

# COSMOLOGIA - I

## Introdução

Carlos Alexandre Wuensche

[ca.wuensche@inpe.br](mailto:ca.wuensche@inpe.br)

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# 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 extração de resultados e conceitos.

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# 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

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# 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 –  $10^{78}$**

-200 $\mu\text{K}$ 200 $\mu\text{K}$

# 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....

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# 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,  $c = k = h/2\pi = G = 1!!!!!!$



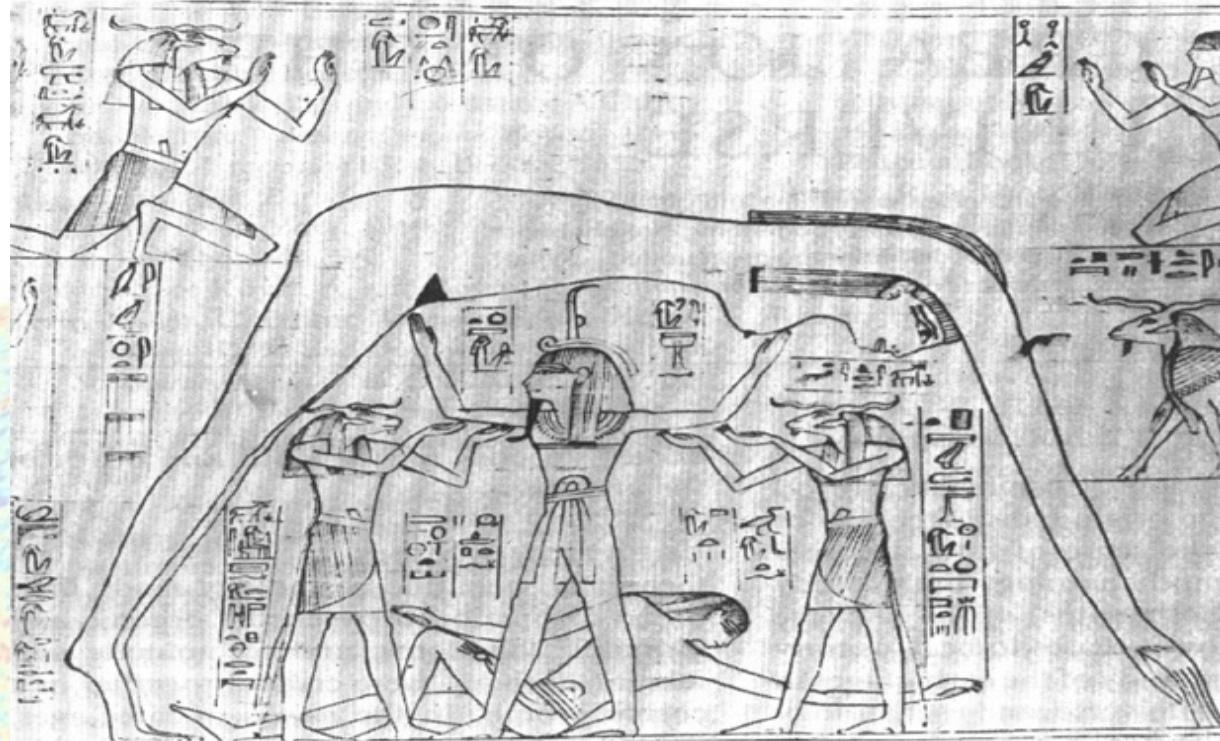
## COSMOLOGY MARCHES ON



# 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 Telnut, a deusa da chuva. Shu e Telnut 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 $\mu$ K200 $\mu$ 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

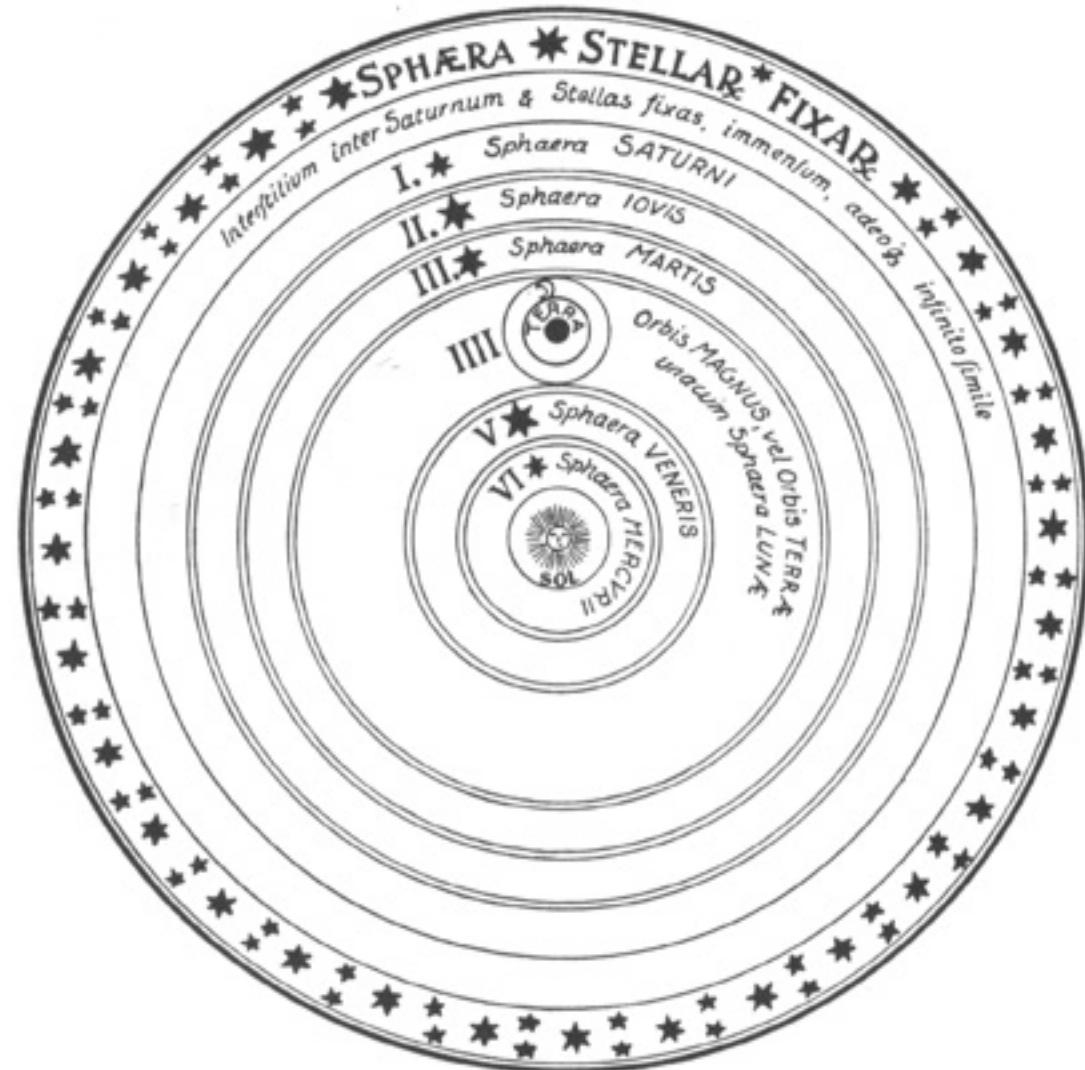


Nessa época os modelos de Universo consideravam que a Terra estava no centro de tudo e que o céu era uma tampa com buracos. A luz proveniente de fogos ardendo no lado de fora brilharia através dos buracos e alcançaria a Terra como a luz das estrelas.

# Uma visão do Universo por volta de 1500 AC

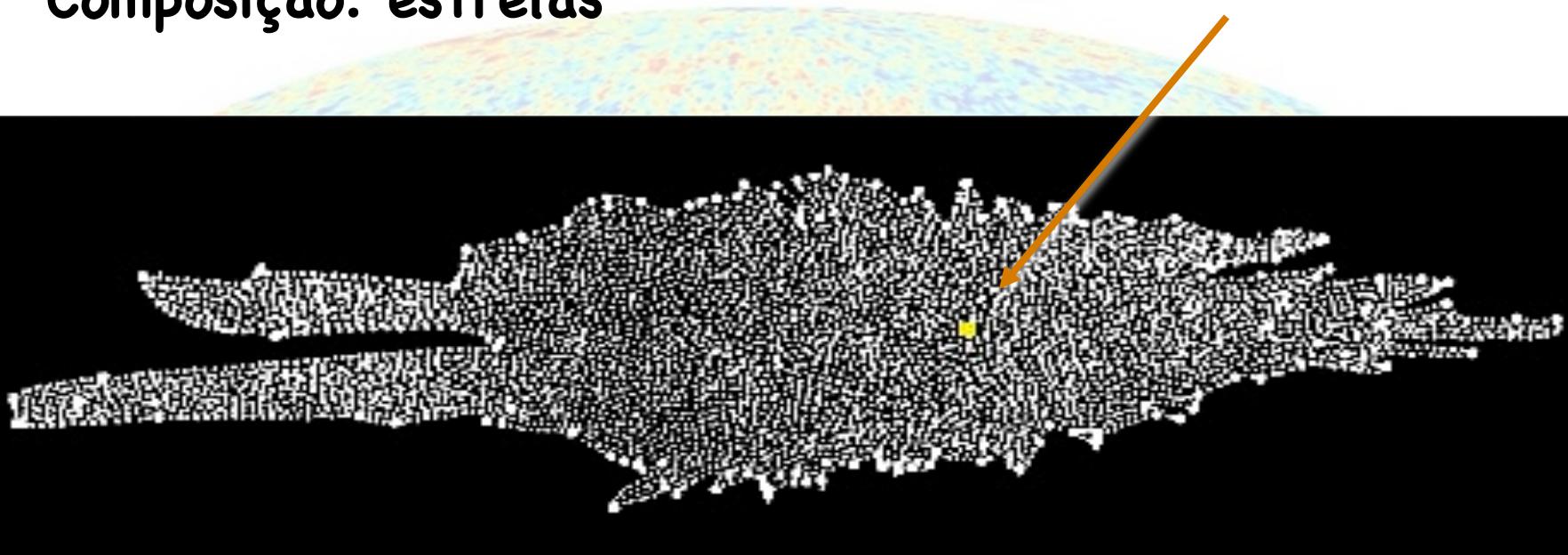


Niclas Kopernik  
(1473 – 1543)



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

Composição: estrelas



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)

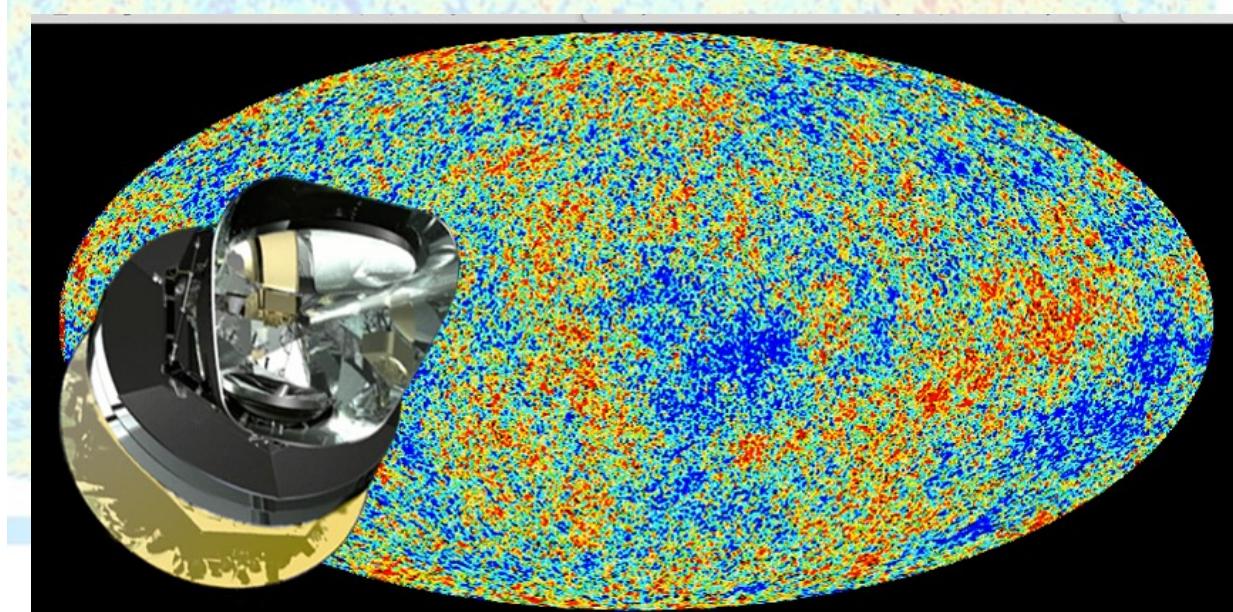
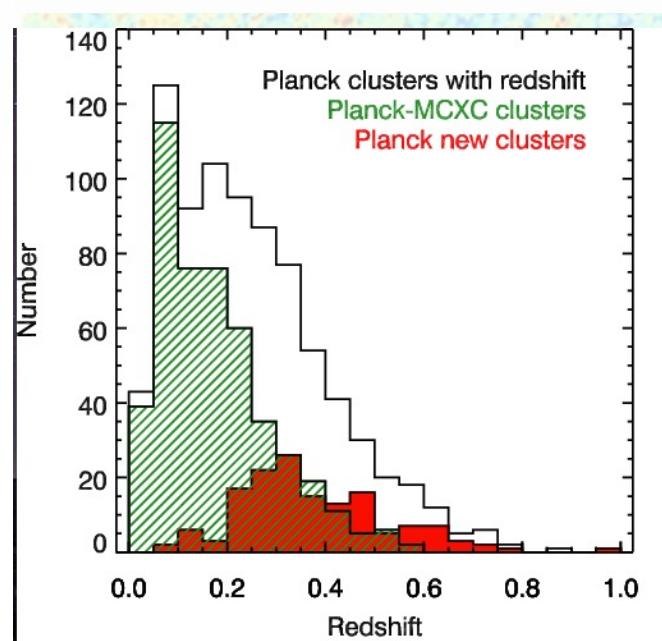
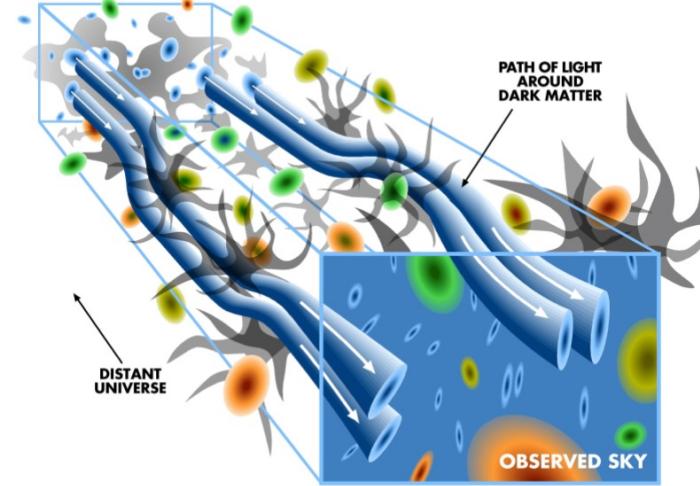
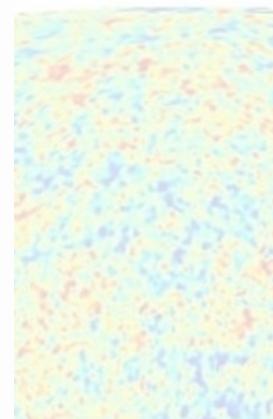
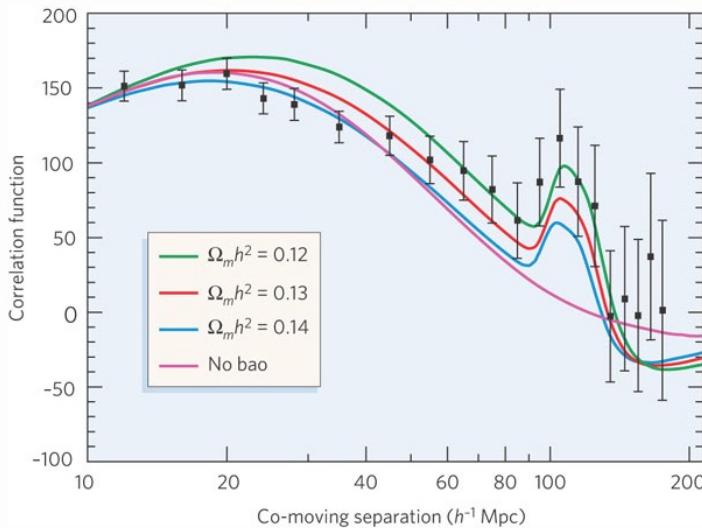
## Início do século XXI

- 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

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# Cosmologia no séc. XXI



# Questões importantes em 2021

- O que gerou a assimetria bariônica? Por que há uma quantidade desprezível de antimateria e o que define a proporção de bárions para fóttons?
- 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?

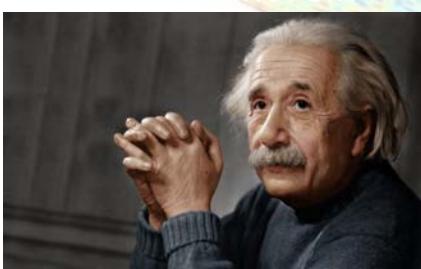
-200 $\mu$ K200 $\mu$ K

# 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 observational
  - 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

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, antimateria, energia escura, "resíduos" do Big Bang, expansão e idade do Universo)

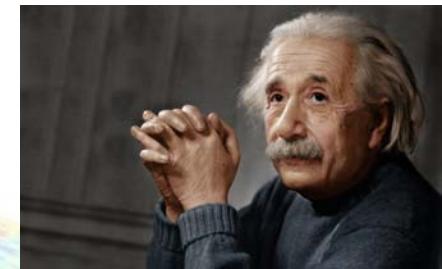
-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# 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.

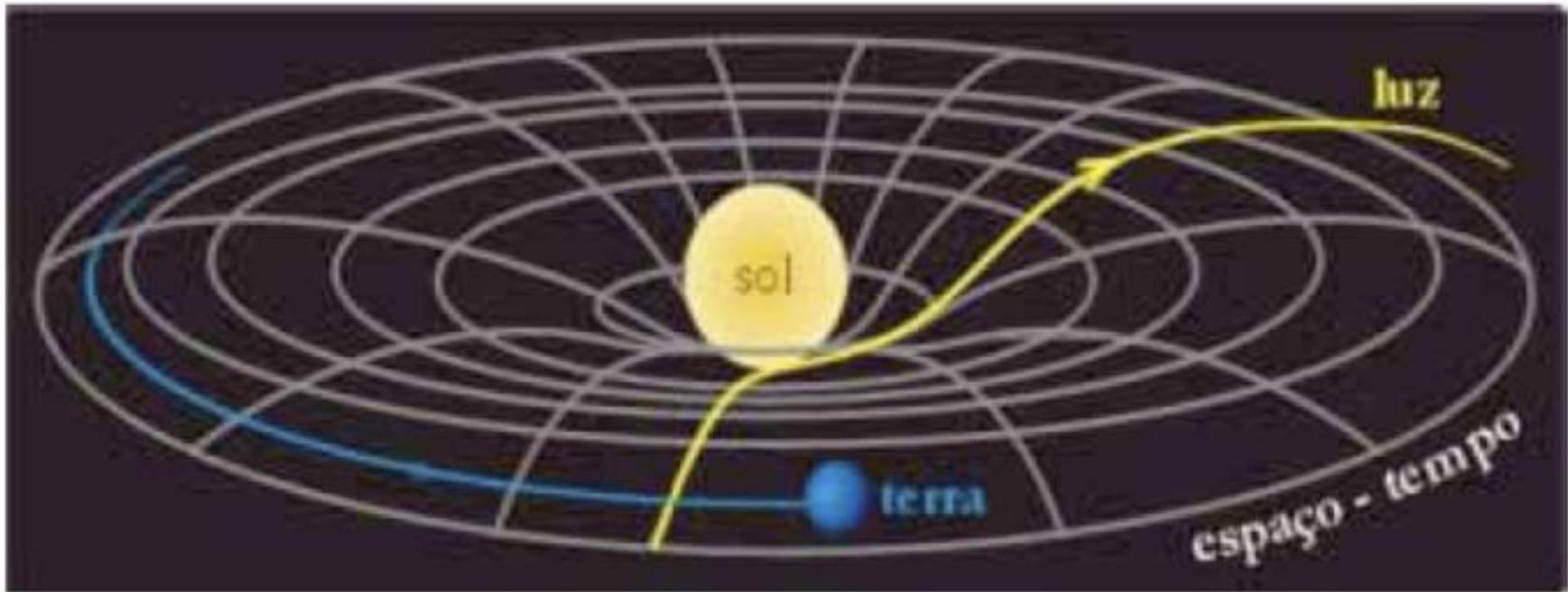


Georges  
Lemaître

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# As equações do MCP



Métrica de Robertson-Walker  
 (define um espaço-tempo maximamente simétrico).

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

Fator de escala, define a  
 expansão do Universo

Coordenadas esféricas, com  
 o termo de curvatura k

# 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

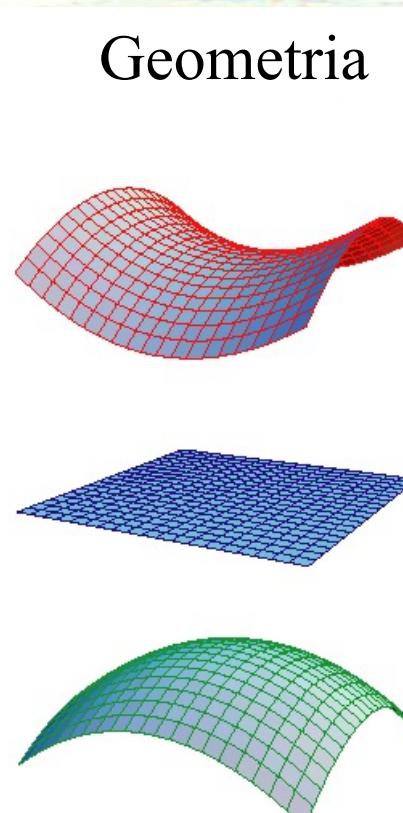
Relatividade Geral  
(Einstein)

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

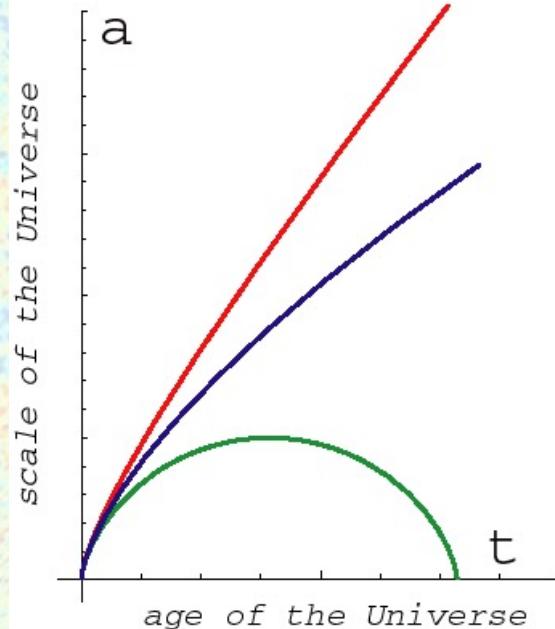
↓  
expansão

↓  
matéria

↓  
curvatura



Cosmologia

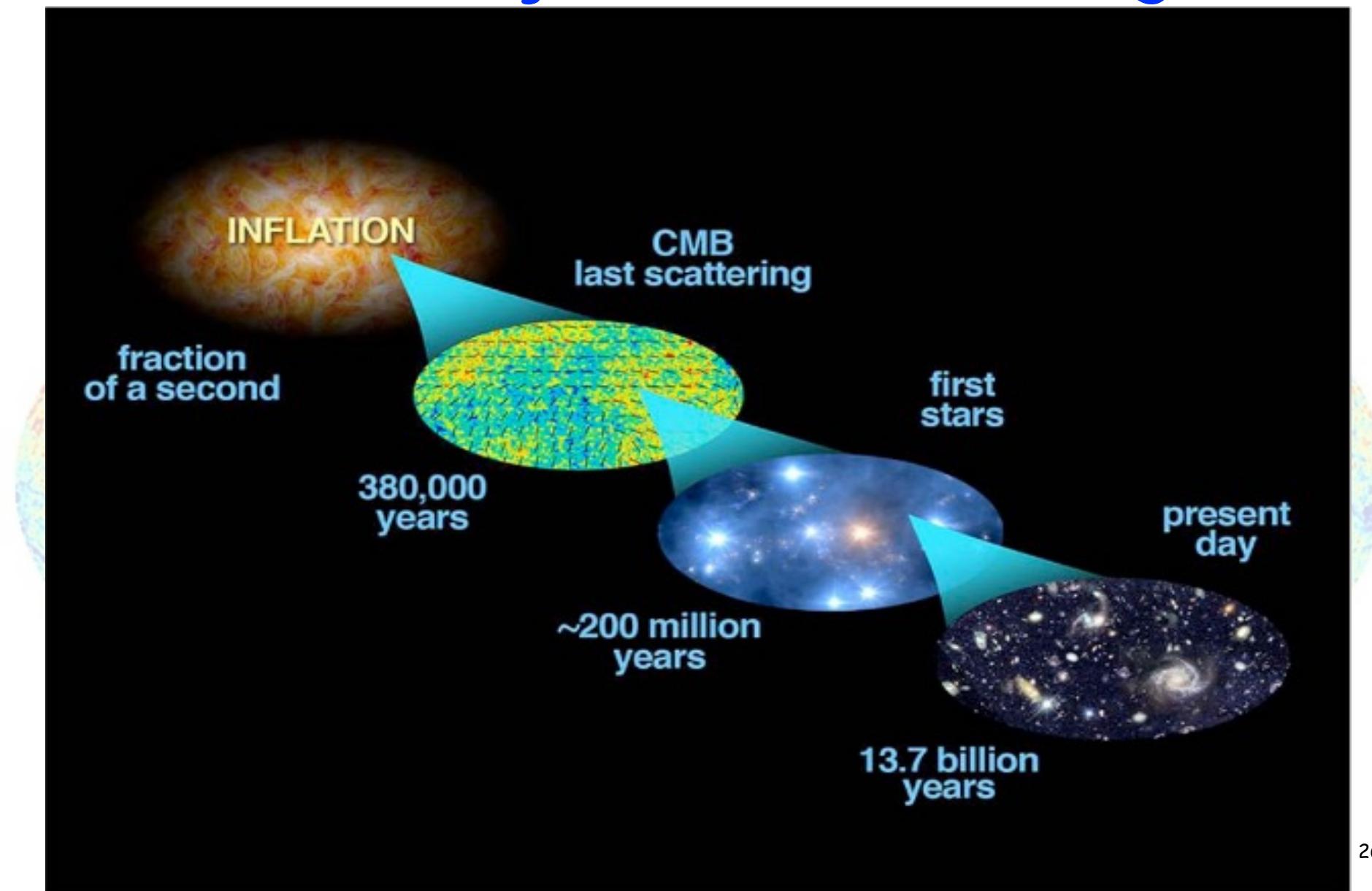


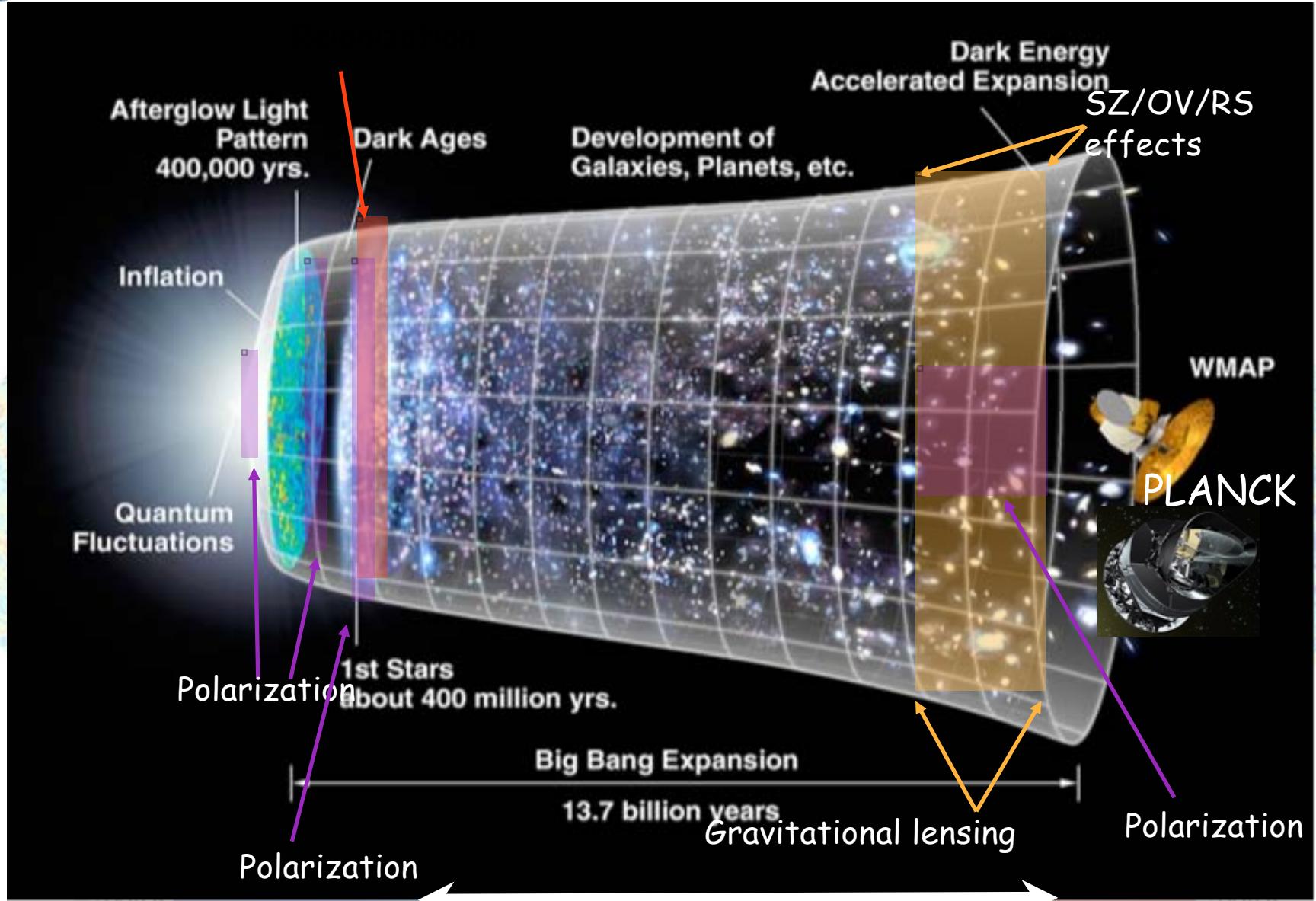
-200  $\mu\text{K}$   200  $\mu\text{K}$

# OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS



# Observações em Cosmologia





# OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS

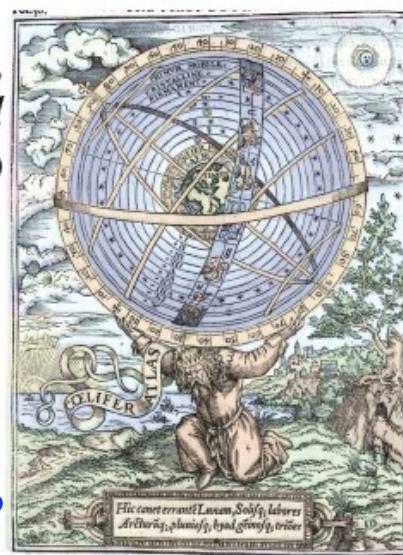
O paradoxo de Olbers



# Por que o céu é escuro à noite?

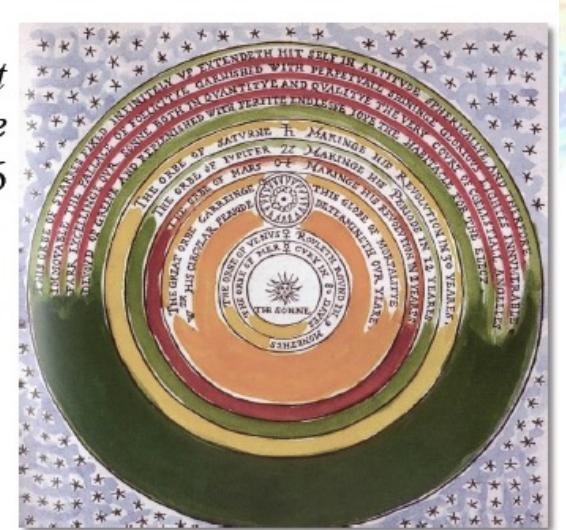
- ☒ Se o universo é infinito e possui infinitas estrelas, porque o céu é escuro à noite? Paradoxo de Olbers!!!! (Heinrich Olbers, 1823)
- ☒ A questão foi proposta, na verdade, por Thomas Digges em 1576
- ☒ Com muitas estrelas no céu, para onde quer que olhemos, haverá alguma para interceptar nossa linha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

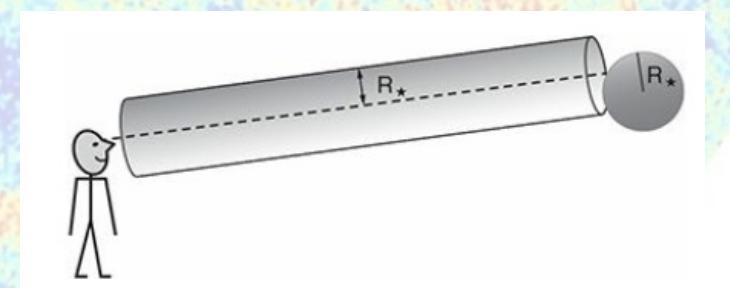
## ✓ Hipóteses para cálculo da luminosidade do céu sob o paradoxo de Olbers....

- $n_* = 10^9$  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  $N = n_* V = n_* (\text{d} \cdot \pi R_{sol}^2)$

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!!!!

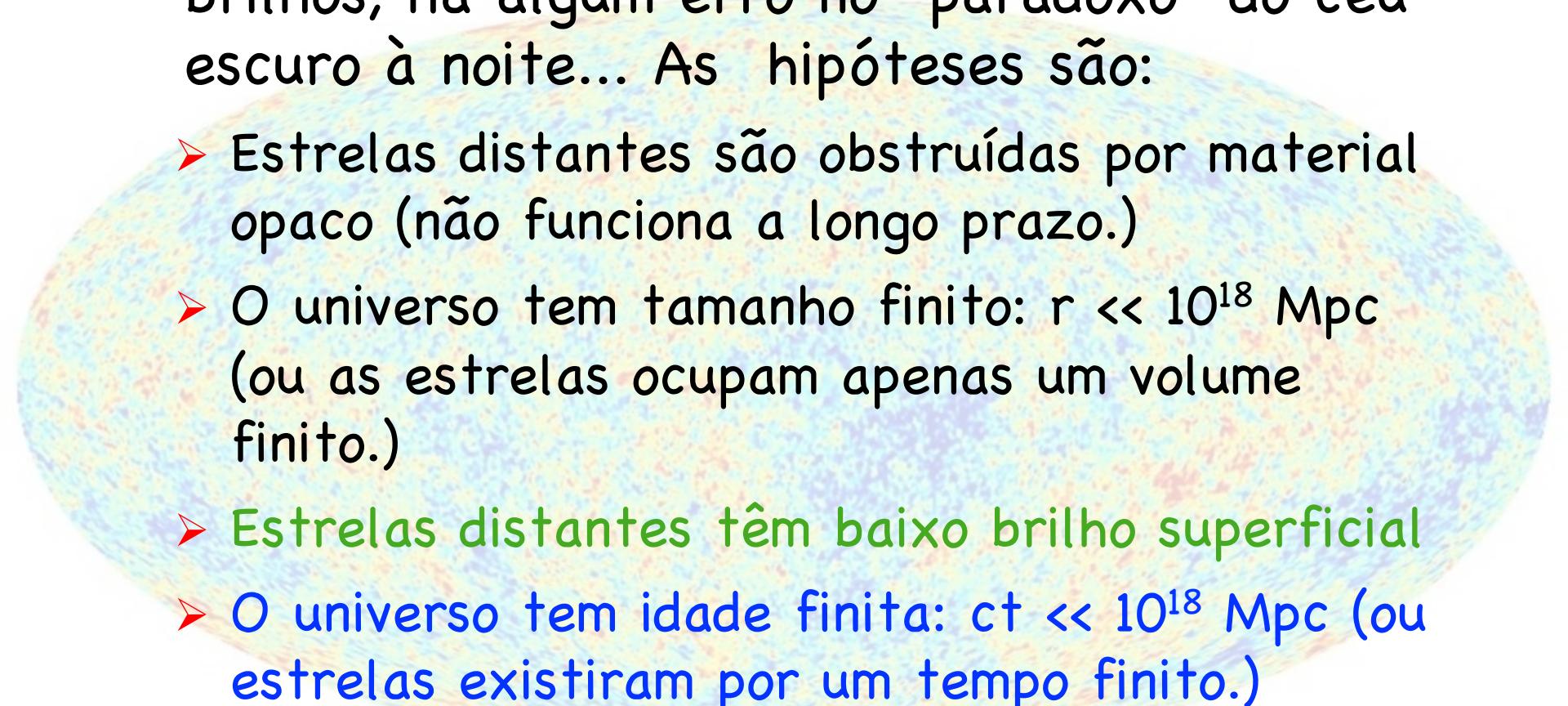


$$B_{\odot} = 5 \times 10^{-3} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{arcsec}^{-2}$$

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

-200  $\mu\text{K}$

200  $\mu\text{K}$

- 
- 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.)

-200 $\mu$ K200 $\mu$ K

# OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS

Homogeneidade e isotropia

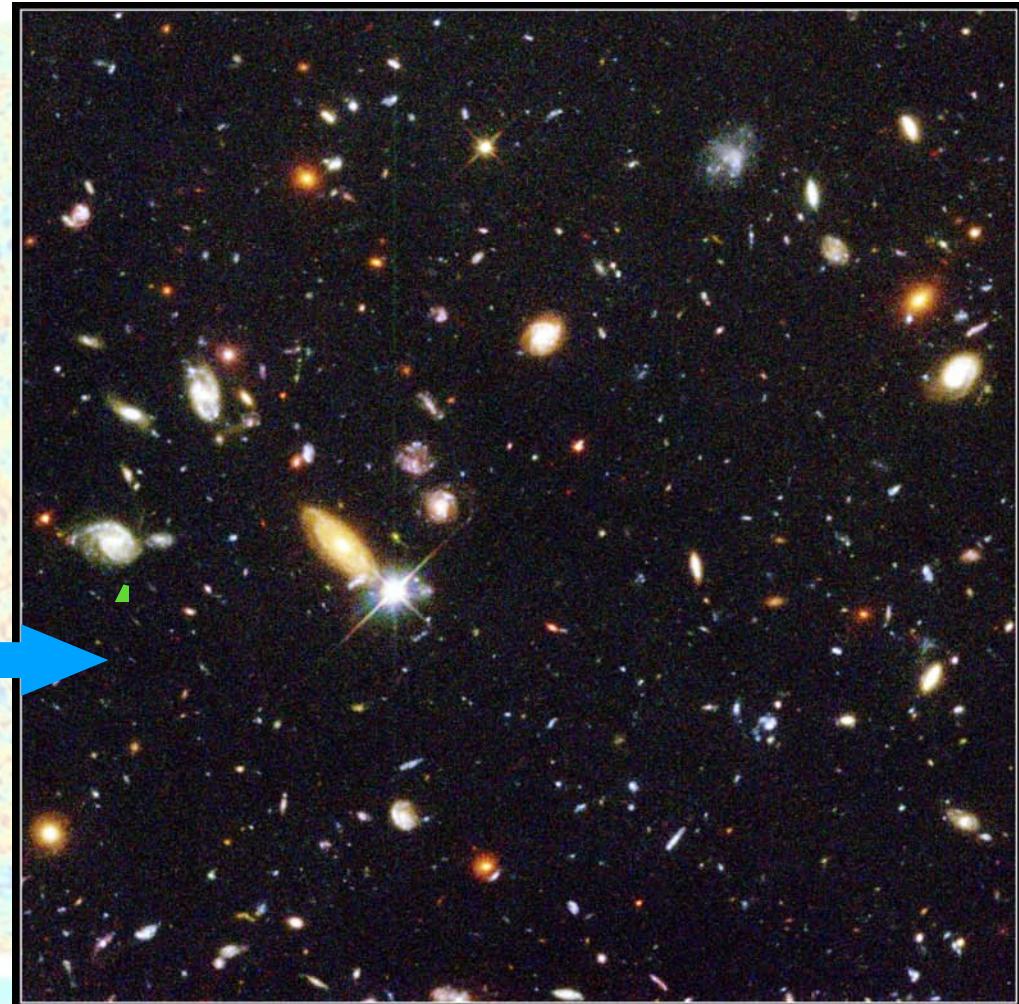
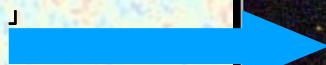


# Uma visão do Universo no séc. XXI

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

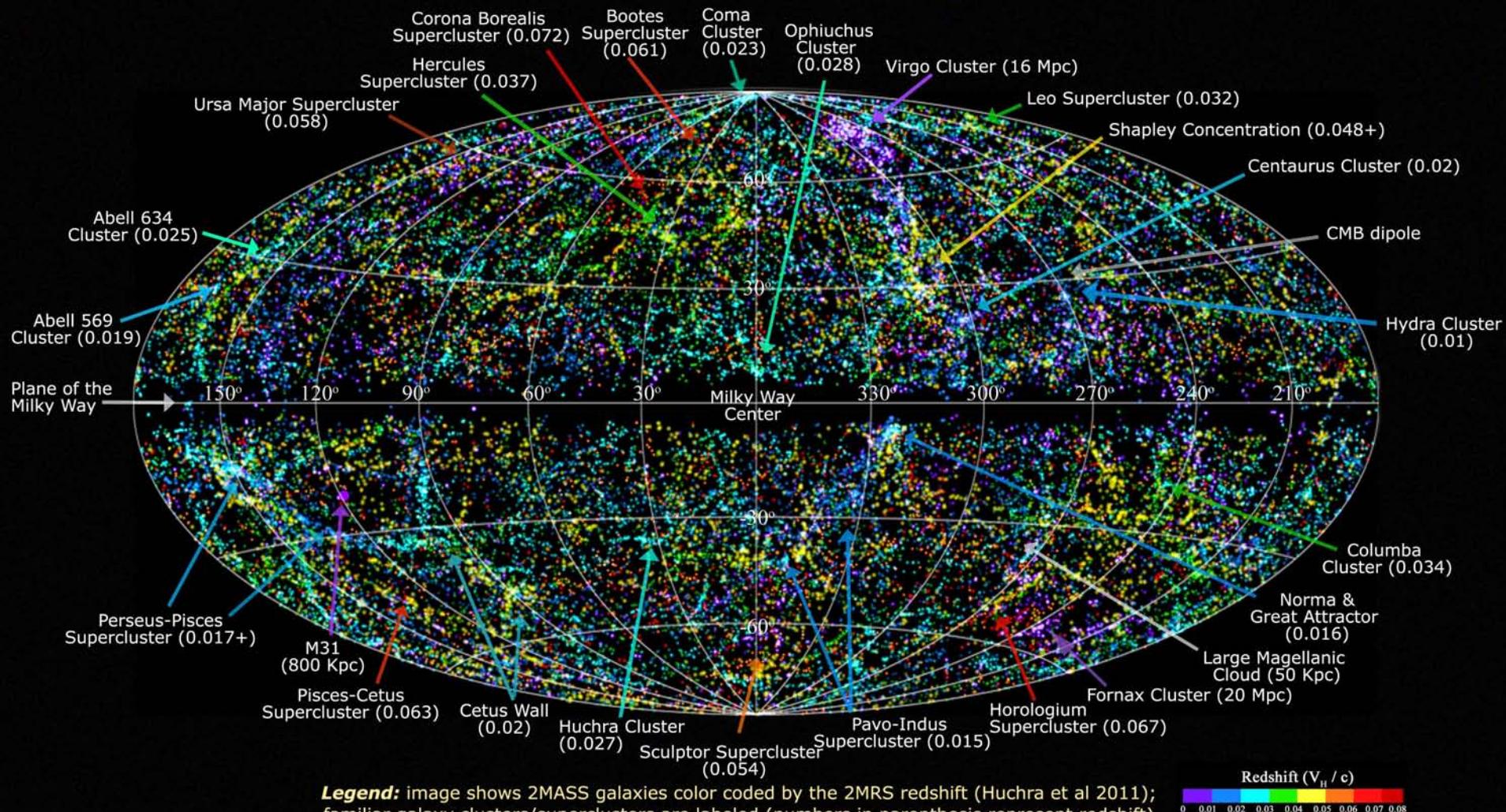
100 bilhões  
em todo o céu

30.000  
galáxias aqui



-200 $\mu$ K

# 2MASS Redshift Survey



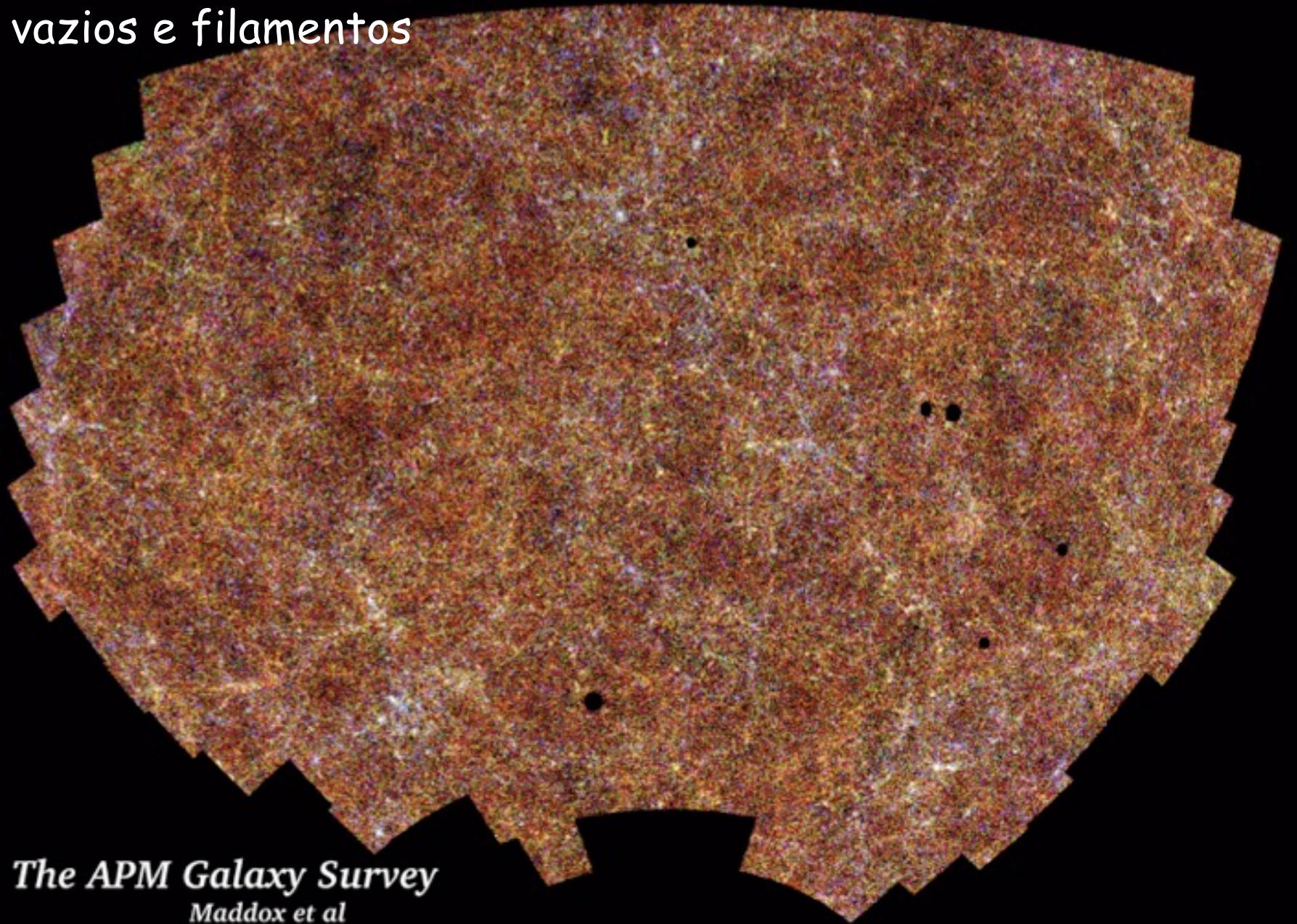
**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by the 2MRS redshift (Huchra et al 2011); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).



Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)



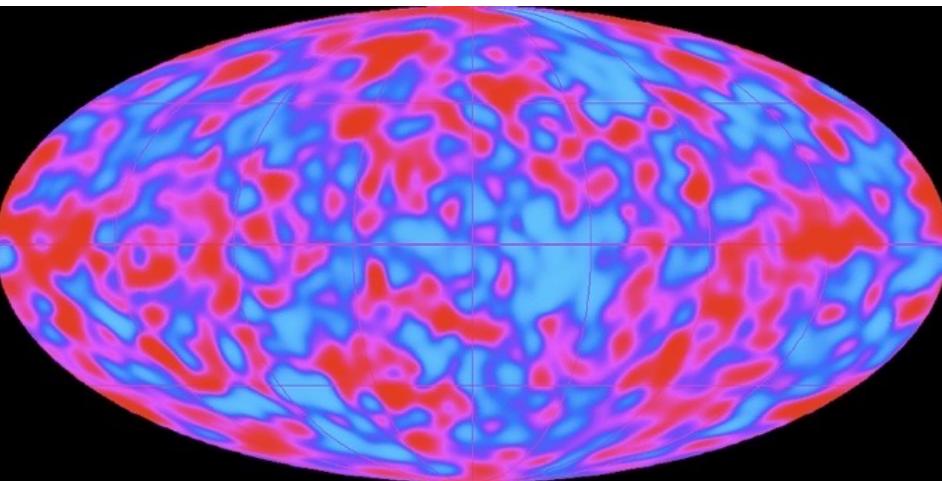
vazios e filamentos



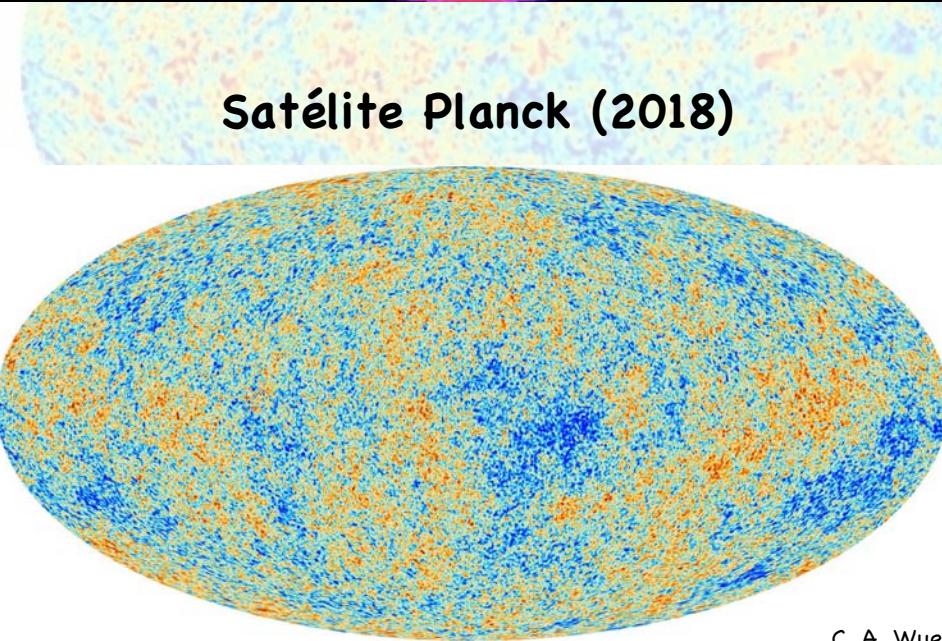
*The APM Galaxy Survey*  
*Maddox et al*

Medida de Penzias e Wilson  
(1965, simulado)

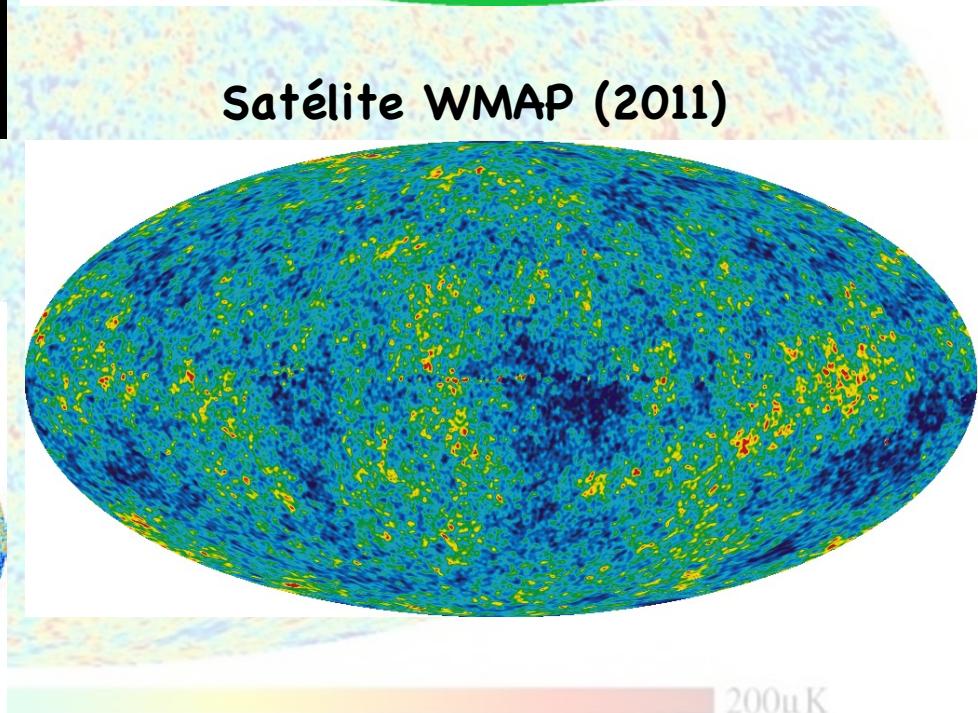
Satélite COBE (1996)



Satélite Planck (2018)



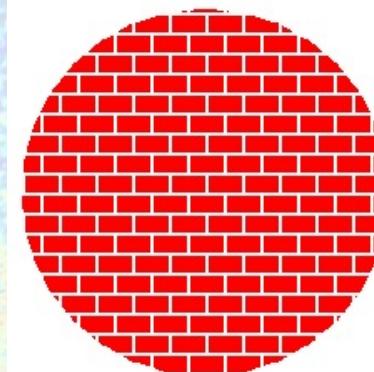
Satélite WMAP (2011)



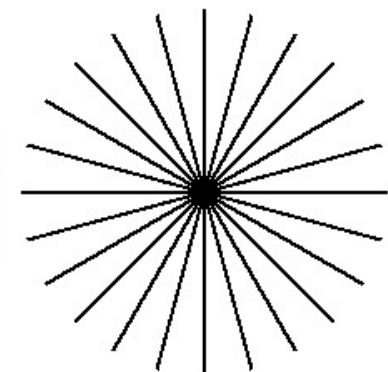
# Homogeneidade e isotropia

- ☒ 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 MUUUITO 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 observational 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

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# A EXPANSÃO DO UNIVERSO



# A expansão do Universo

Hubble - 1929

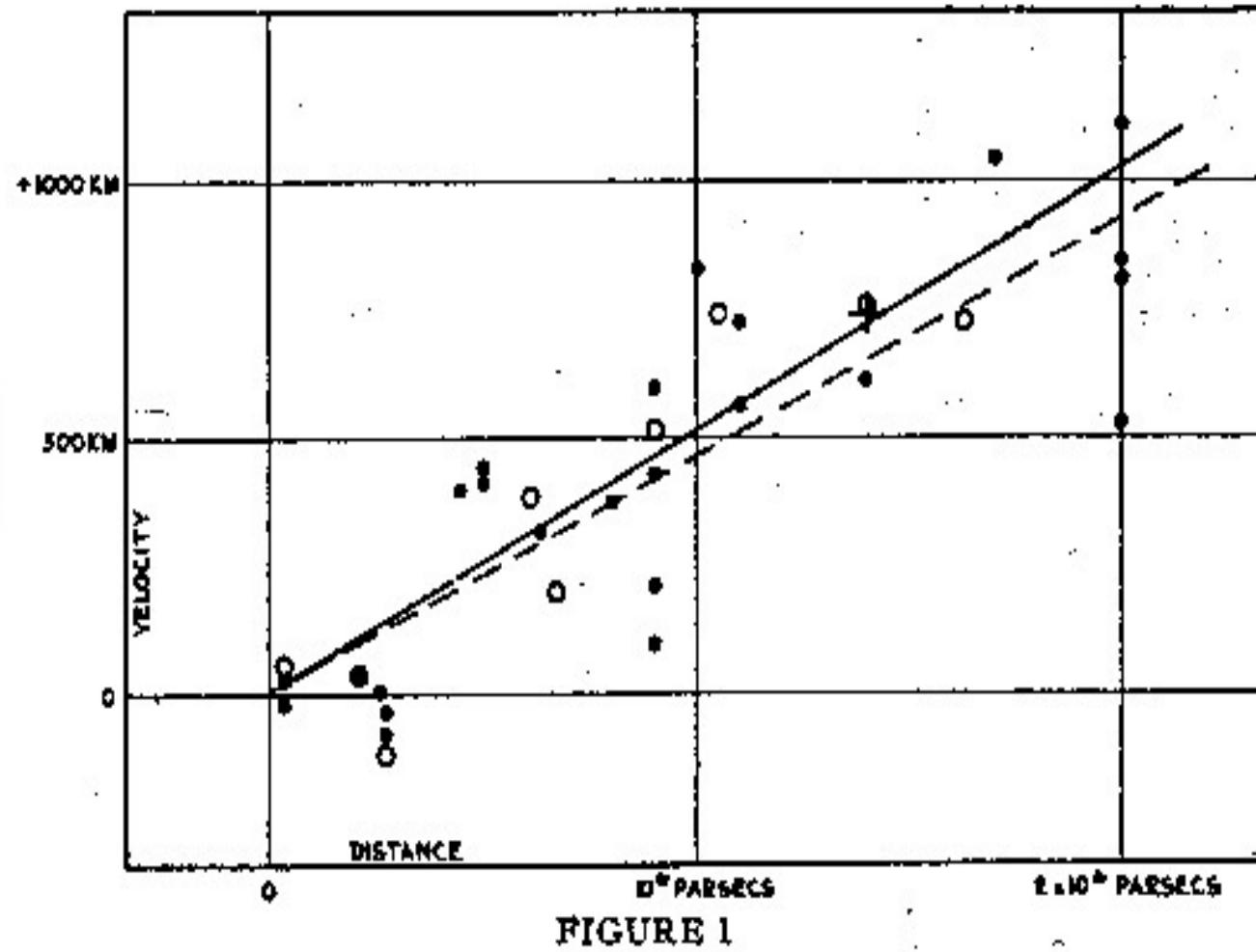
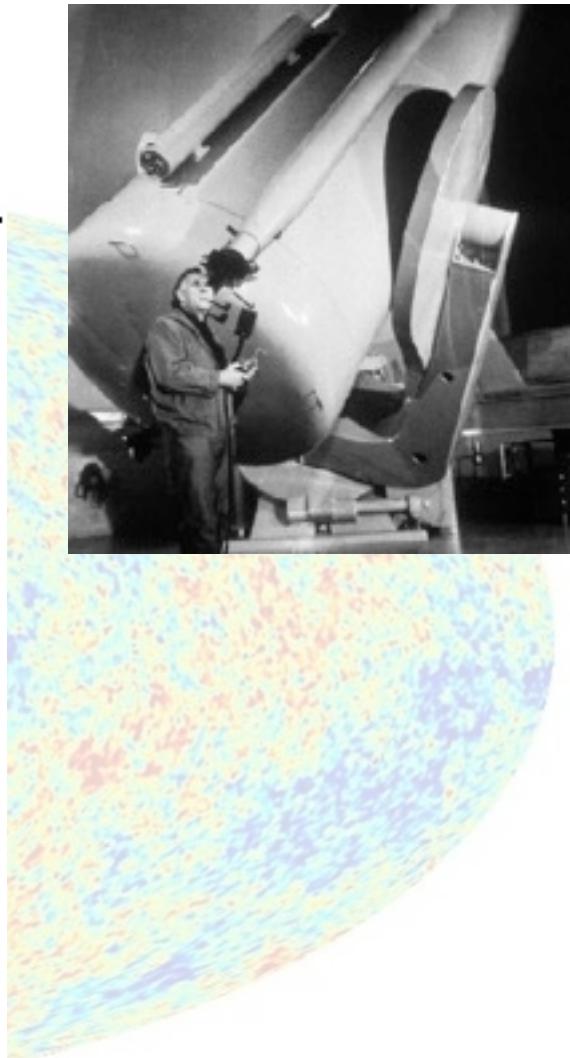
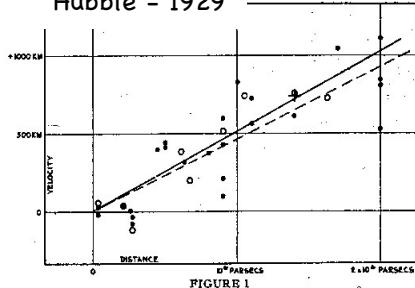


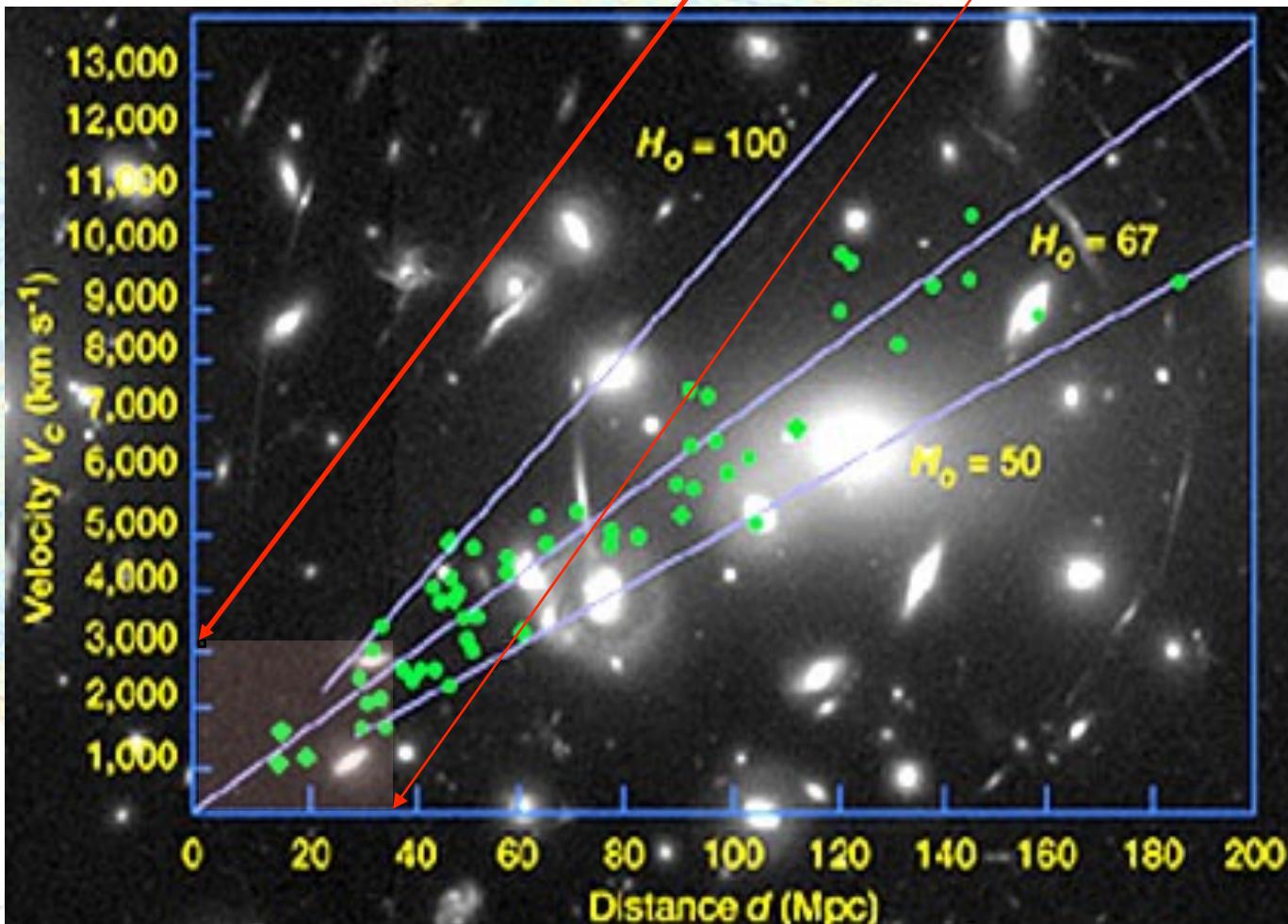
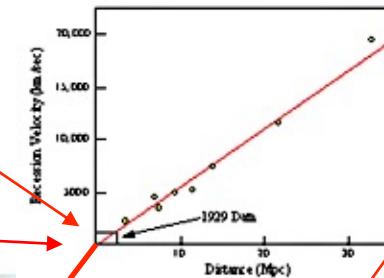
FIGURE 1



Hubble - 1929

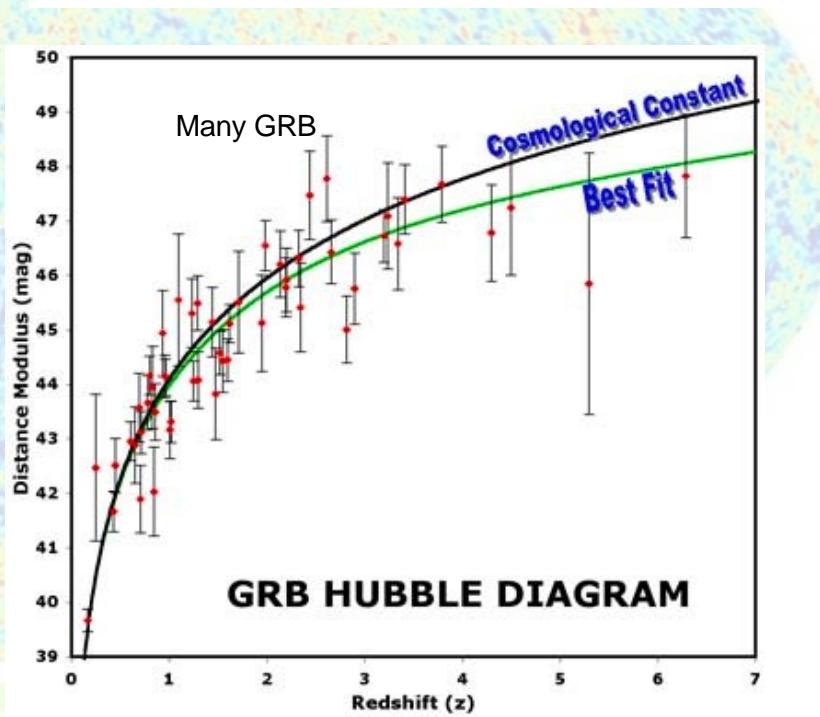
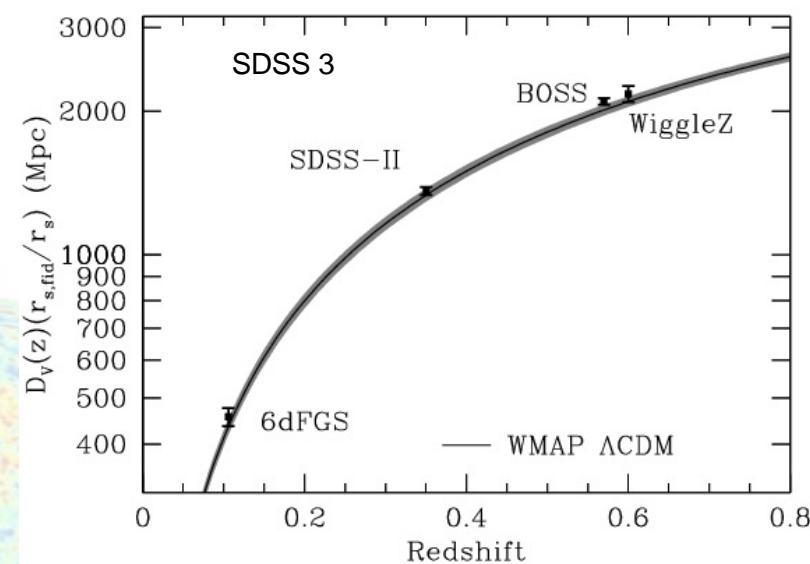
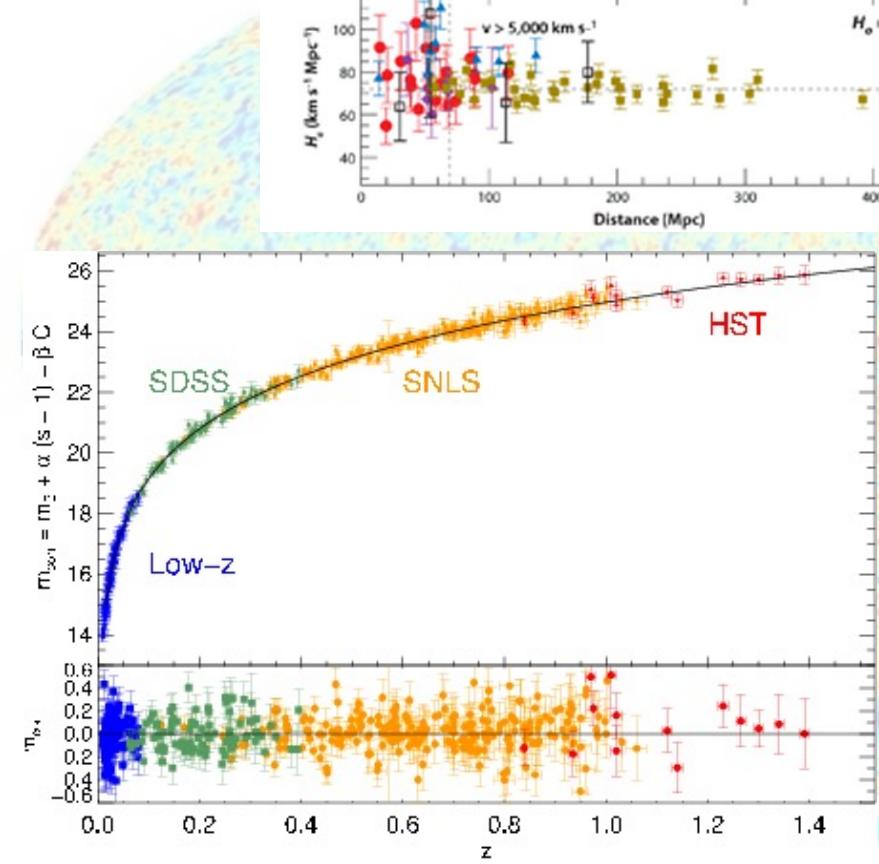


Hubble &amp; Humason (1931)

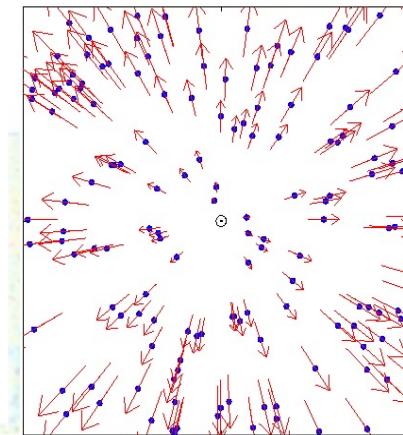
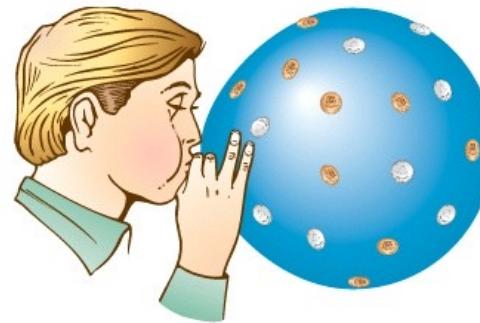




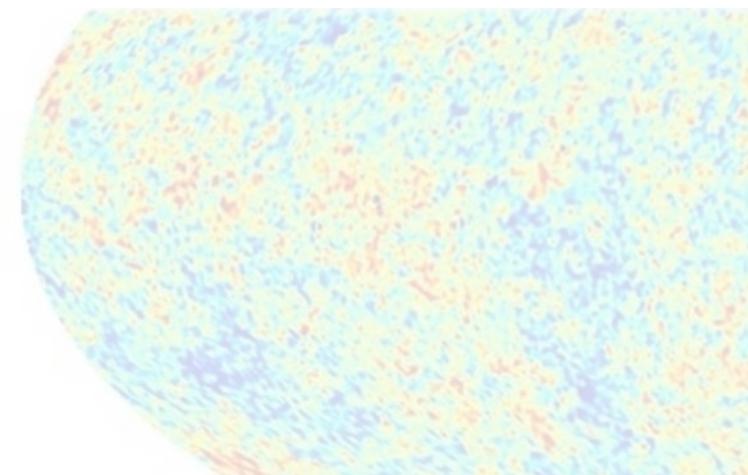
# Cepheid Key Project (Freedman 2001)



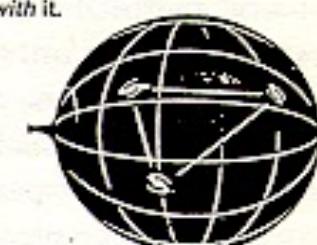
# A lei de Hubble



Não há  
centro do  
Universo



Wrong: space is static; galaxies expand into it.



Right: space is dynamic; galaxies expand with it.

Lei de Hubble:  $v=H_0d$

$-200\mu\text{K}$

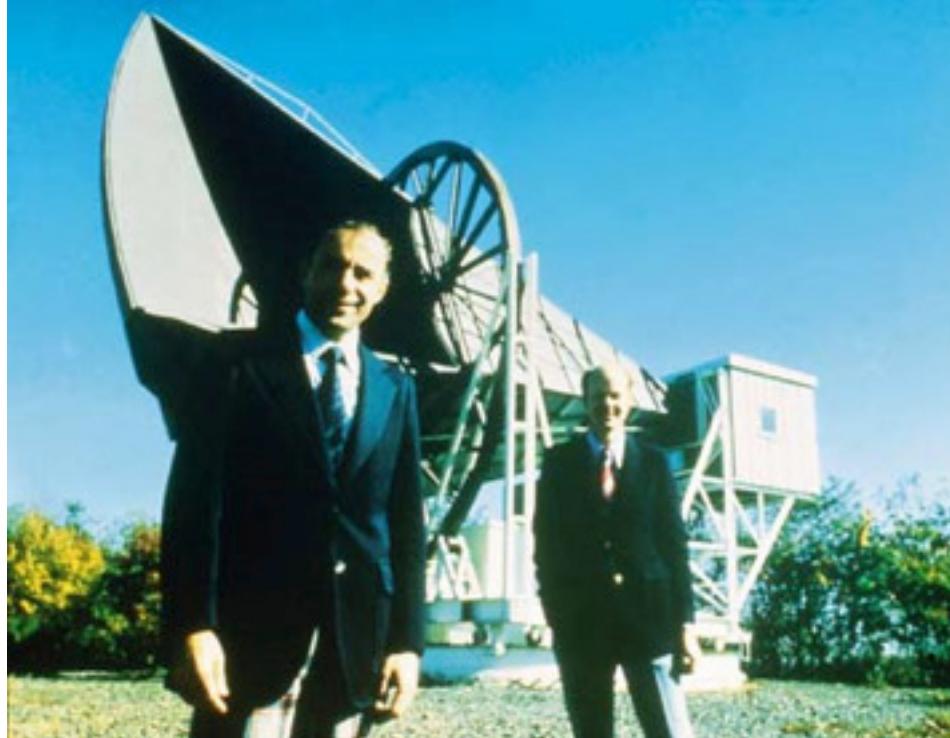
$200\mu\text{K}$



# A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS



# A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM)



A. Penzias e R. Wilson



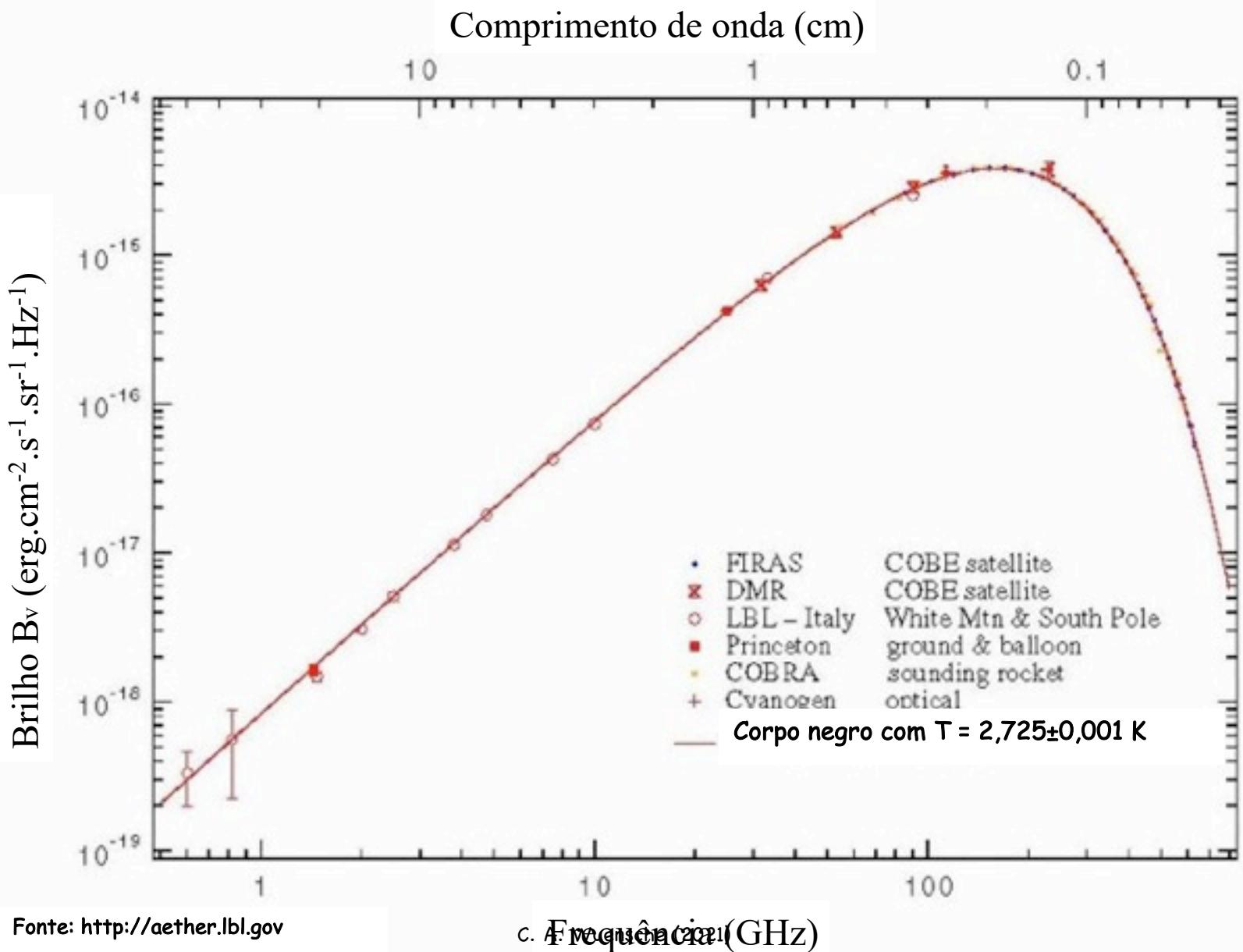
COBE (1989 - 1994)

Observamos seu espectro, distribuição angular, polarização.

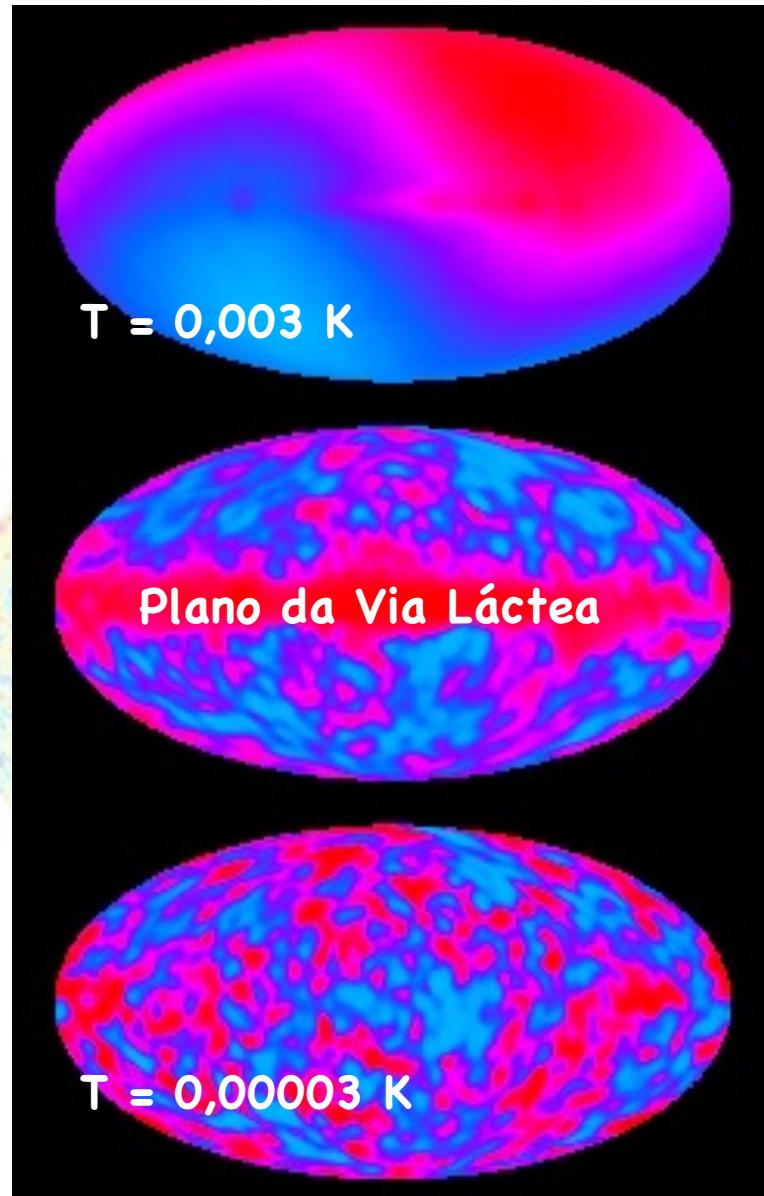
-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

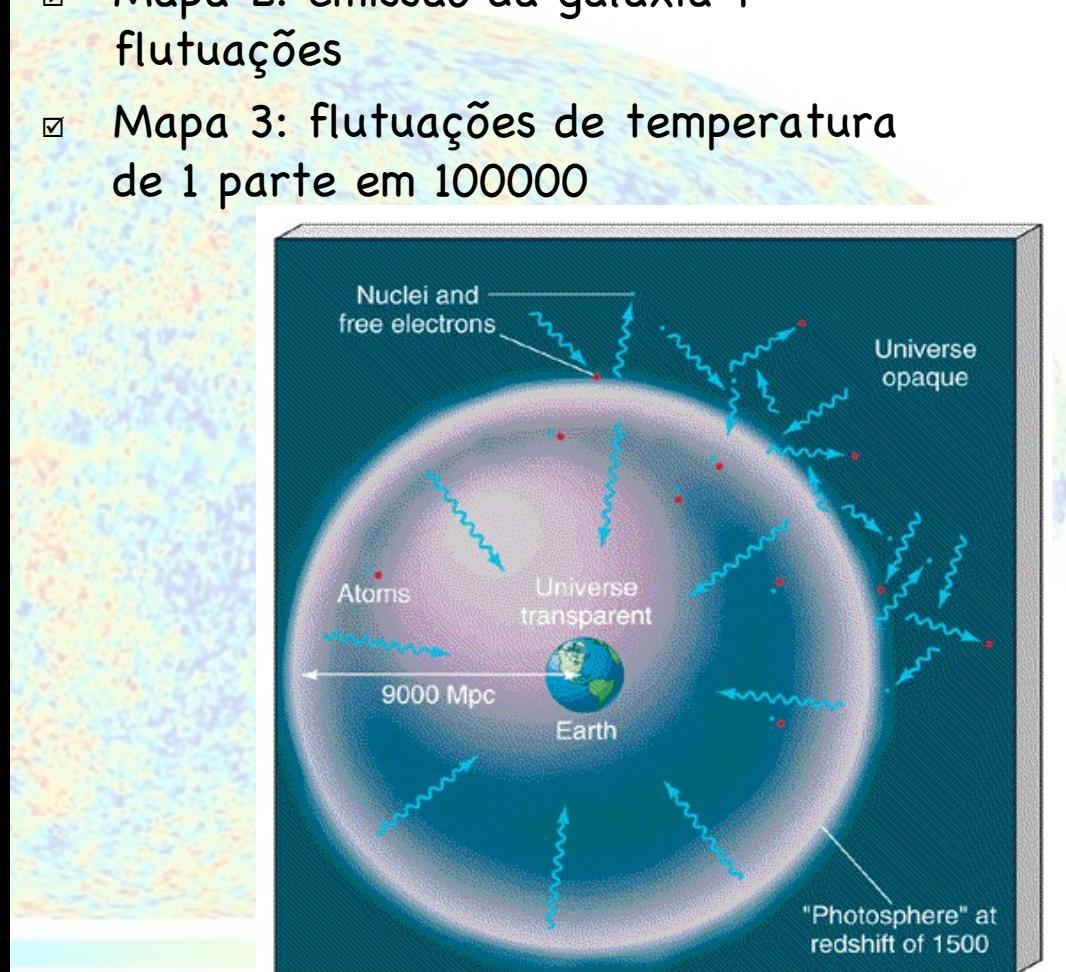
# RCF - espectro de corpo negro



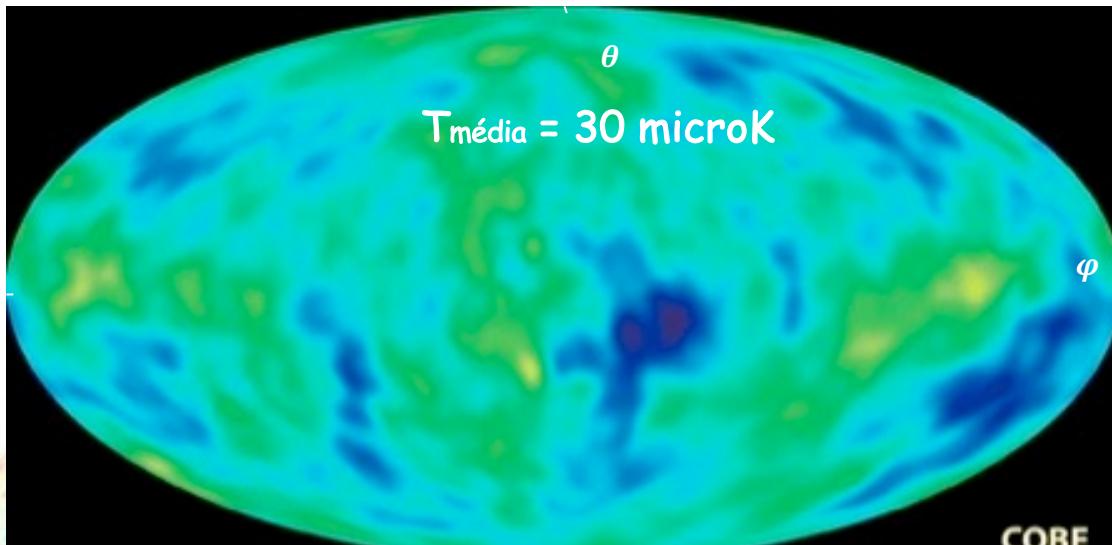
# RCF – distribuição angular



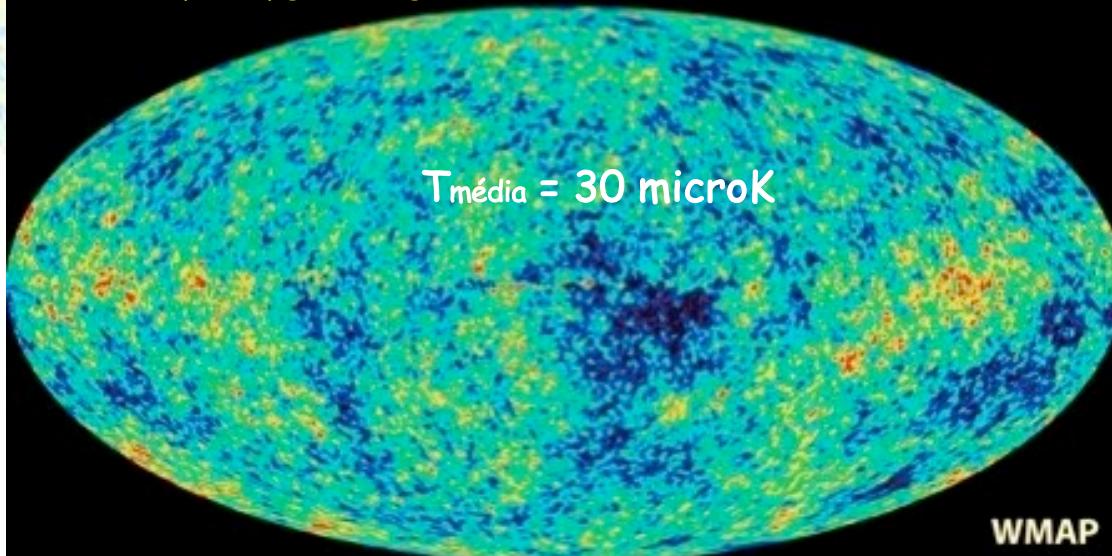
- Mapa 1: dipolo + emissão da galáxia + flutuações
- Mapa 2: emissão da galáxia + flutuações
- Mapa 3: flutuações de temperatura de 1 parte em 100000



# Flutuações de temperatura



Source: [http://map.gsfc.nasa.gov/m\\_or/m\\_or3.html](http://map.gsfc.nasa.gov/m_or/m_or3.html)



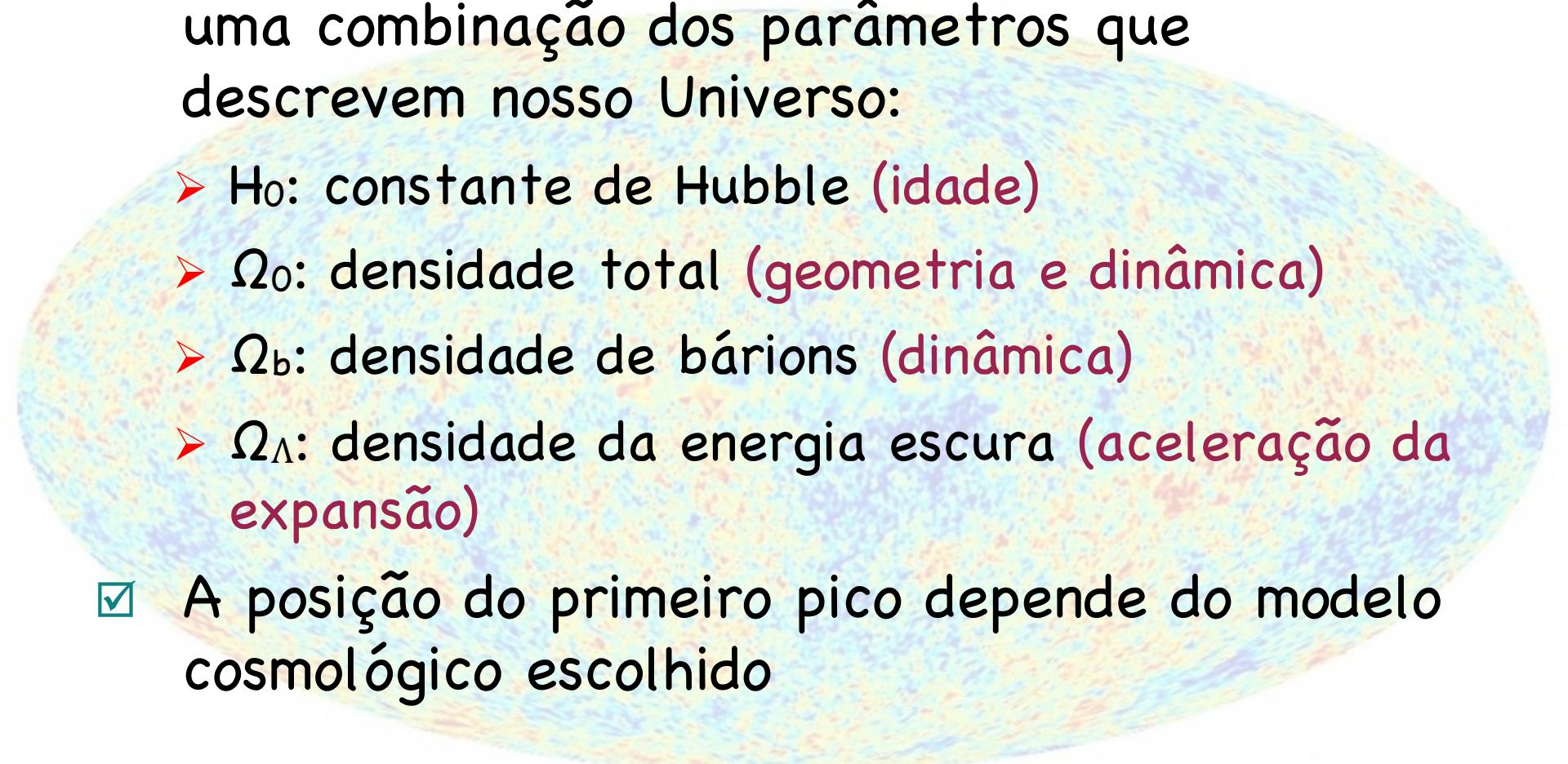
C. A. Wuensche (2021)

- 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 -

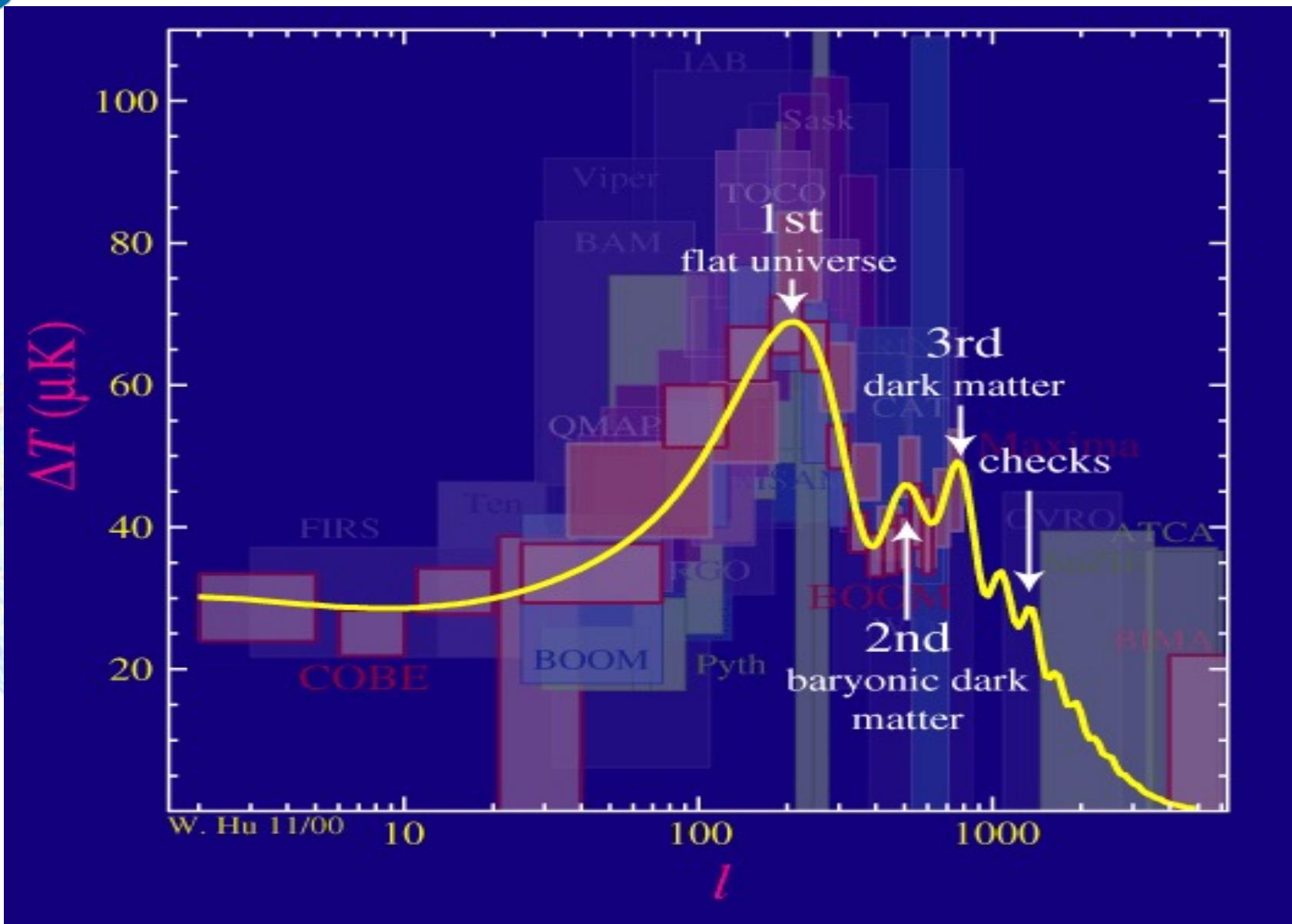
$$T(\theta, \varphi) = T_{RCF} + \Delta T(\theta, \varphi)$$

200 $\mu$ K

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

- 
- Fonte: home page Wayne Hu
- A posição e a altura dos picos dependem de 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

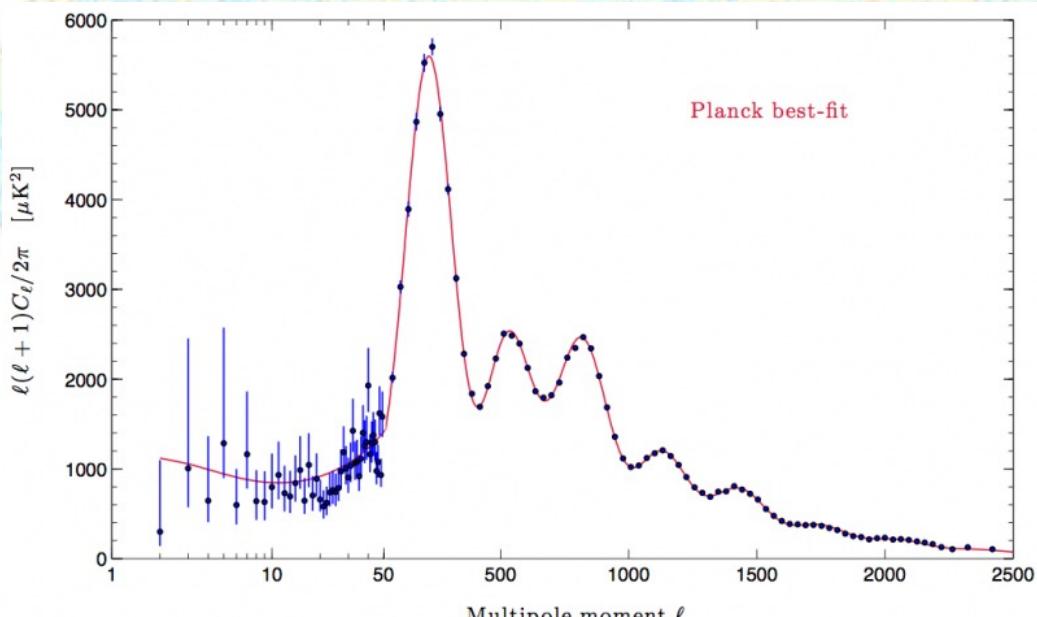
-200  $\mu\text{K}$ 200  $\mu\text{K}$



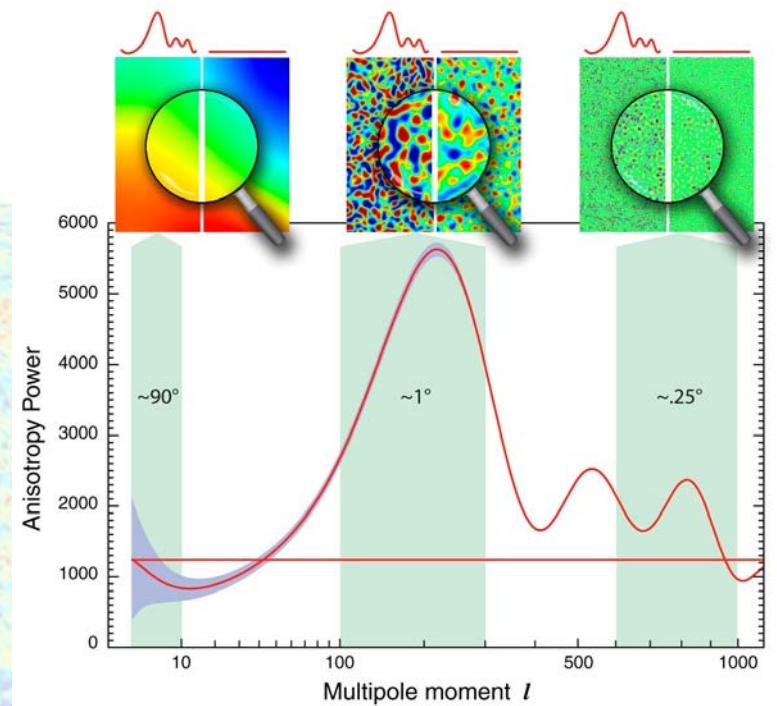
# Os espectros de potência das flutuações

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 abscissa 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>



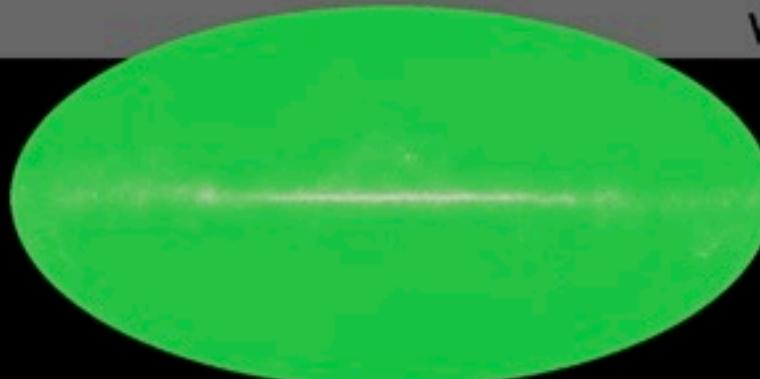
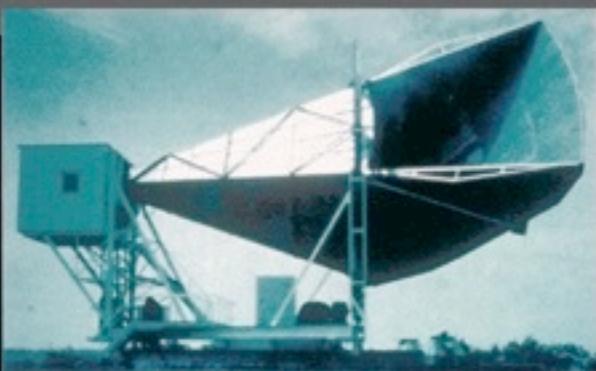
Fonte: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/>

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

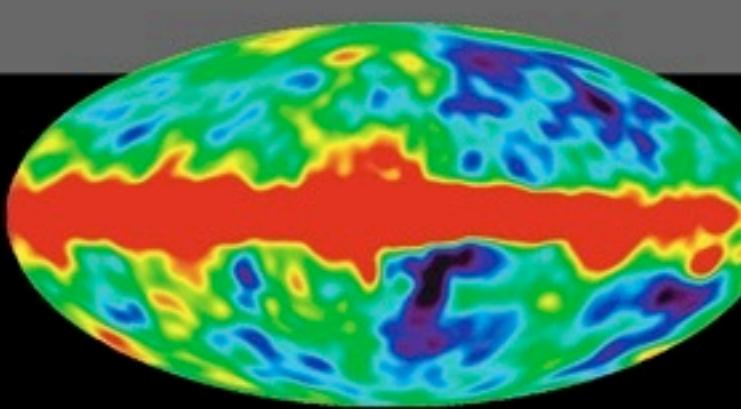
1965

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

Penzias and Wilson



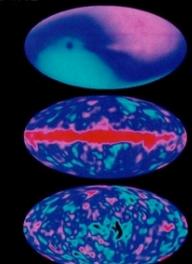
1992



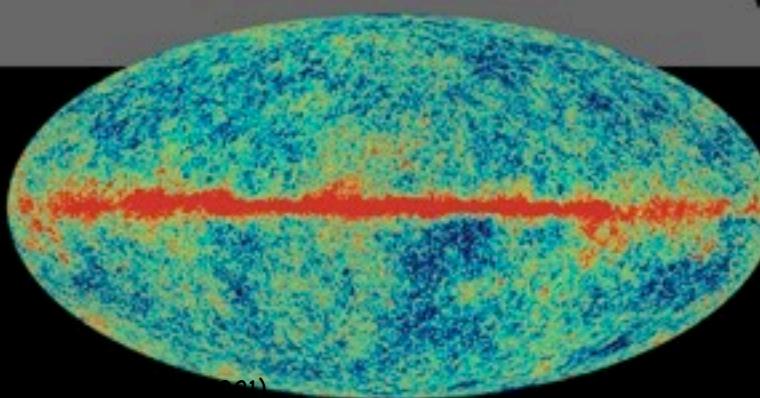
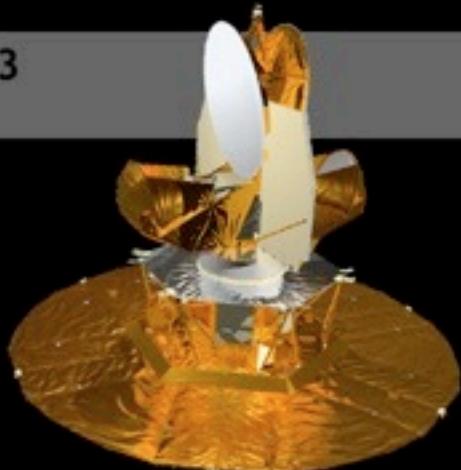
COBE

PHYSICS  
TODAY

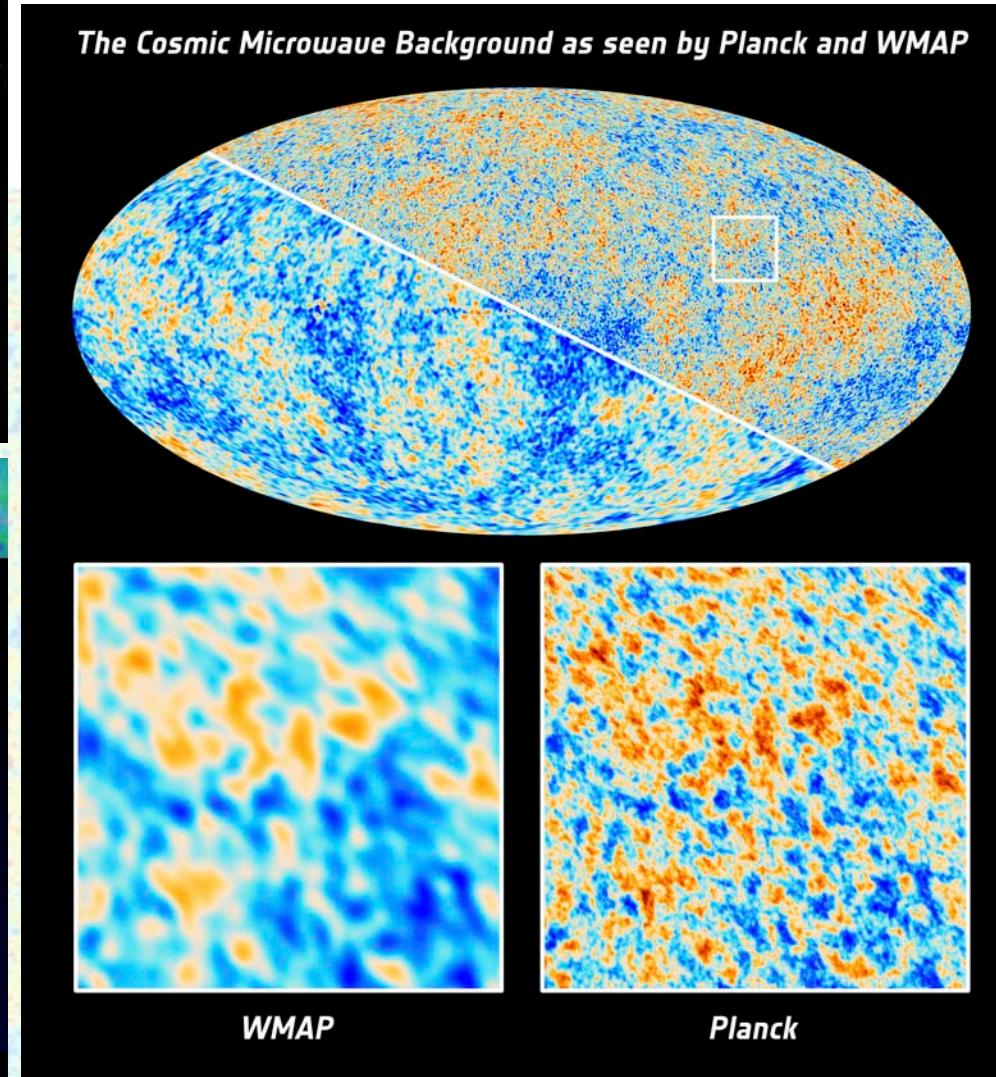
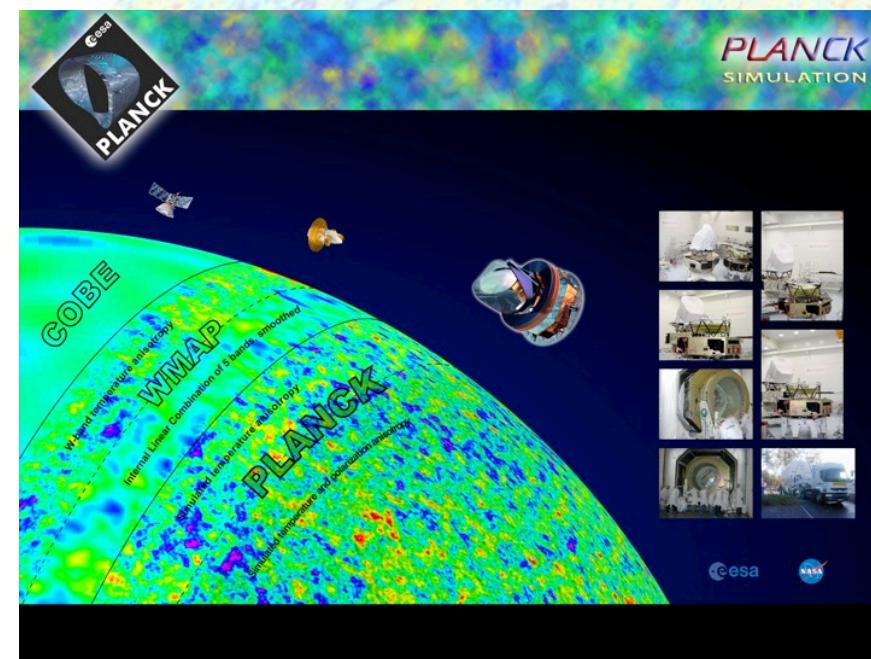
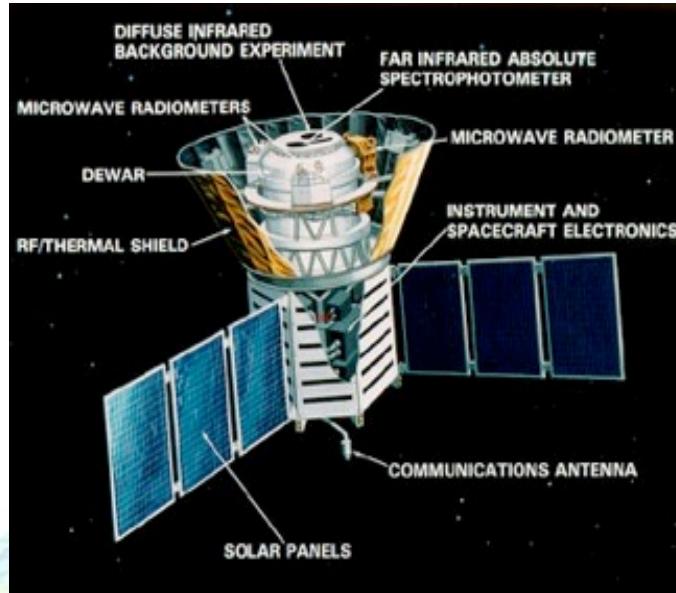
JUNE 1992



2003

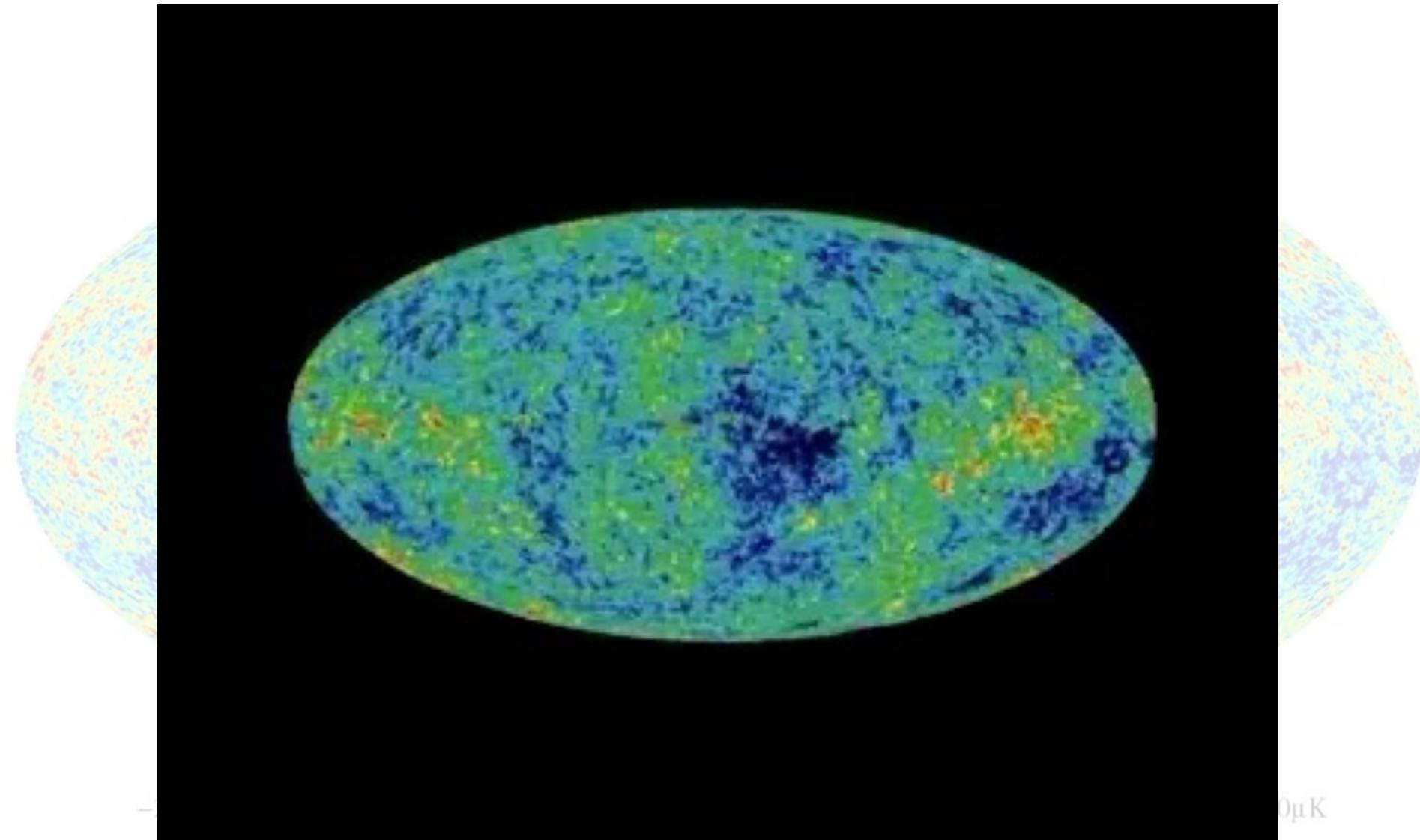


WMAP



Copyright: ESA and the Planck Collaboration; NASA / WMAP Science Team

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





# A FORMAÇÃO DE ELEMENTOS LEVES (NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL)

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# A formação de elementos leves



Herman Alpher

Hans Bethe

George Gamov

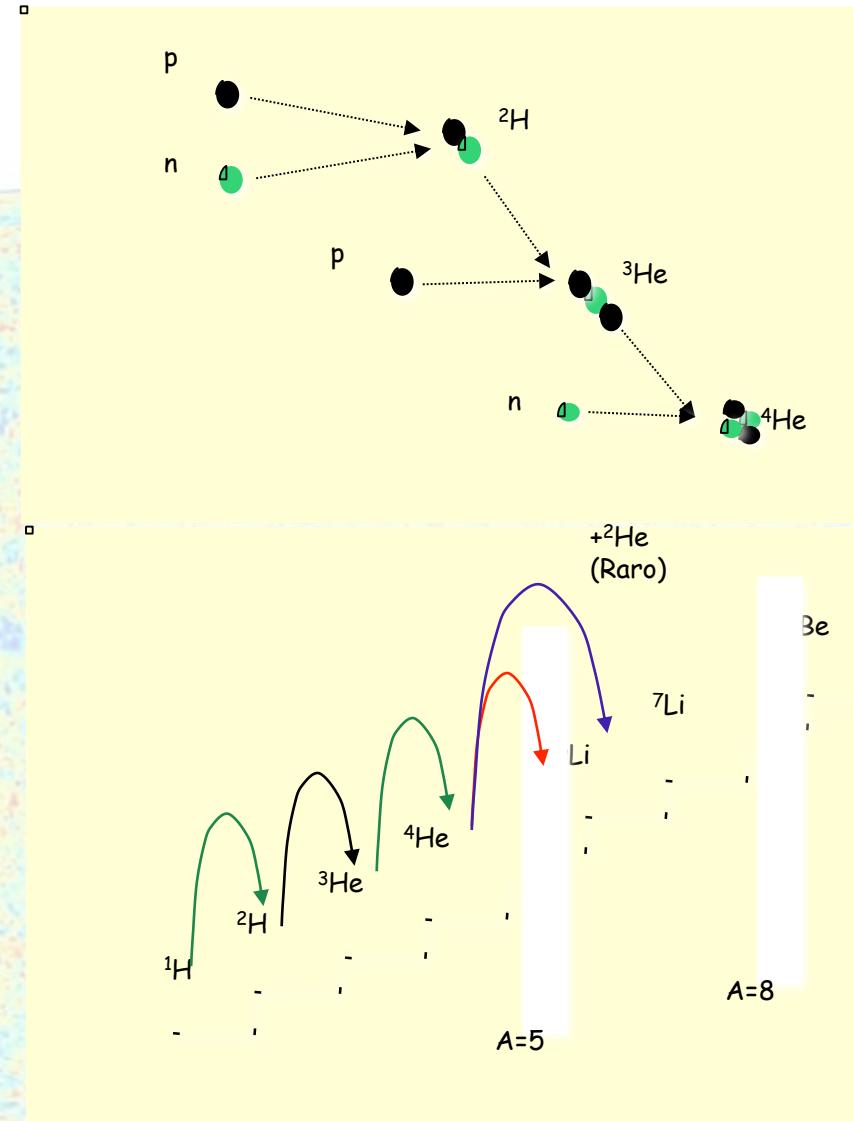
Em 1946, Alpher, Bethe e Gamov sugeriram a possibilidade de que todos os elementos químicos teriam sido gerados através de uma longa cadeia de captura de nucleons em 1 Universo primordial em expansão e que estaria esfriando-se.

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

# A formação de elementos leves

## Previsões da teoria:

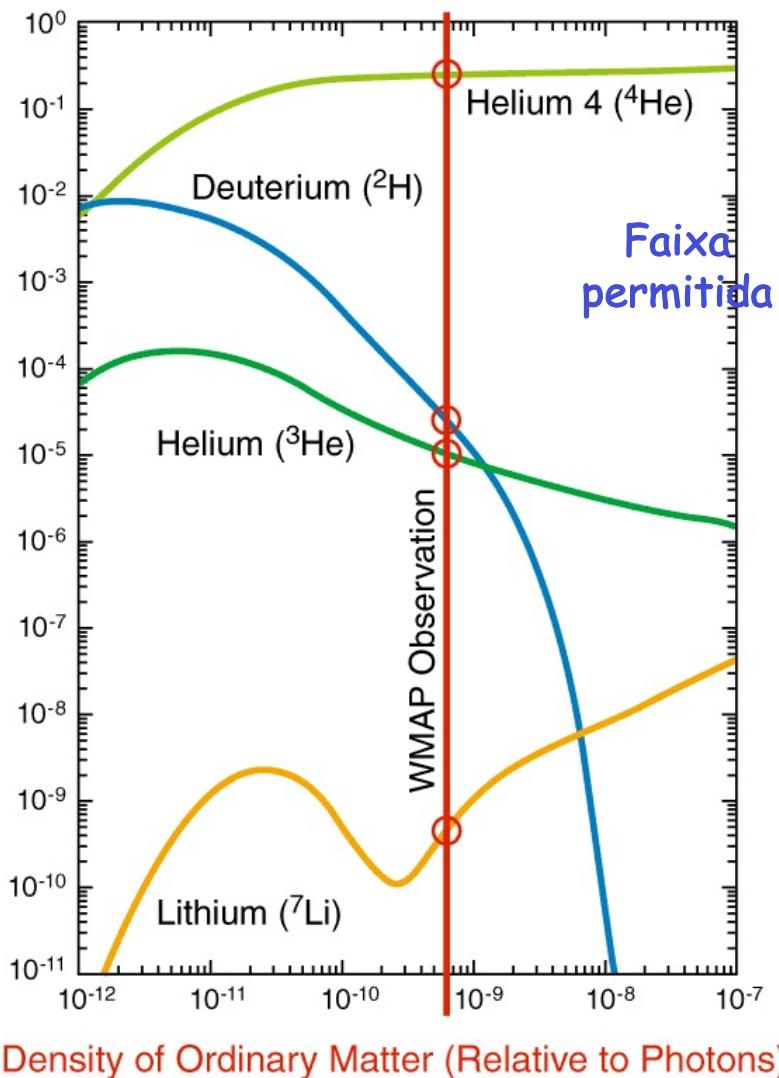
- Forma, essencialmente, Hidrogênio &  ${}^4\text{Hélio}$
- Forma, em muito menor quantidade,  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ , Li.
- Depende da razão entre prótons e neutrons na época e da taxa de decaimento do neutron.
- Razão ( $p:n$ ) = 7:1
- Abundância (por massa) de hélio = **25%** do total.



**Previsões baseadas em física bem conhecida**

# A formação de elementos leves

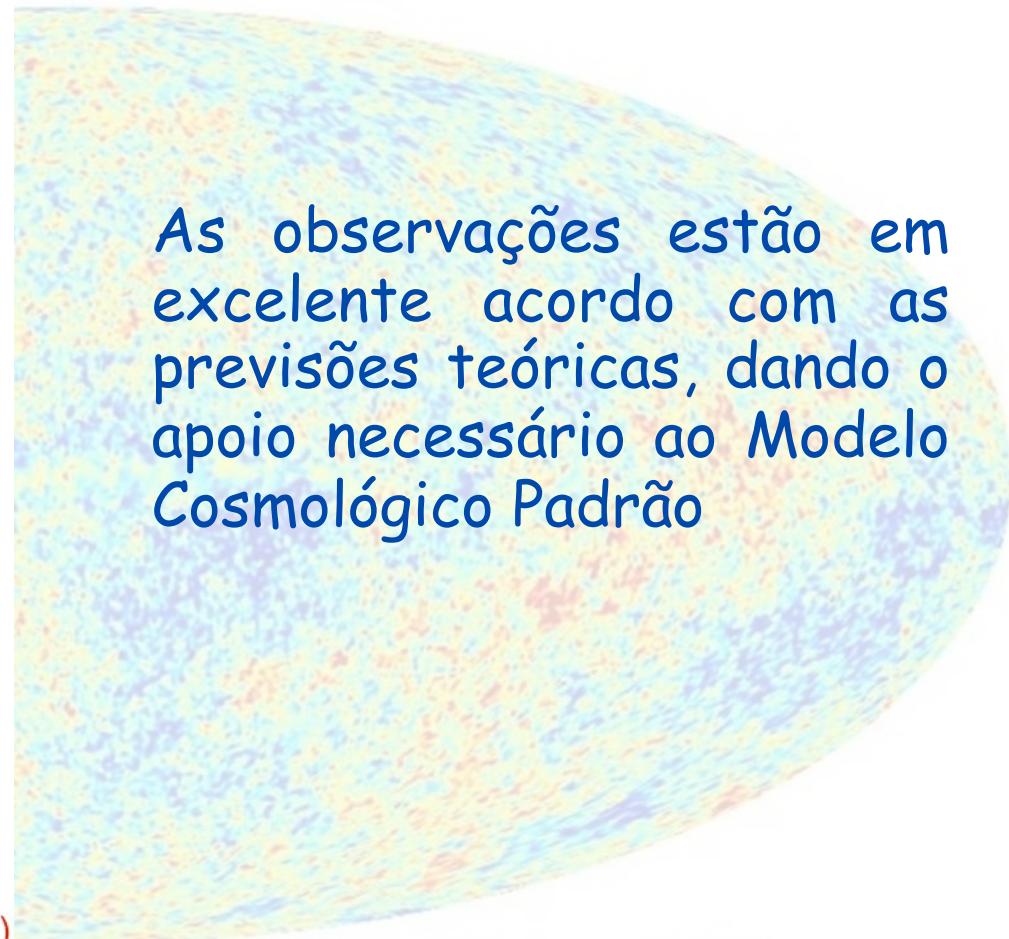
Element Abundance (Relative to Hydrogen)



NASA/WMAP Science Team  
WMAP101067

Element Abundance graphs: Steigman, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics (Institute of Physics) December, 2000

C. A. Wuensche (2021)



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

200  $\mu\text{K}$

# The Astronomer's Periodic Table

H

(Ben McCall)

He

□ □ □ □  
C N O Ne

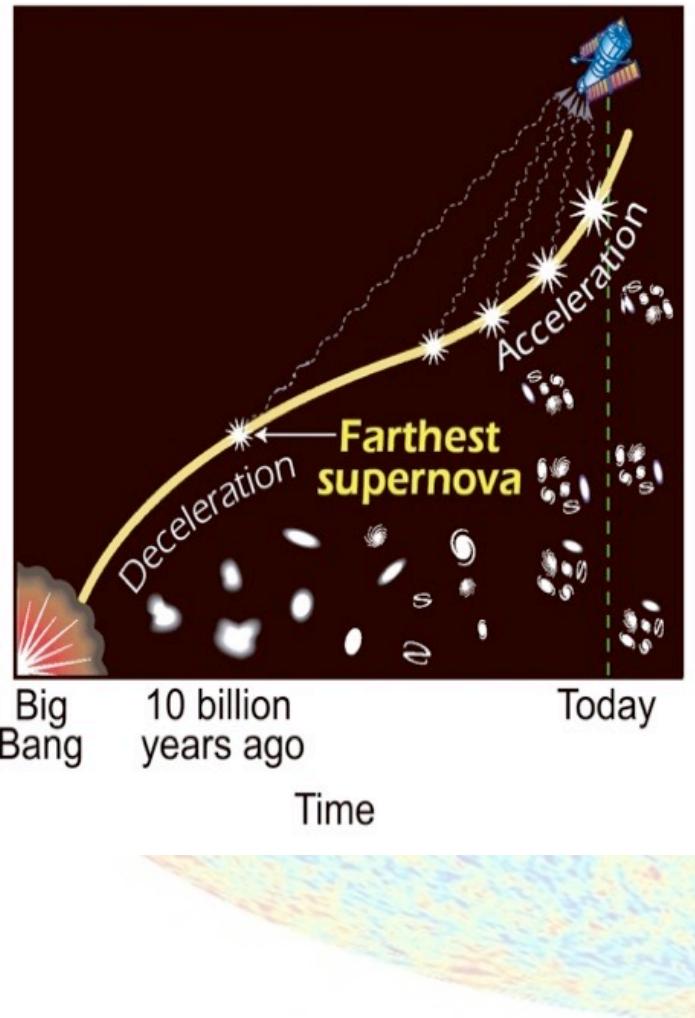
· · ·  
Mg Si S Ar  
· Fe

Courtesy Ben Mc Call

# A ACELERAÇÃO DA EXPANSÃO

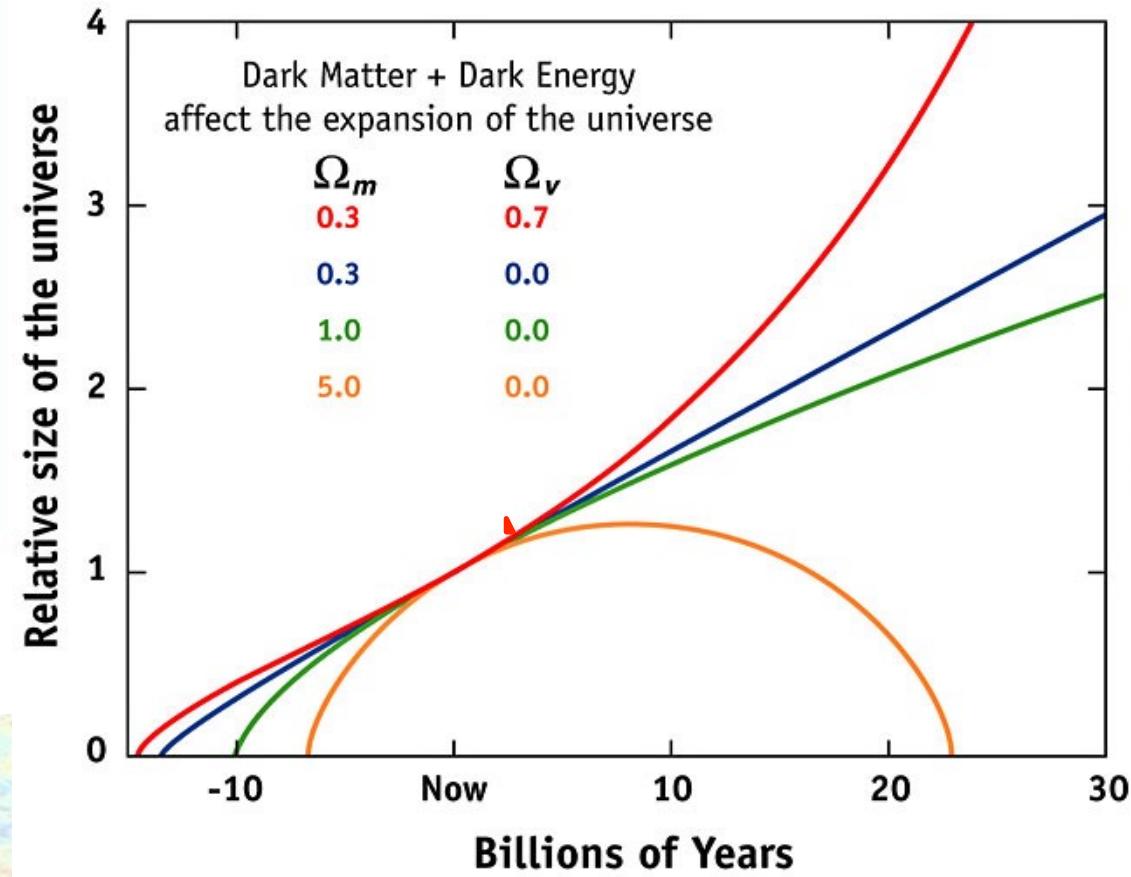


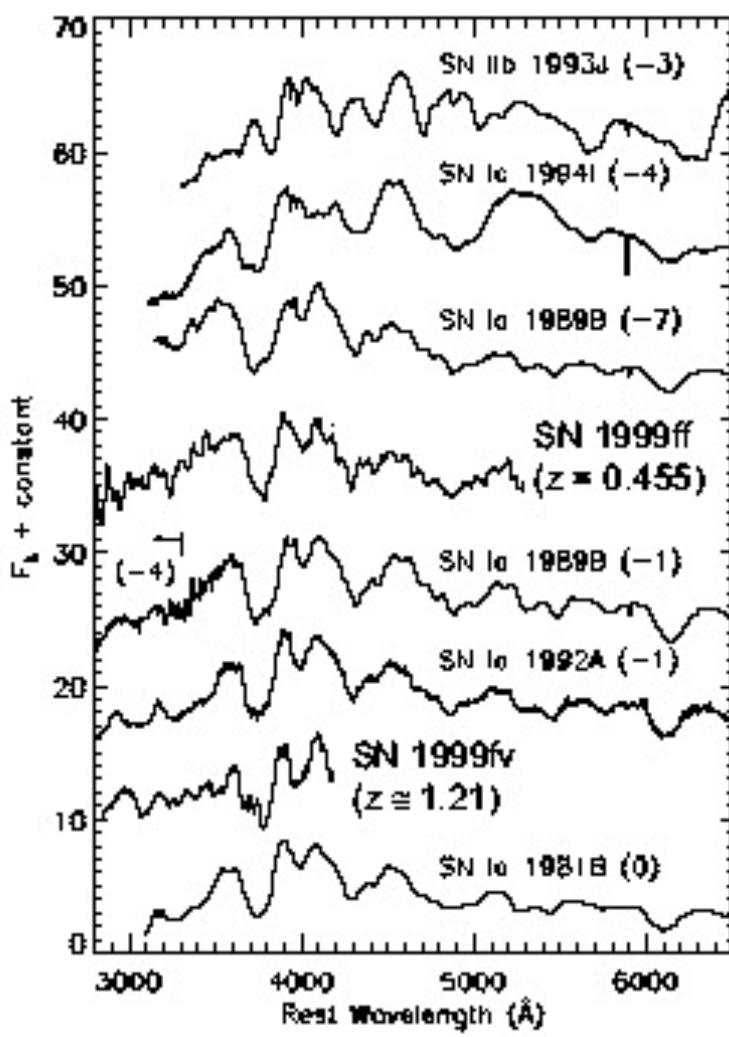
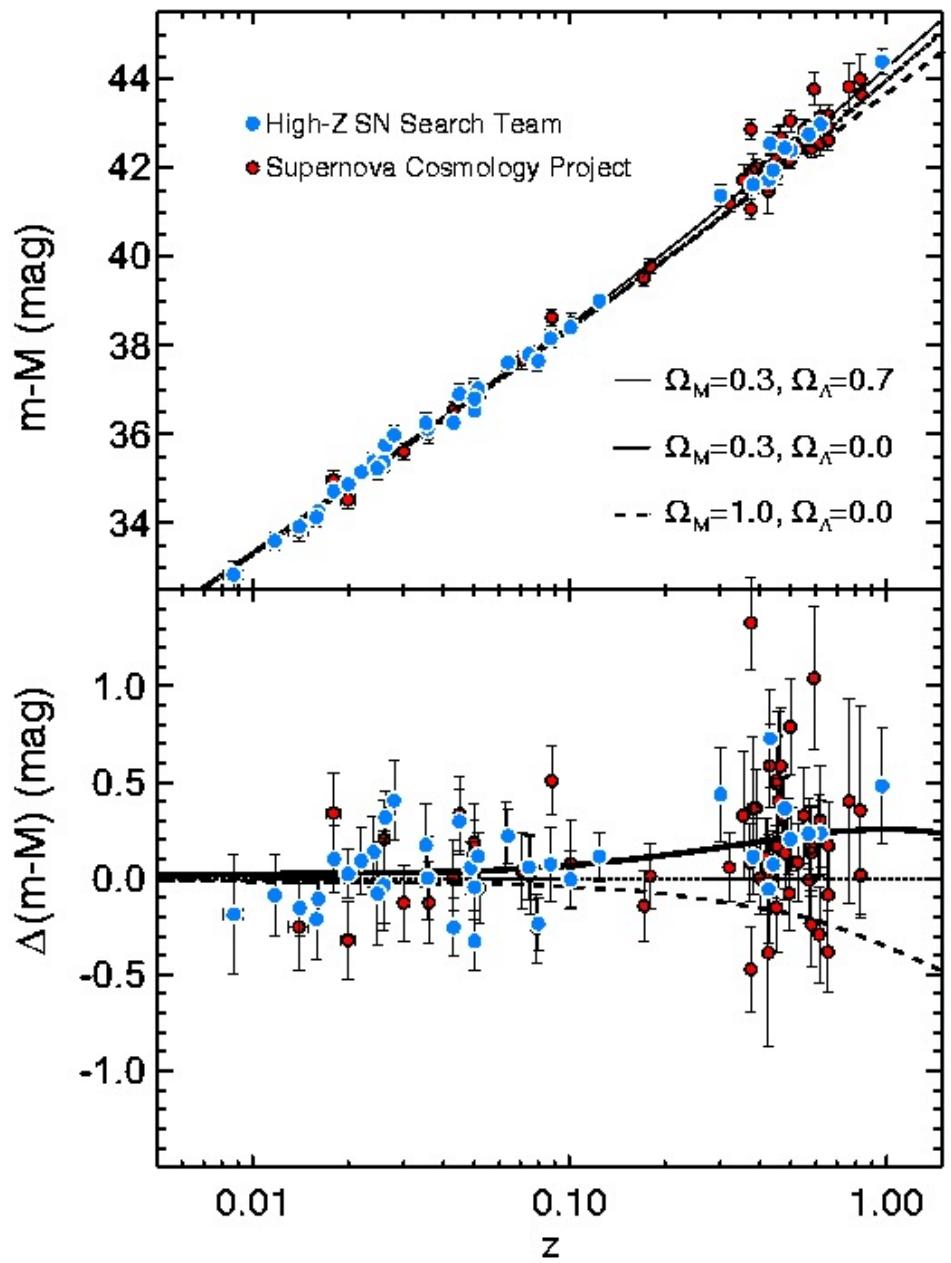
### Expansion of the Universe



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

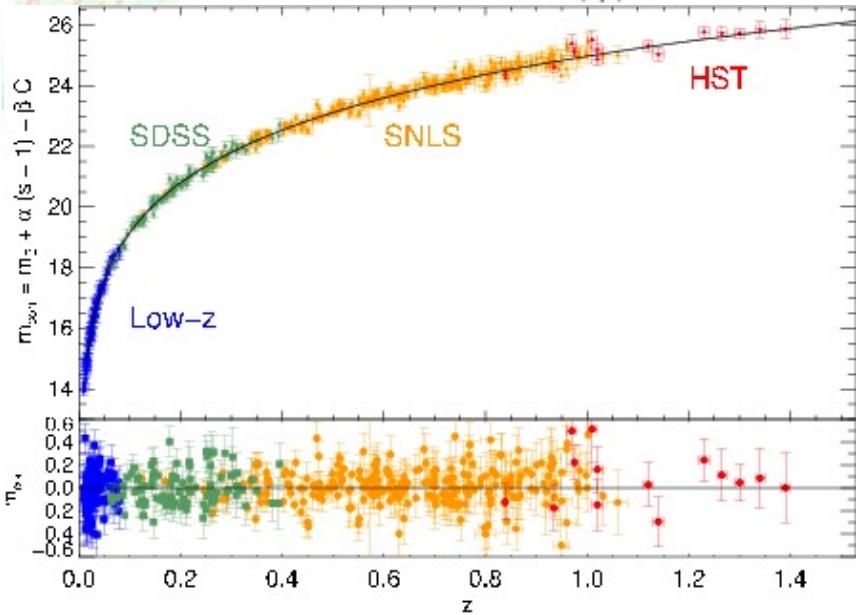
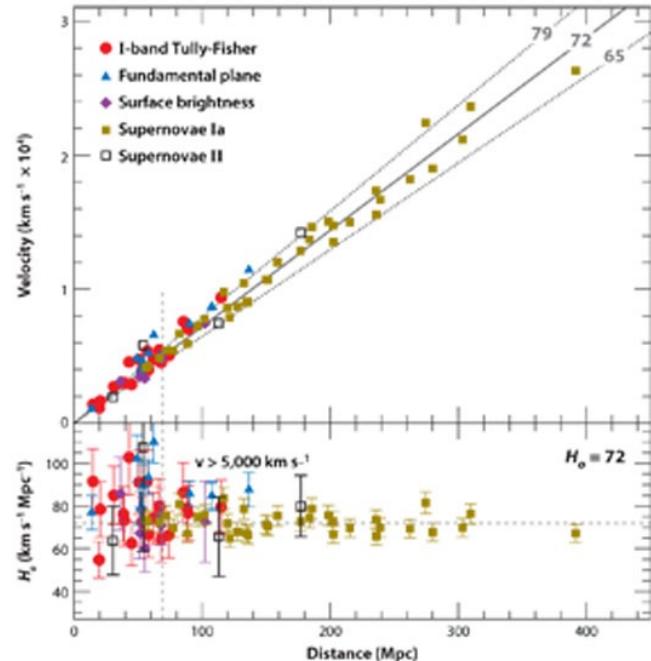
## EXPANSION OF THE UNIVERSE





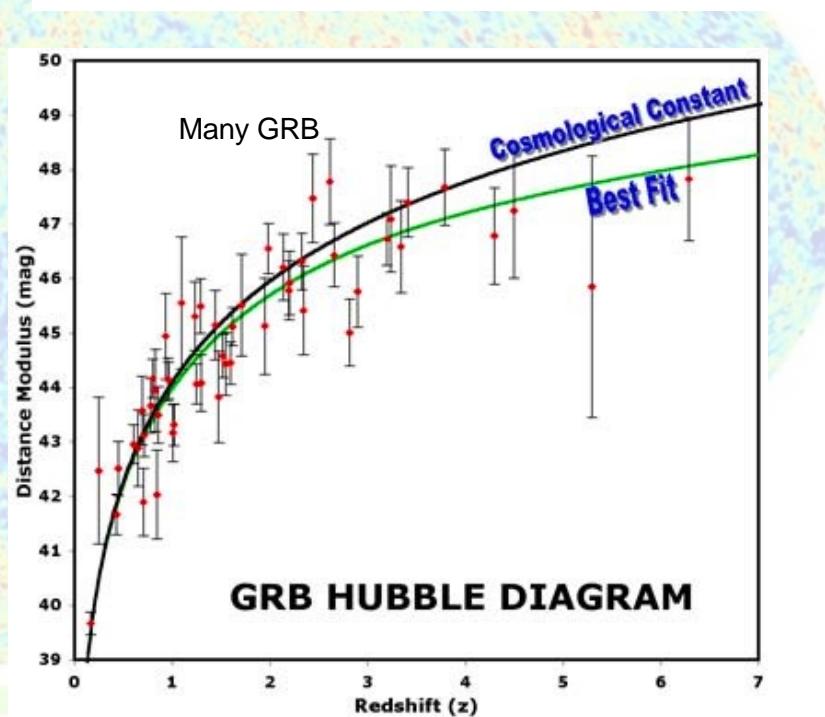
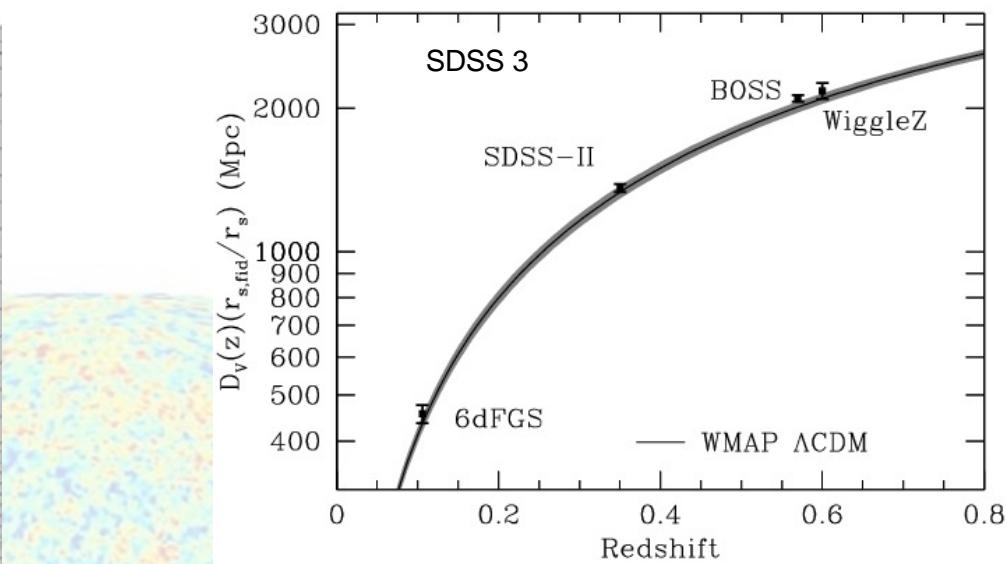


## Cepheid Key Project (Freedman 2001)



Hook, I.M. arXiv:1211.6586 [astro-ph.CO]

C. A. Wuensche (2021)



# A Cosmologia do séc. XXI

## Einstein's GR

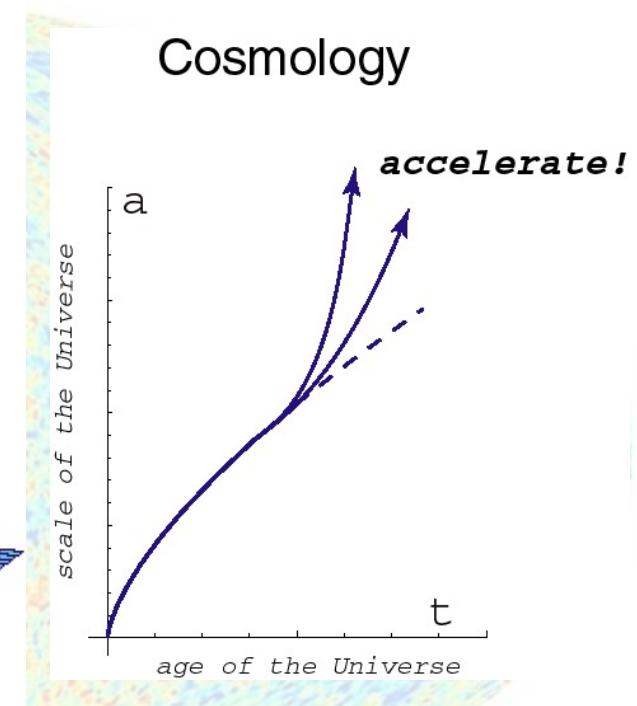
$$\frac{3C^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m + \rho_?$$

↓  
expansion  
↓  
matter  
↓

**Dark Energy:**  
**Vacuum?**  
**Quintessence?**

## Geometry

**flat!**



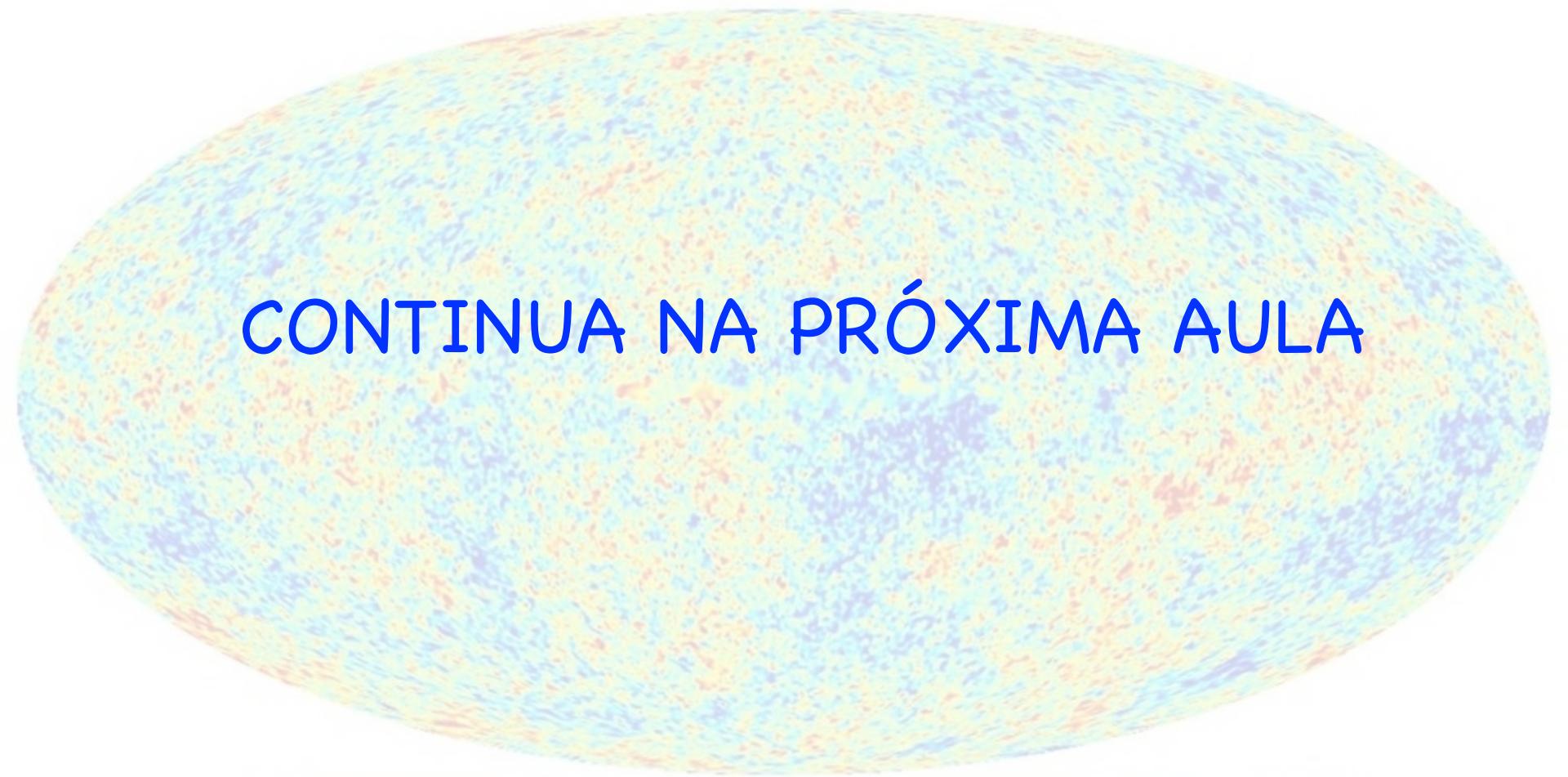
-200 $\mu$ K  200 $\mu$ K

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 K

-200 $\mu$ K200 $\mu$ K



CONTINUA NA PRÓXIMA AULA

