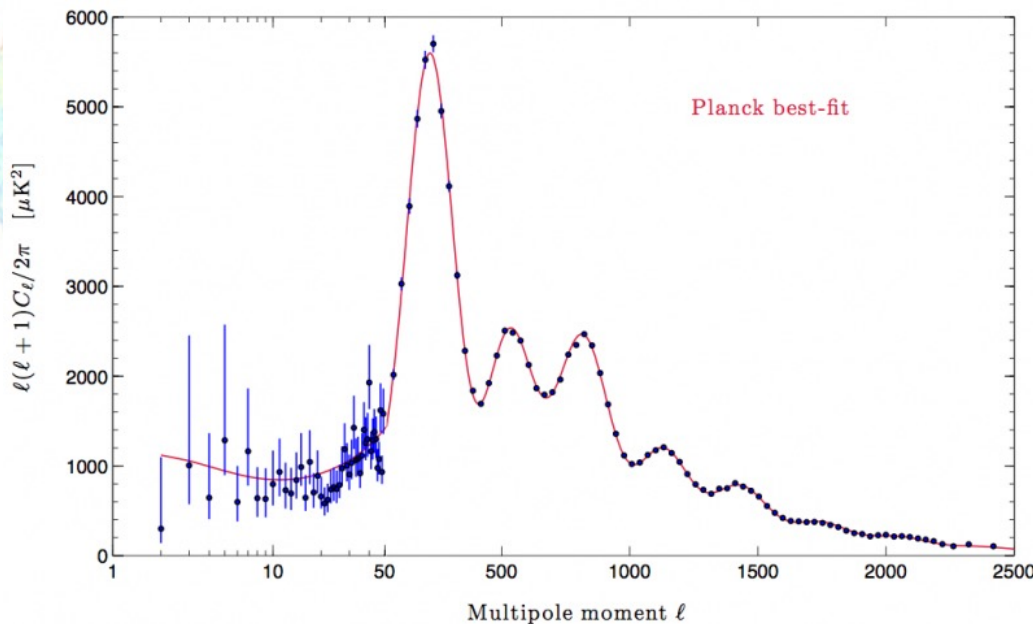




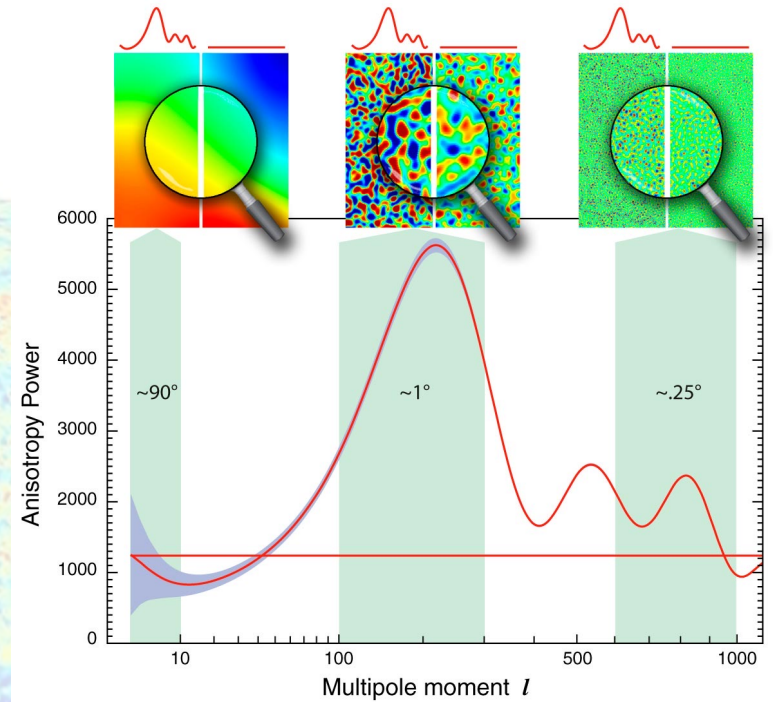
# Os espectros de potência das flutuações

Os espectros descrevem a potência do campo de flutuações de temperatura em função da escala angular. Eles são descritos em termos da potência em cada posição  
 O "l" na abcissa corresponde à escala angular  $\theta$  (em coordenadas esféricas)

$$\frac{\delta T}{T} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{-l}^{+l} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$



Fonte: <https://wiki.cosmos.esa.int/planckpla/images>



Fonte: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/>

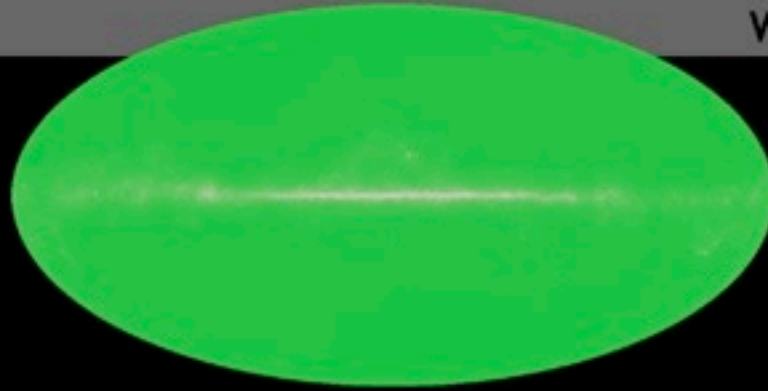
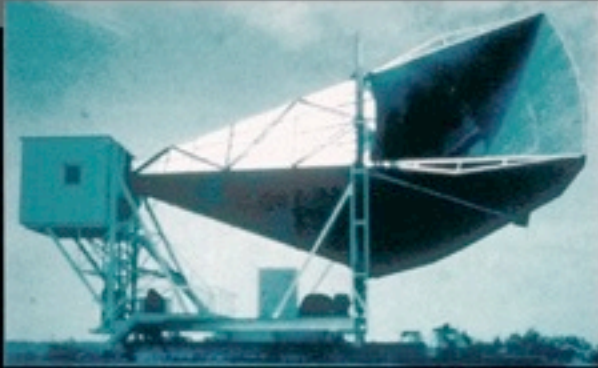
$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=0}^{\infty} \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

200  $\mu$ K

1965

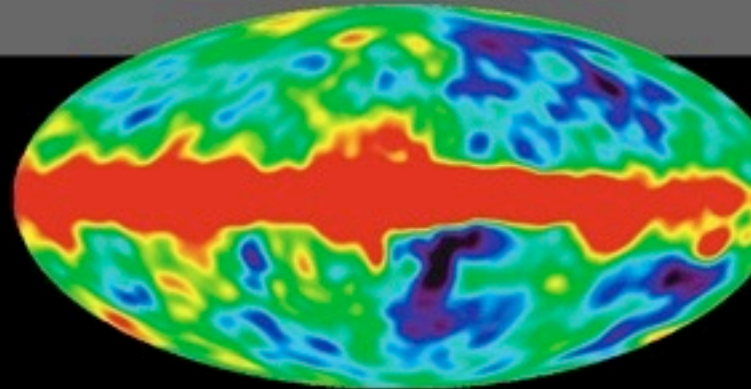
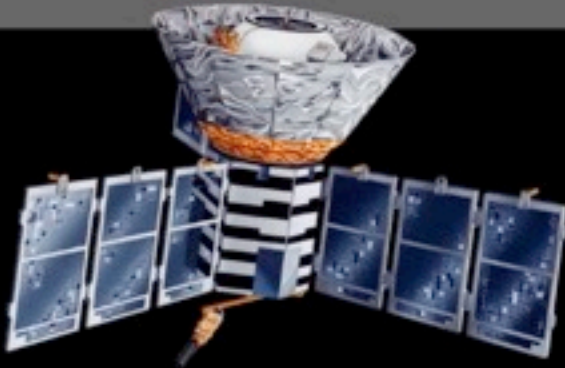
Fonte: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map>

Penzias and  
Wilson



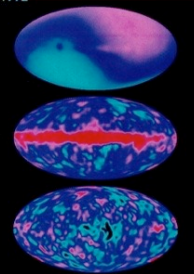
1992

COBE



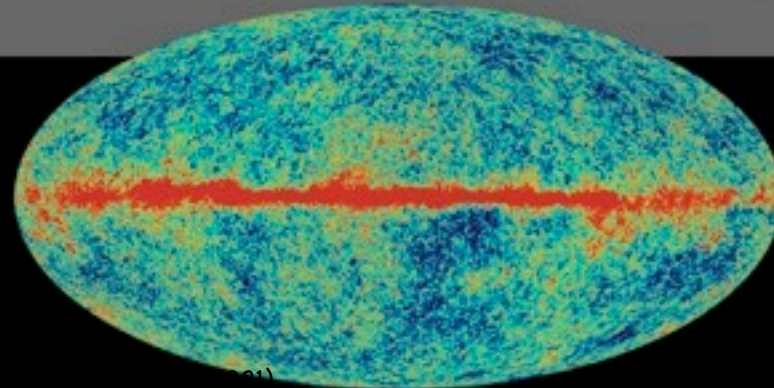
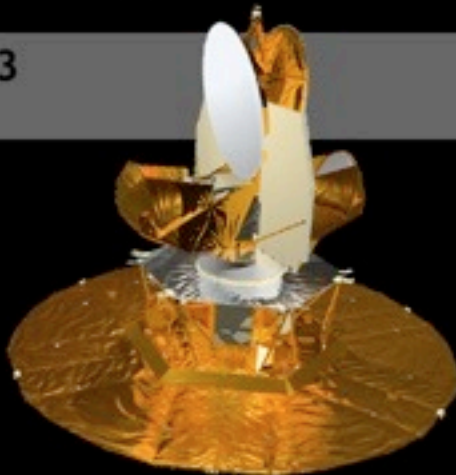
PHYSICS  
TODAY

JUNE-1992

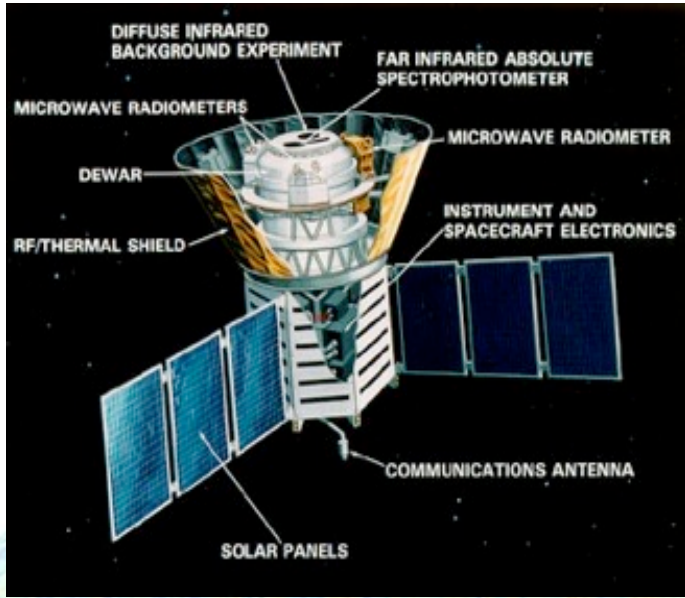


2003

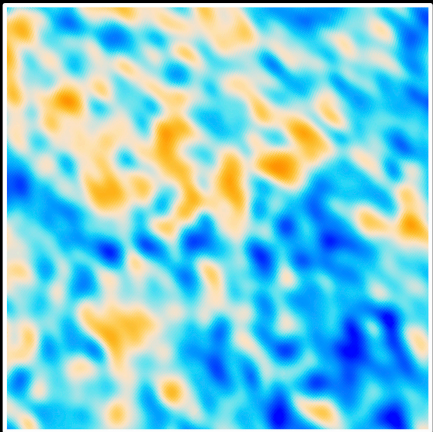
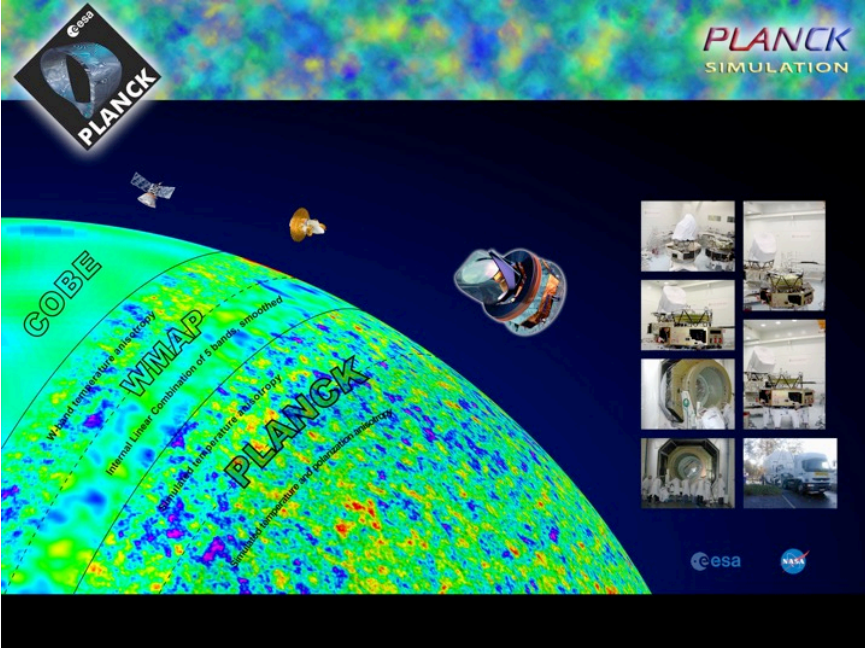
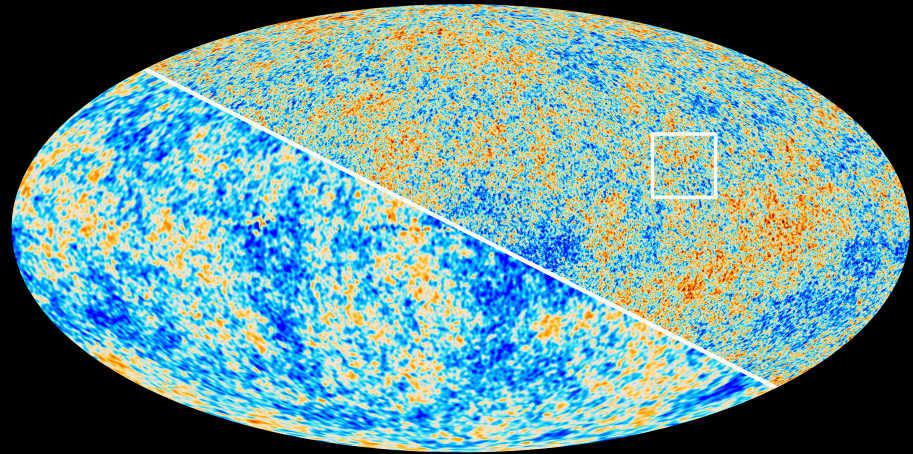
WMAP



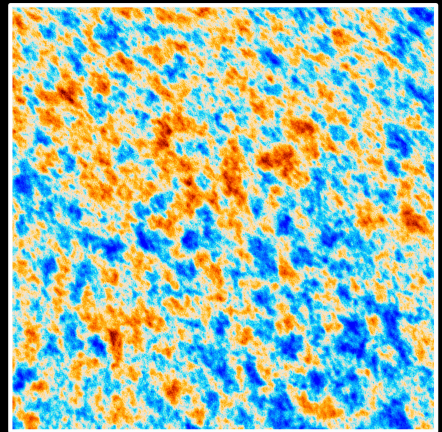




The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



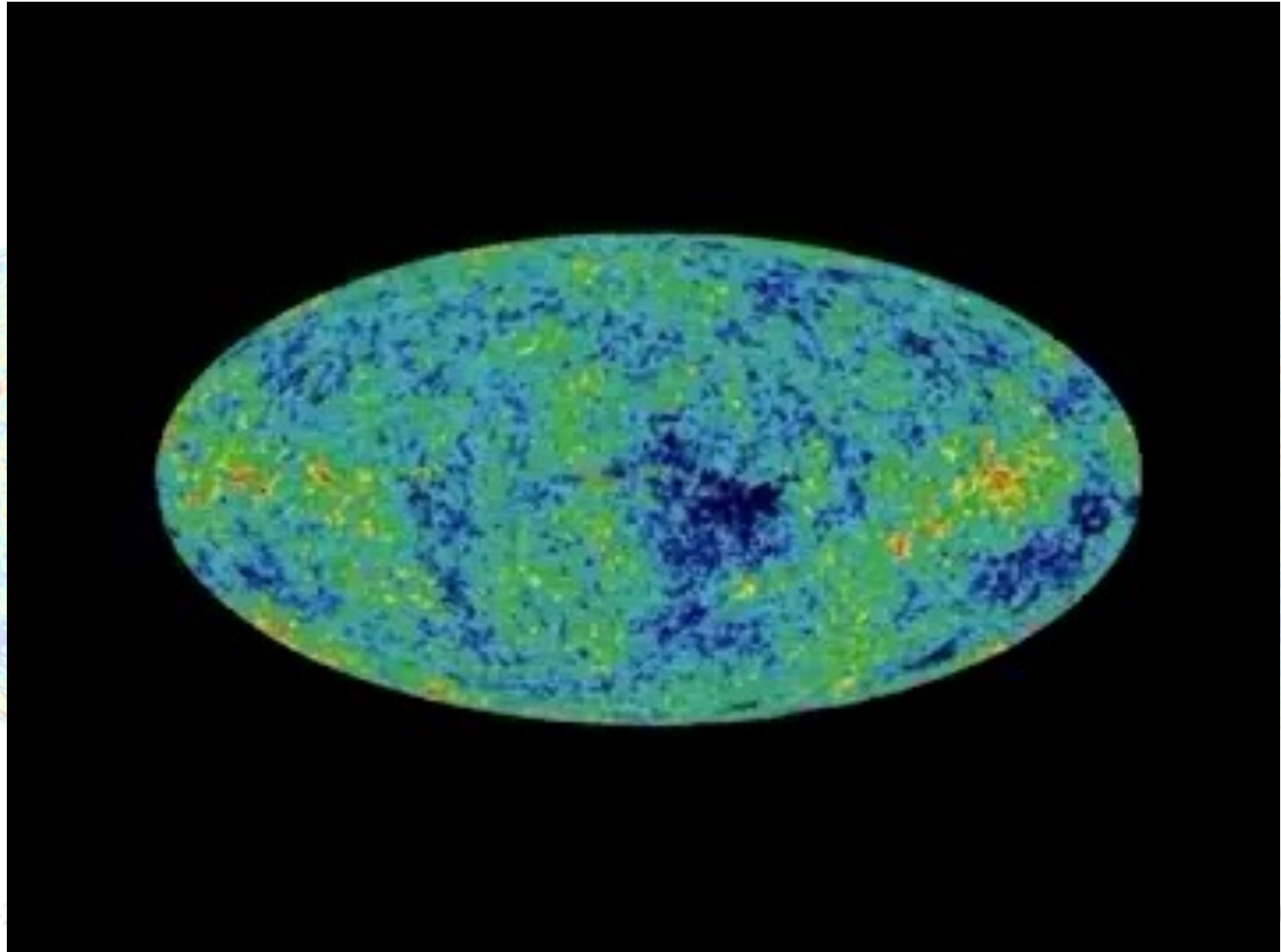
WMAP



Planck




# Das flutuações de temperatura à formação das galáxias...



$10\mu\text{K}$



# A FORMAÇÃO DE ELEMENTOS LEVES (NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL)

-200 $\mu$ K  200 $\mu$ K

# A formação de elementos leves



**Herman Alpher**

**Hans Bethe**

**George Gamov**

Em 1946, Alpher, Bethe e Gamov sugeriram a possibilidade de que todos os elementos químicos teriam sido gerados através de uma longa cadeia de captura de nucleons em 1 Universo primordial em expansão e que estaria esfriando-se.

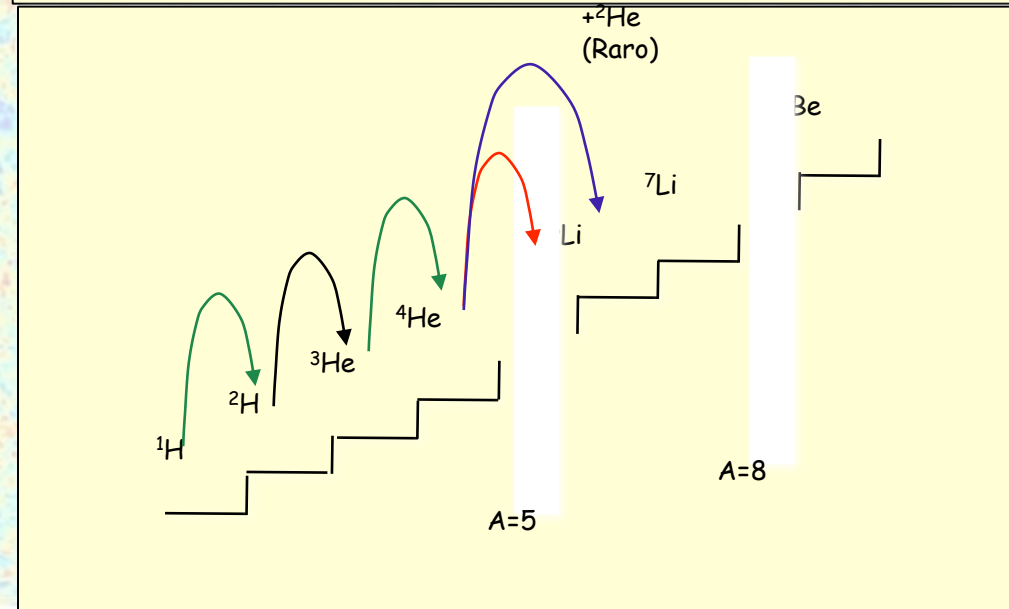
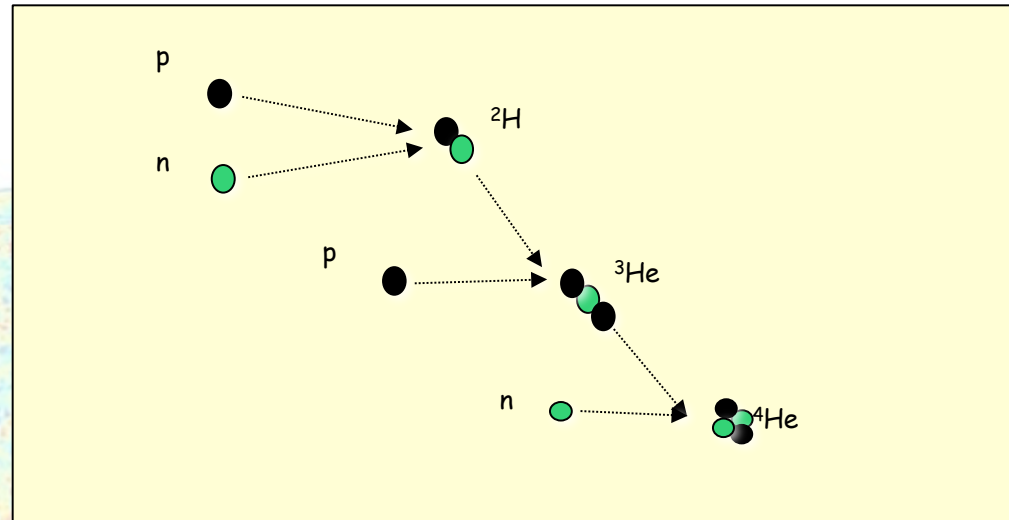
O esquema falha pois não há elementos leves estáveis com número de massa 5 e 8.



# A formação de elementos leves

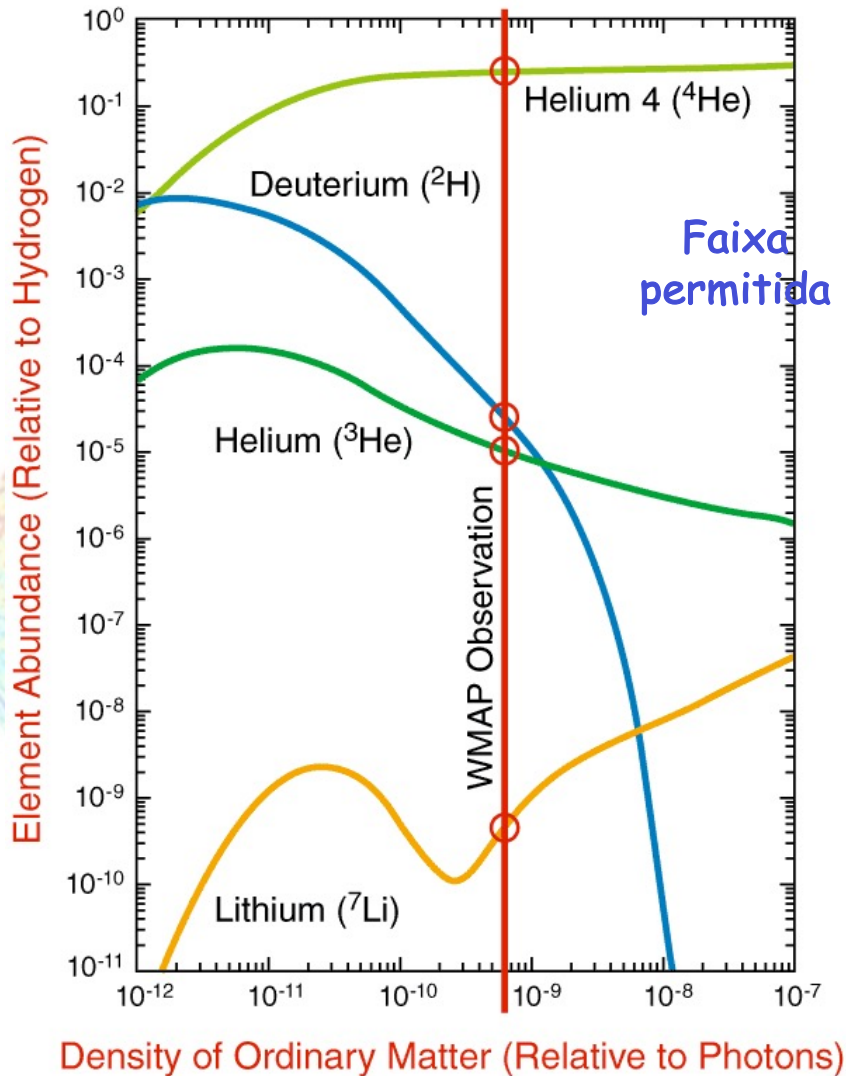
## Previsões da teoria:

- Forma, essencialmente, Hidrogênio &  $^4\text{Hélio}$
- Forma, em muito menor quantidade,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ , Li.
- Depende da razão entre prótons e neutrons na época e da taxa de decaimento do neutron.
  - Razão (p:n) = 7:1
- Abundância (por massa) de hélio = **25%** do total.



-200 K 200 K  
**Previsões baseadas em física bem conhecida**

# A formação de elementos leves



As observações estão em excelente acordo com as previsões teóricas, dando o apoio necessário ao Modelo Cosmológico Padrão







# A TABELA PERIÓDICA DOS ASTRÔNOMOS

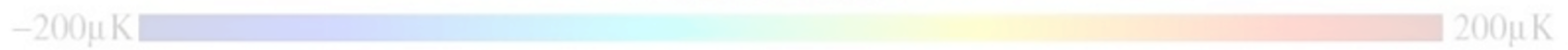
## The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)

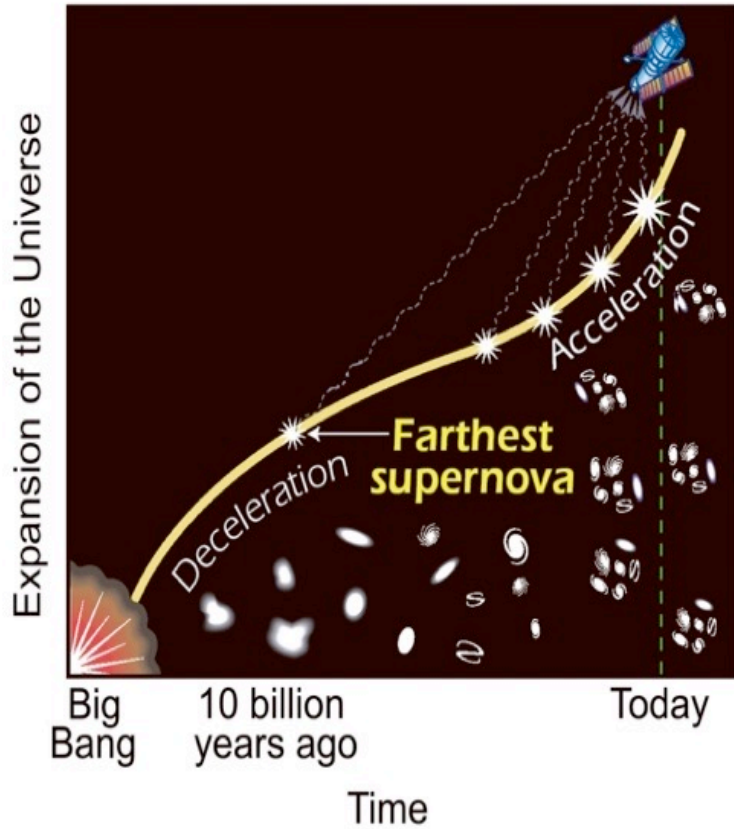


Courtesy Ben Mc Call

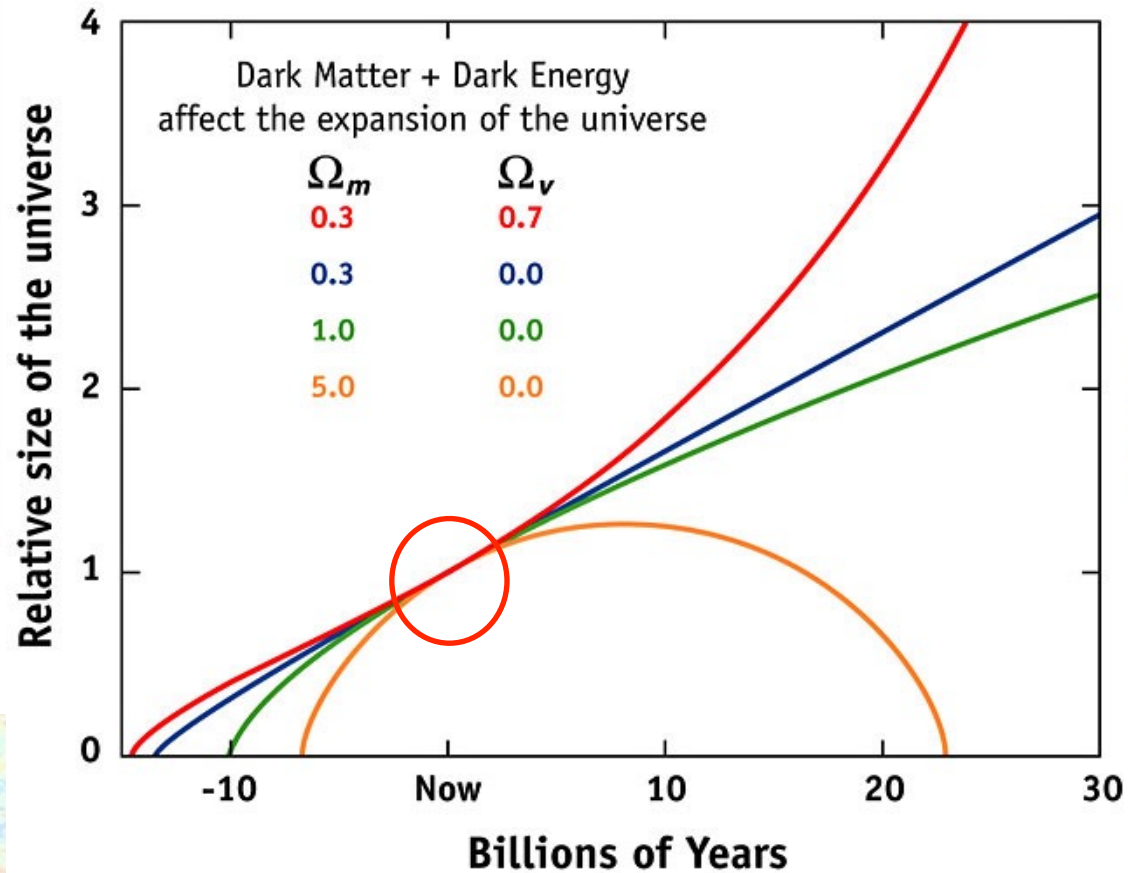
# A ACELERAÇÃO DA EXPANSÃO



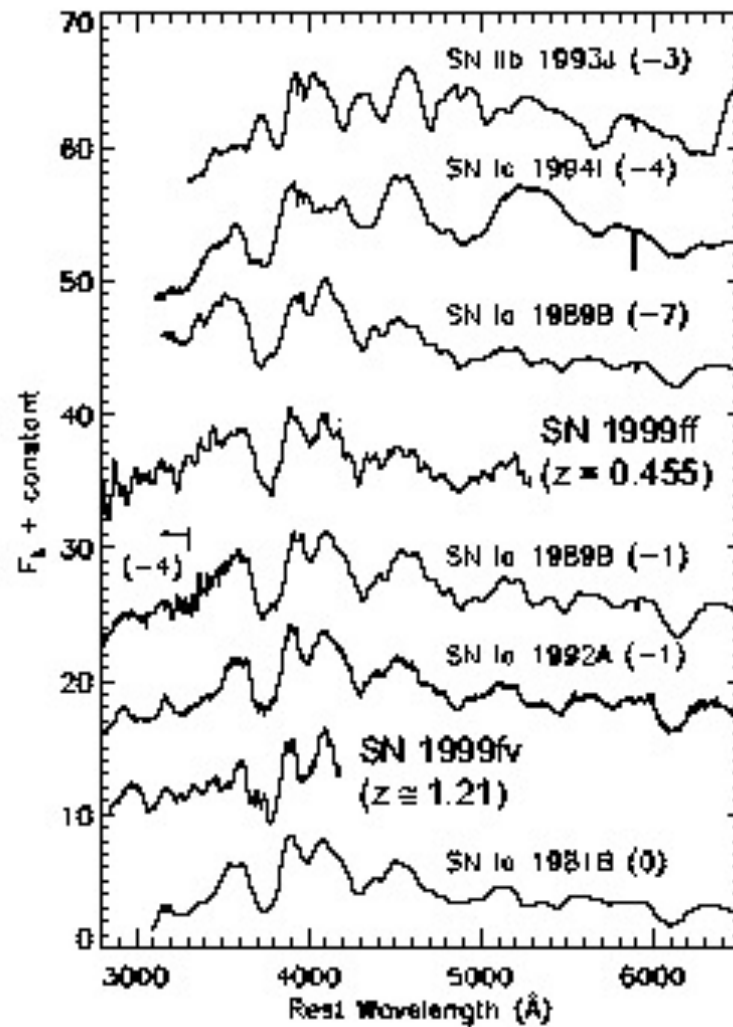
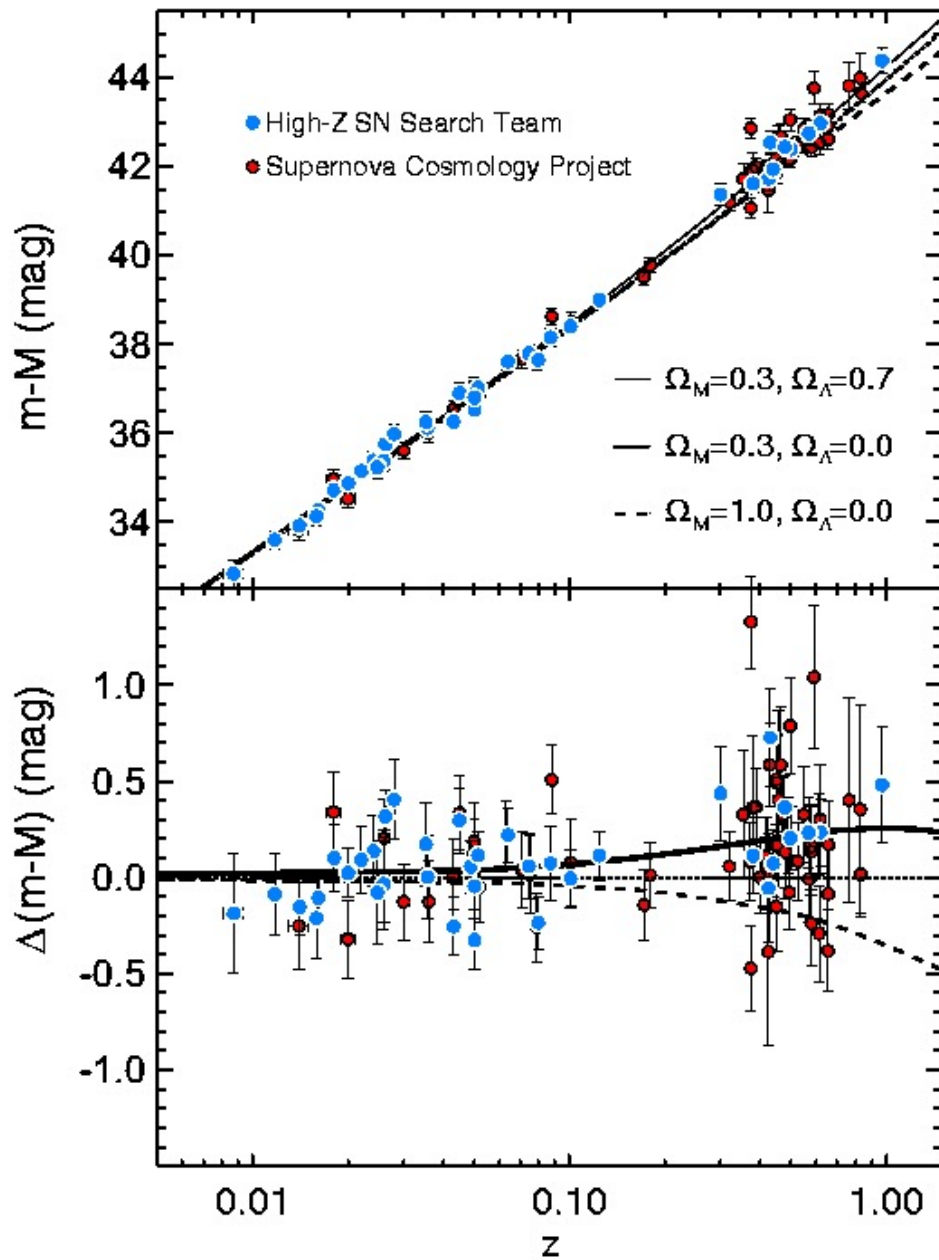




## EXPANSION OF THE UNIVERSE



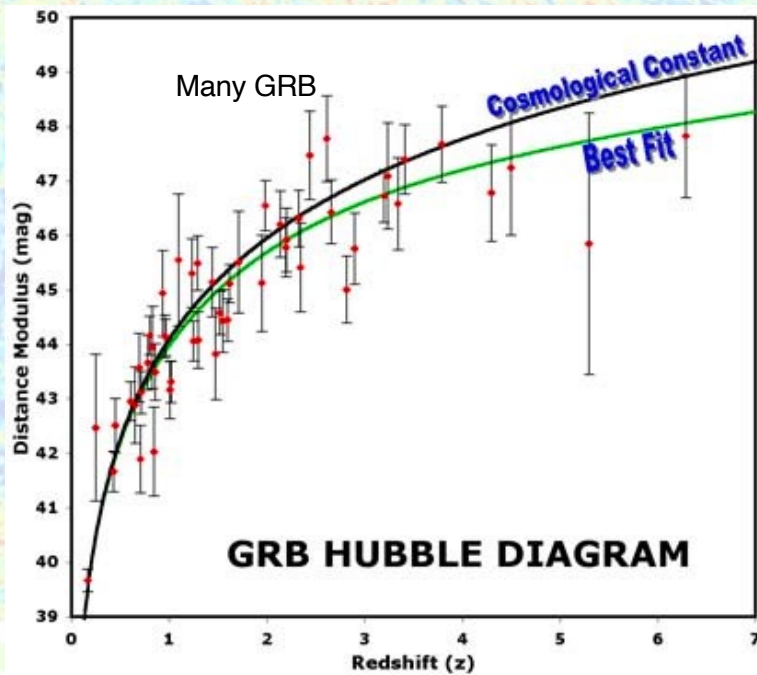
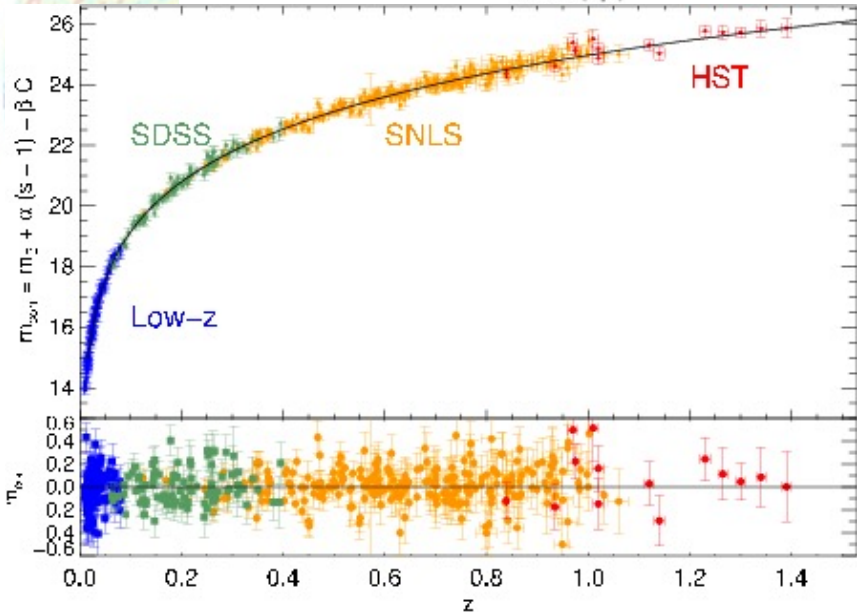
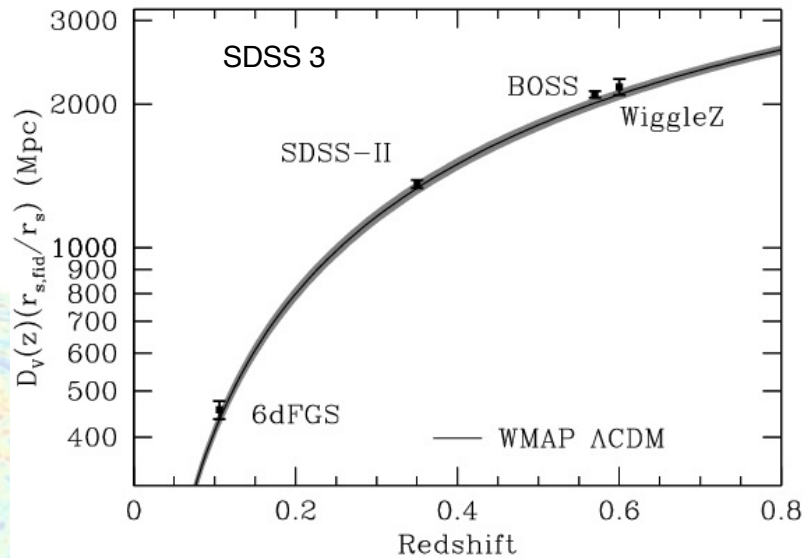
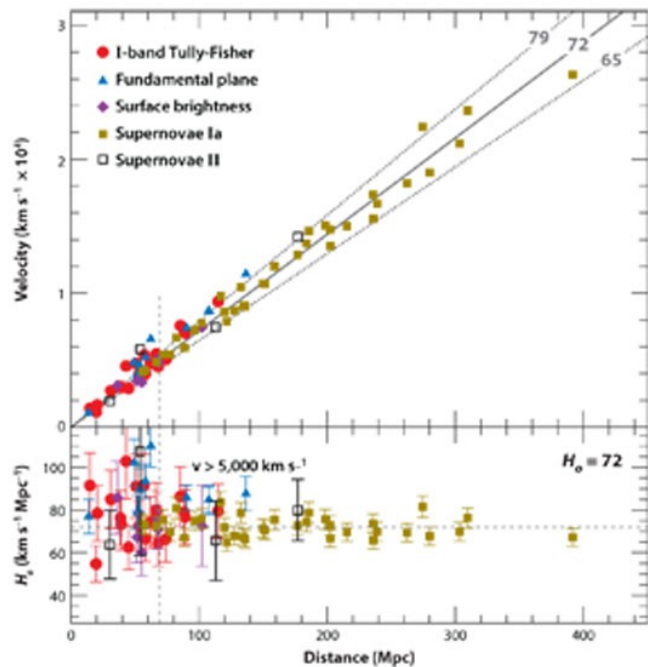
Fonte: <http://map.gsfc.nasa.gov/>







# Cepheid Key Project (Freedman 2001)



# A Cosmologia do séc. XXI

Einstein's GR

$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m + \rho_?$$

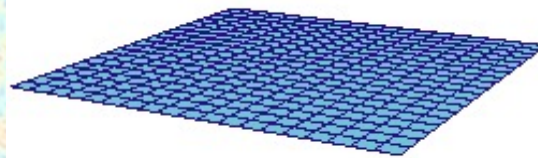
expansion

matter

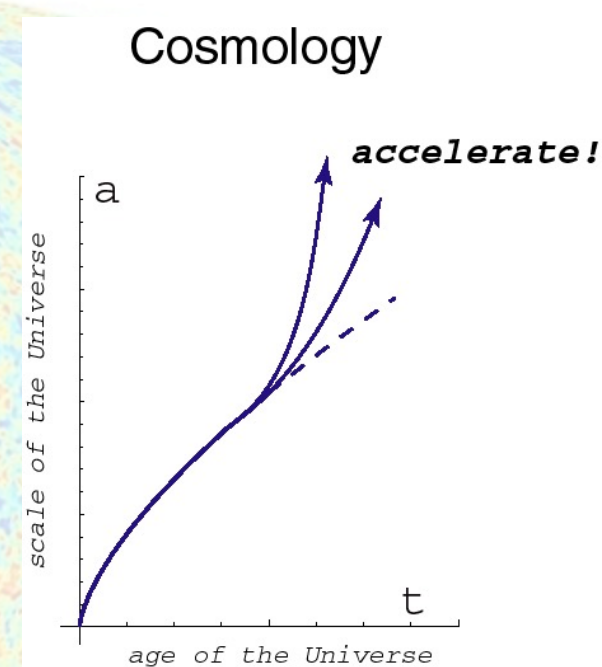
**Dark Energy:  
Vacuum?  
Quintessence?**

Geometry

**flat!**



Cosmology



Fonte: Robert Caldwell (Dartmouth College)







# Resumindo: o Modelo Cosmológico Padrão (MCP) é:

- ☑ Um universo descrito pelas eqs. de Einstein-Friedmann-Lemaitre
- ☑ Um universo que obedece à métrica de Robertson-Walker
- ☑ Um universo em que se observa:
  - A recessão das galáxias (expansão)
  - A aceleração da expansão
  - Uma abundância de  $H \sim 0,75$  e  $He \sim 0,25$  em relação à quantidade total de bárions
  - Um fundo de radiação em microondas cuja temperatura é  $2,7\text{ K}$



CONTINUA NA PRÓXIMA AULA

