



COSMOLOGIA - I

Introdução

Carlos Alexandre Wuensche

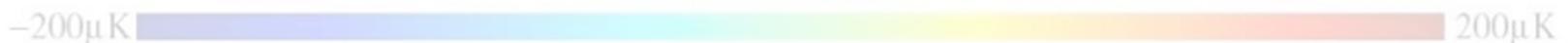
ca.wuensche@inpe.br





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

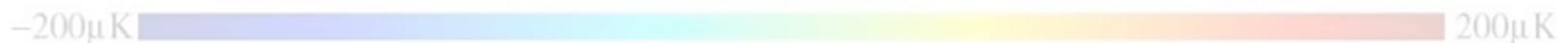
- ☑ Qualquer modelo realista do Universo deve ser capaz de explicar as seguintes observações:
 - A expansão do Universo, dada pela velocidade de recessão das galáxias distantes
 - A observação recente da aceleração da expansão
 - A radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM)
 - A nucleossíntese primordial





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: 6×10^{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, $c = k = \hbar/2\pi = G = 1$!!!!

COSMOLOGY MARCHES ON

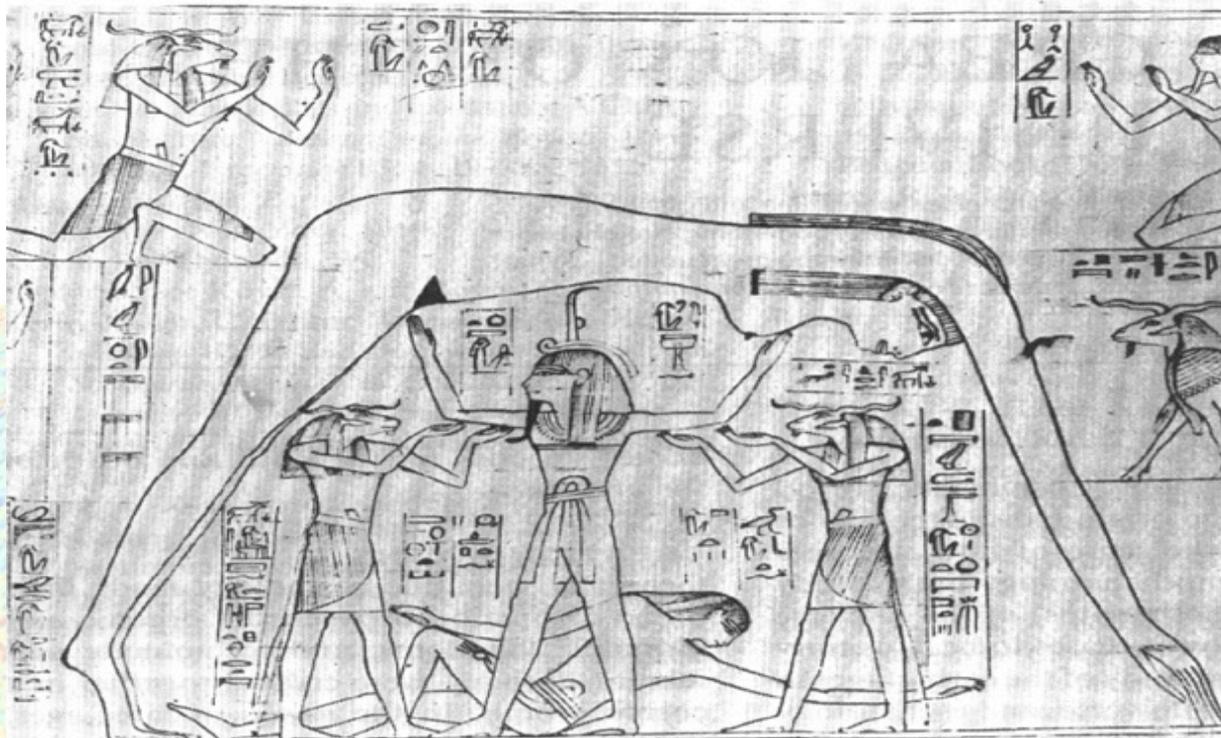




UM POUCO DE HISTÓRIA...



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 μ K

200 μ 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

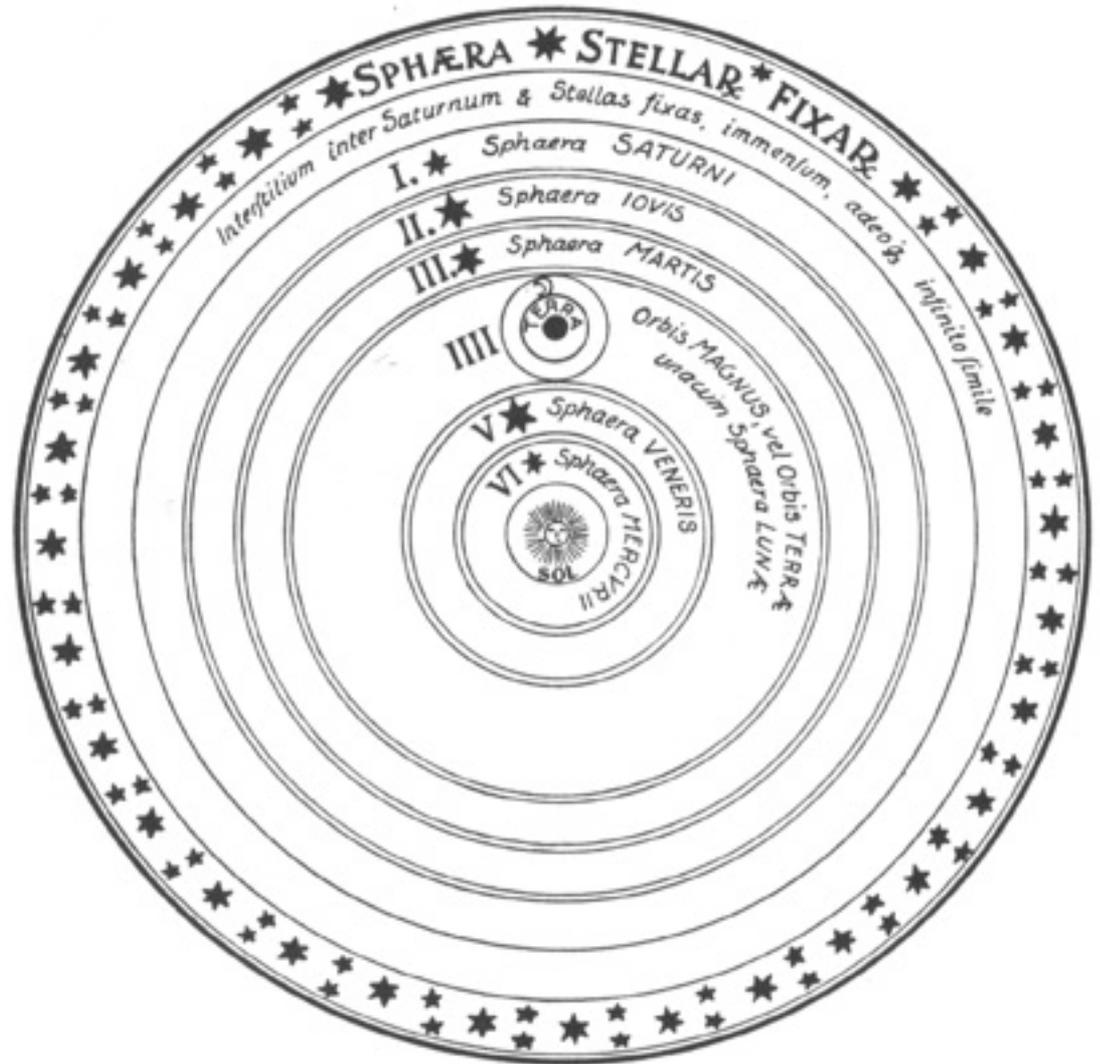


Nessa época os modelos de Universo consideravam que a Terra estava no centro de tudo e que o céu era uma tampa com buracos. A luz proveniente de fogos ardendo no lado de fora brilharia através dos buracos e alcançaria a Terra como a luz das estrelas.

Uma visão do Universo por volta de 1500 AC



Niclas Kopernik
(1473 – 1543)

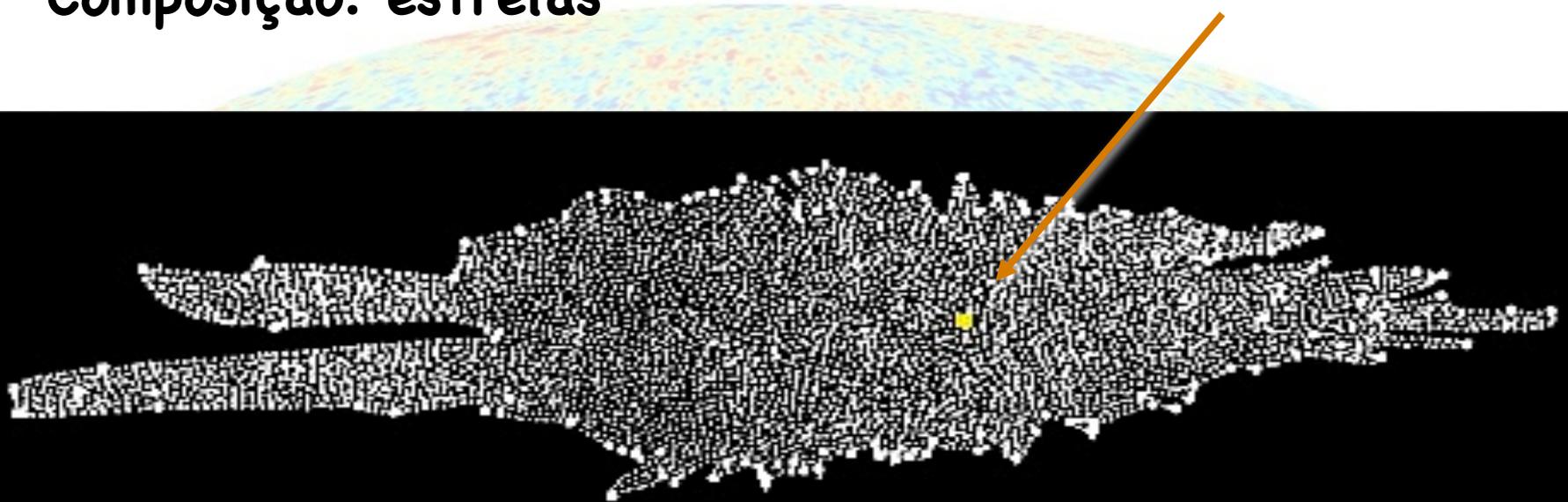




Uma visão do Universo por volta do final do séc. XIX

Composição: estrelas

Sistema Solar



30,000 anos luz

Origem: ?

William Herschel
(1738-1822)

-200 μ K

200 μ K

Uma visão do
Universo no séc.

XXI



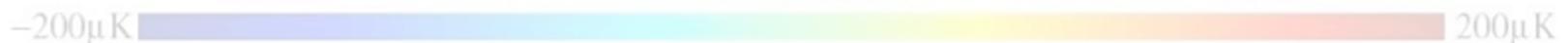
Uma comparação com a Cosmologia do Séc. XIX

☑ Final do século XIX e início do século XX

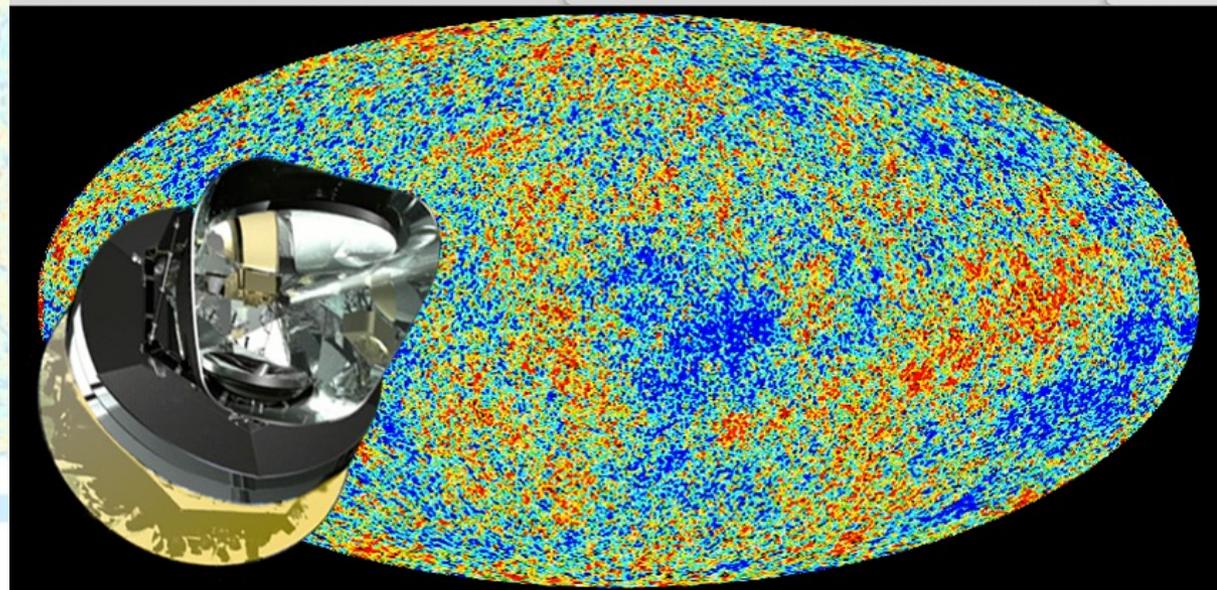
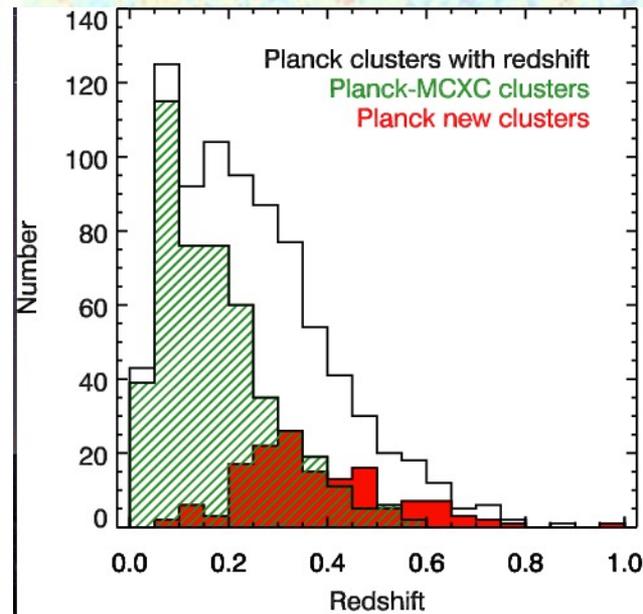
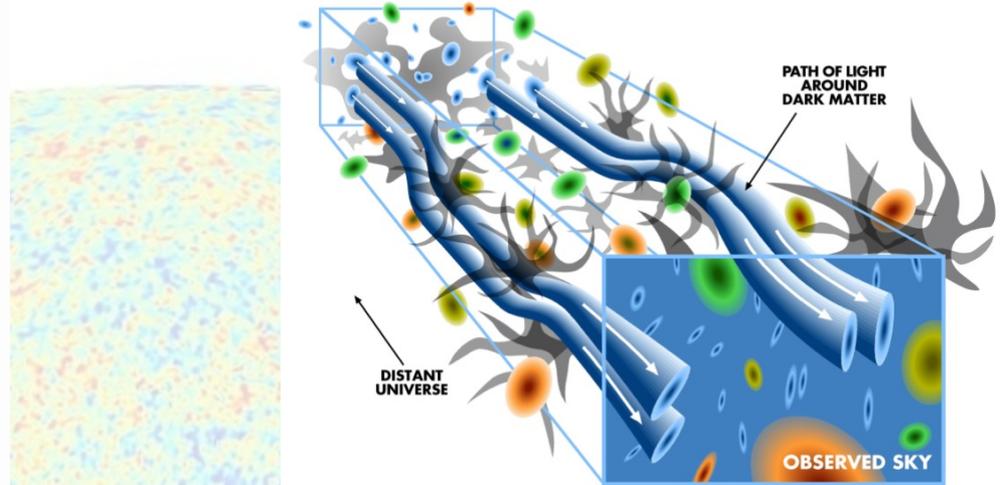
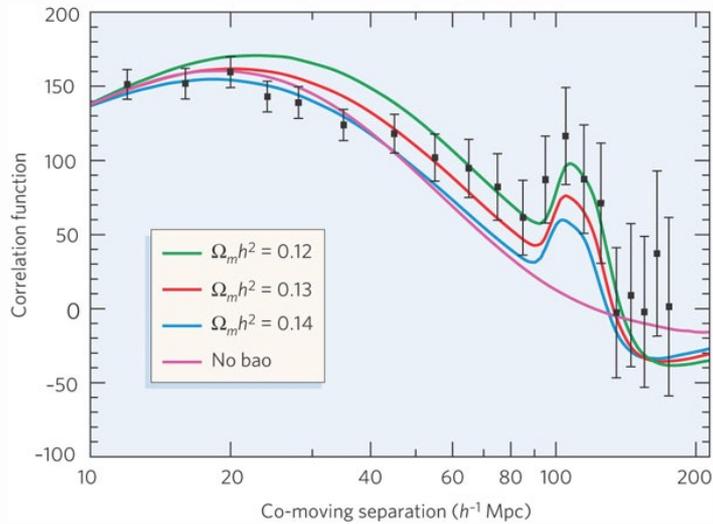
- Observação: telescópios ópticos e chapas fotográficas
- Universo "restrito" à Galáxia (~ 100 kpc)
- Descrição do Universo: Física Clássica (Eletromagnetismo, Mecânica Clássica e Termodinâmica)

☑ Início do século XXI

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



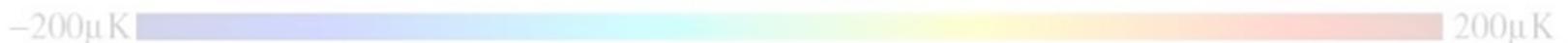
Cosmologia no séc. XXI





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?



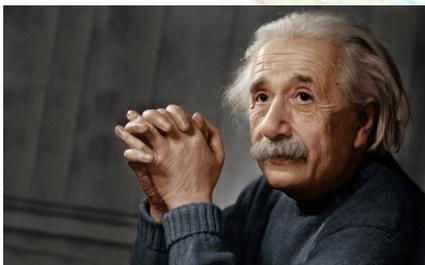


O modelo cosmológico padrão - MCP



- ✓ 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 μ K

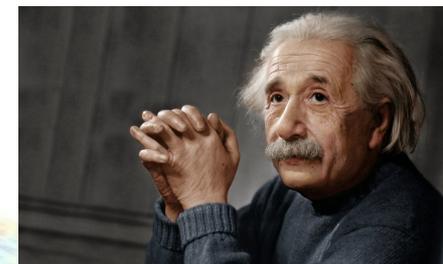
O universo observável

- ☑ 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.

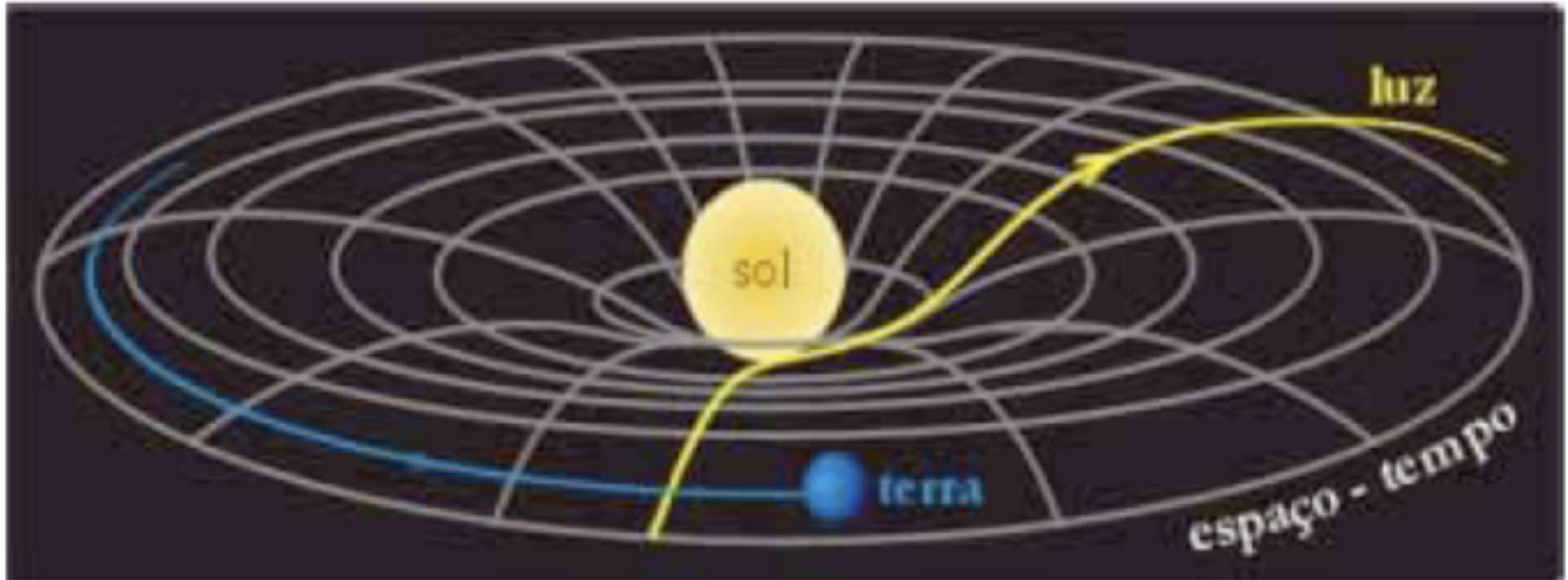
Georges
Lemaître



-200 μ K

200 μ K

As equações do MCP



Métrica de Robertson-Walker

(define um espaço-tempo maximamente simétrico).

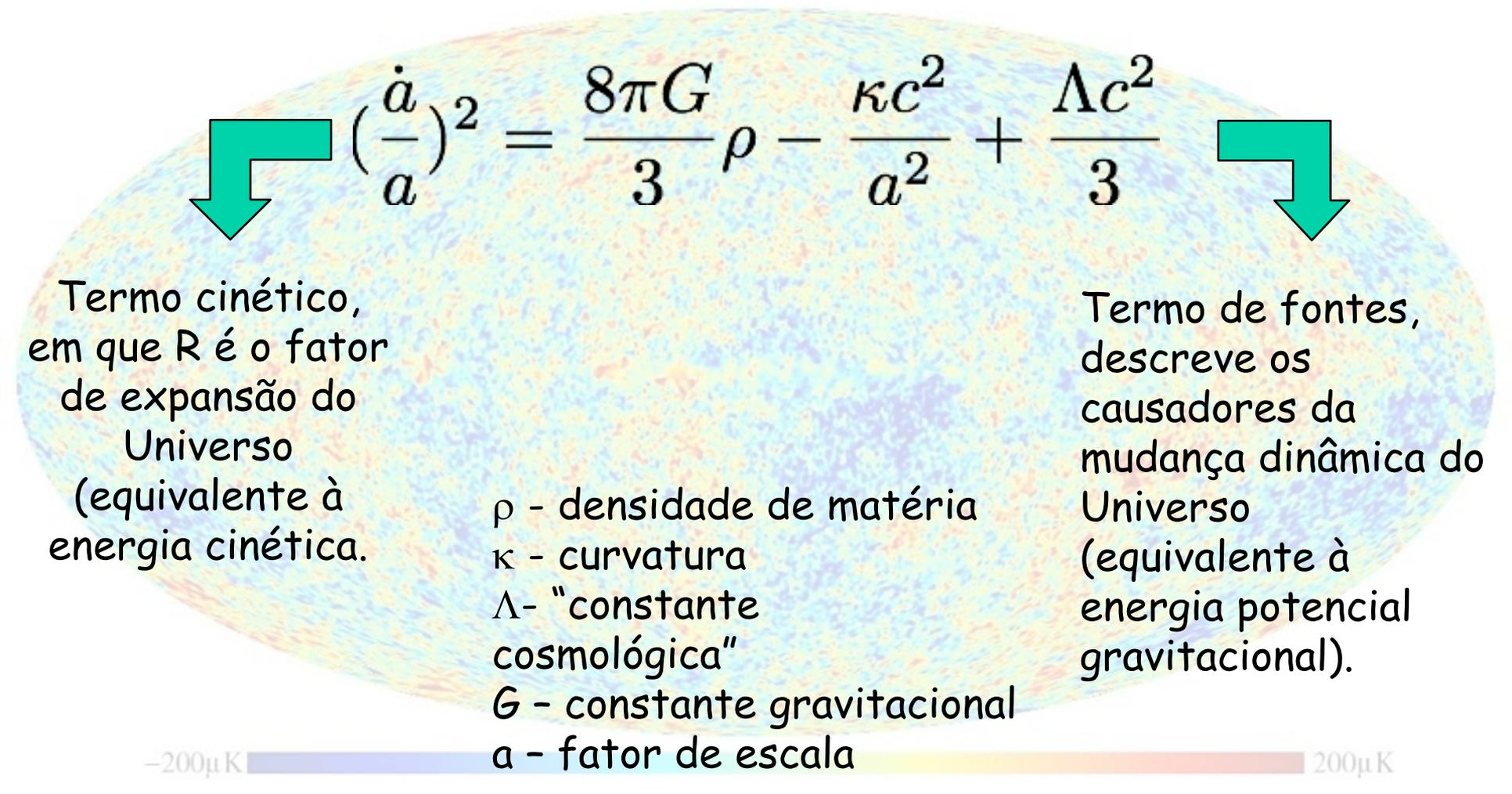
$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$

Fator de escala, define a expansão do Universo

Coordenadas esféricas, com o termo de curvatura κ

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).

ρ - densidade de matéria
 κ - curvatura
 Λ - "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

ρ - densidade de matéria
 p - pressão do fluido
 Λ - "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)

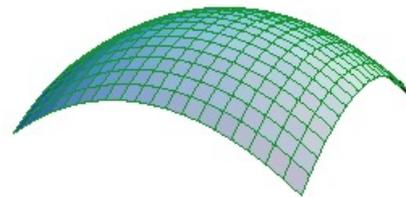
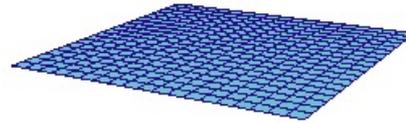
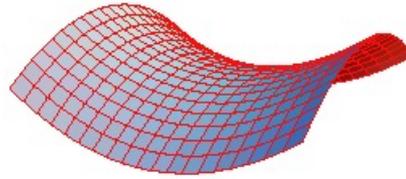
$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m - \rho_k$$

expansão

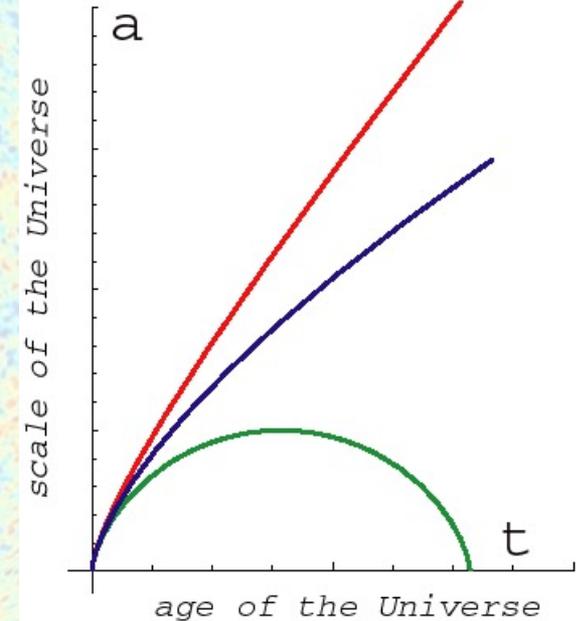
matéria

curvatura

Geometria



Cosmologia



-200 μ K

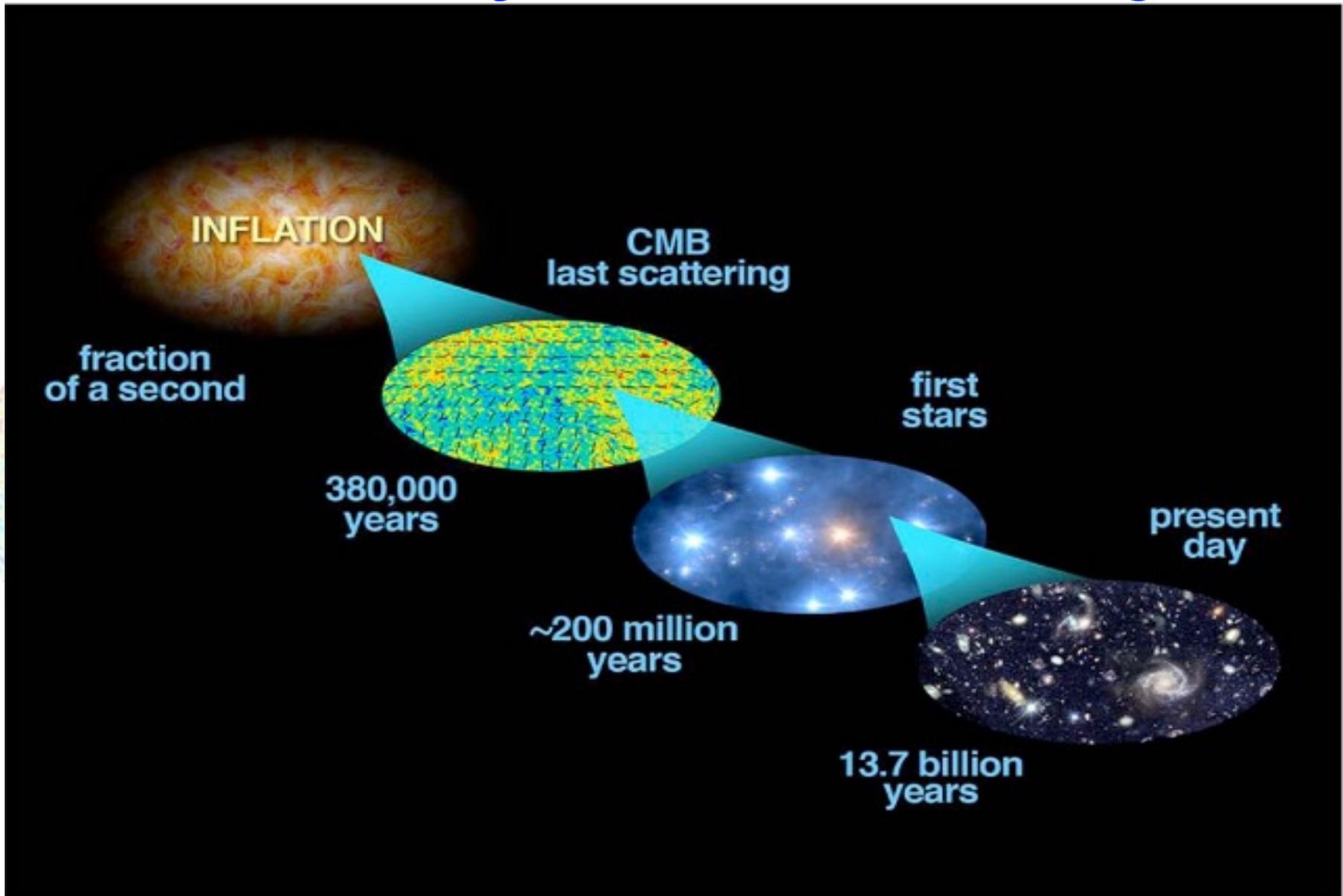
200 μ K

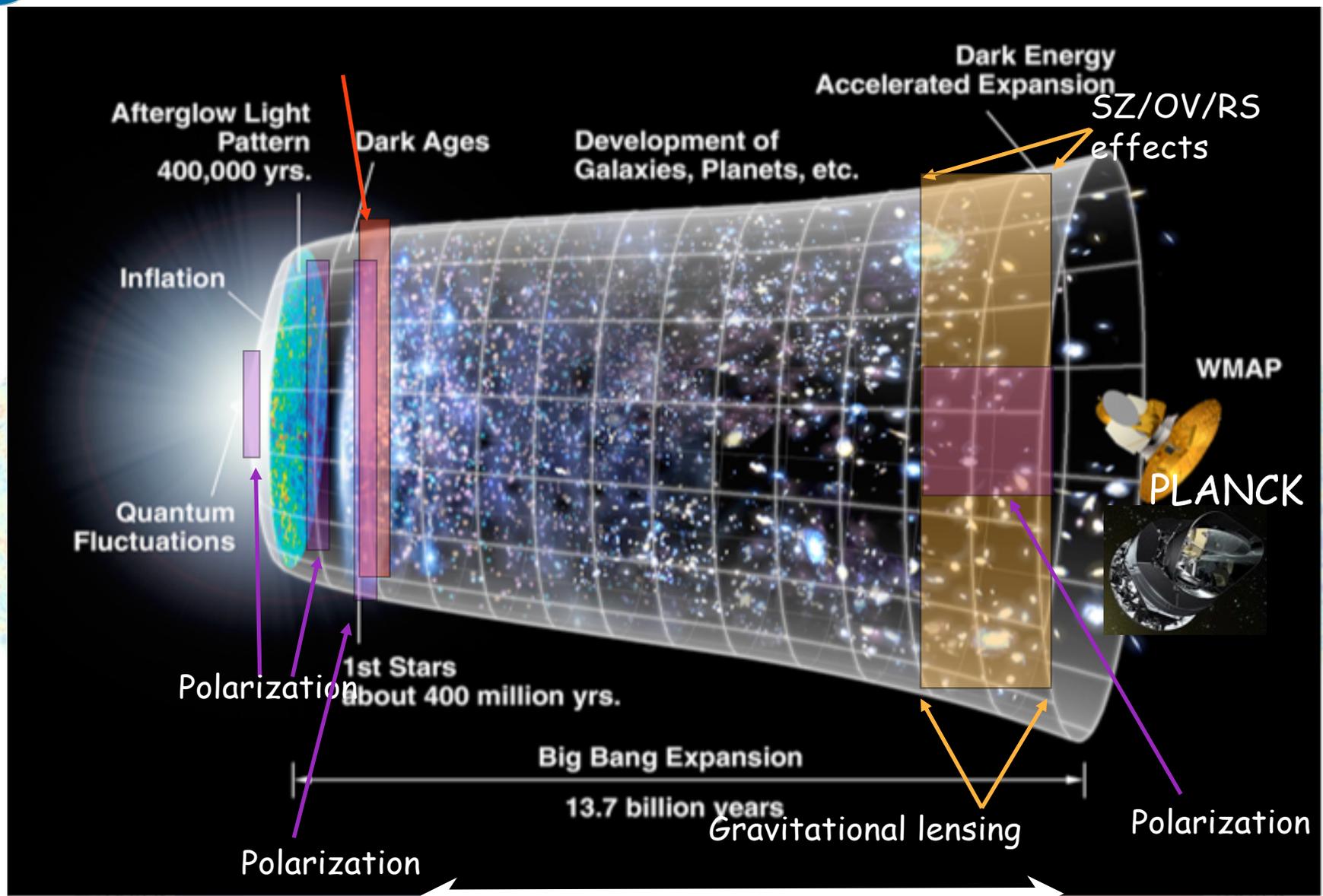


OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS



Observações em Cosmologia







OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS

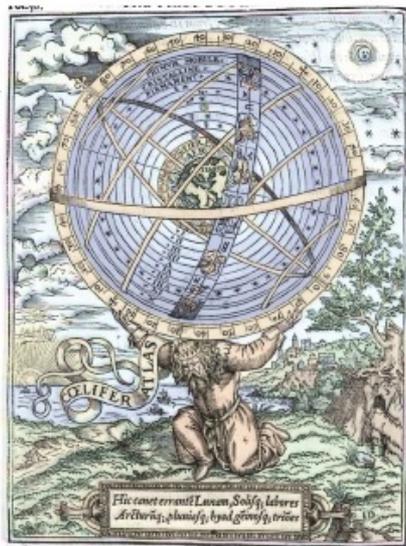
O paradoxo de Olbers



Por que o céu é escuro à noite?

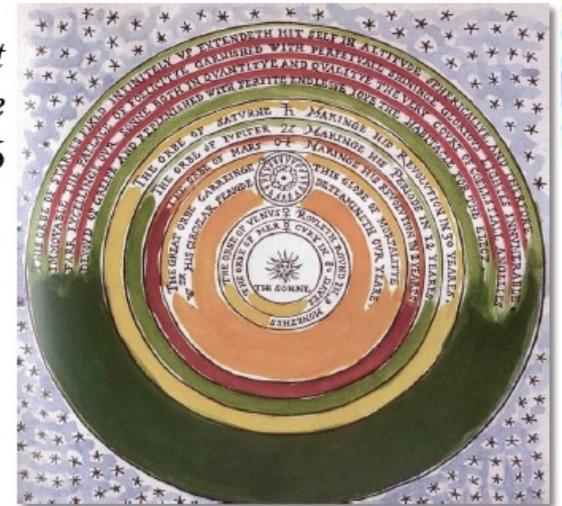
- ☑ Se o universo é infinito e possui infinitas estrelas, porque o céu é escuro à noite? Paradoxo de Olbers!!!! (Heinrich Olbers, 1823)
- ☑ A questão foi proposta, na verdade, por Thomas Digges em 1576
- ☑ Com muitas estrelas no céu, para onde quer que olhemos, haverá alguma para interceptar nossa linha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

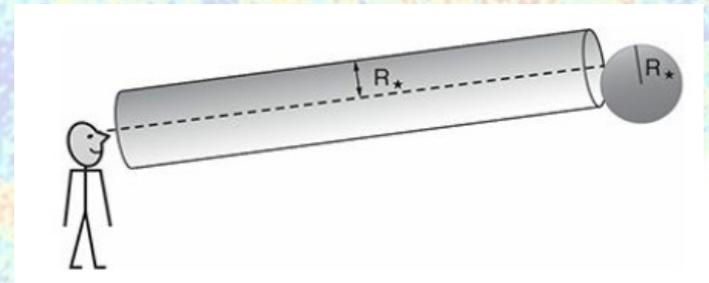
200µK

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

- $n_* = 10^9$ estrelas/Mpc³; $L_* = L_{sol}$; $R_* = R_{sol}$ ($\sim 2 \times 10^{-14}$ 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!!!!

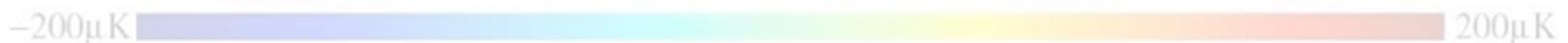
$$B_{\odot} = 5 \times 10^{-3} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{arcsec}^{-2}$$

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

-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



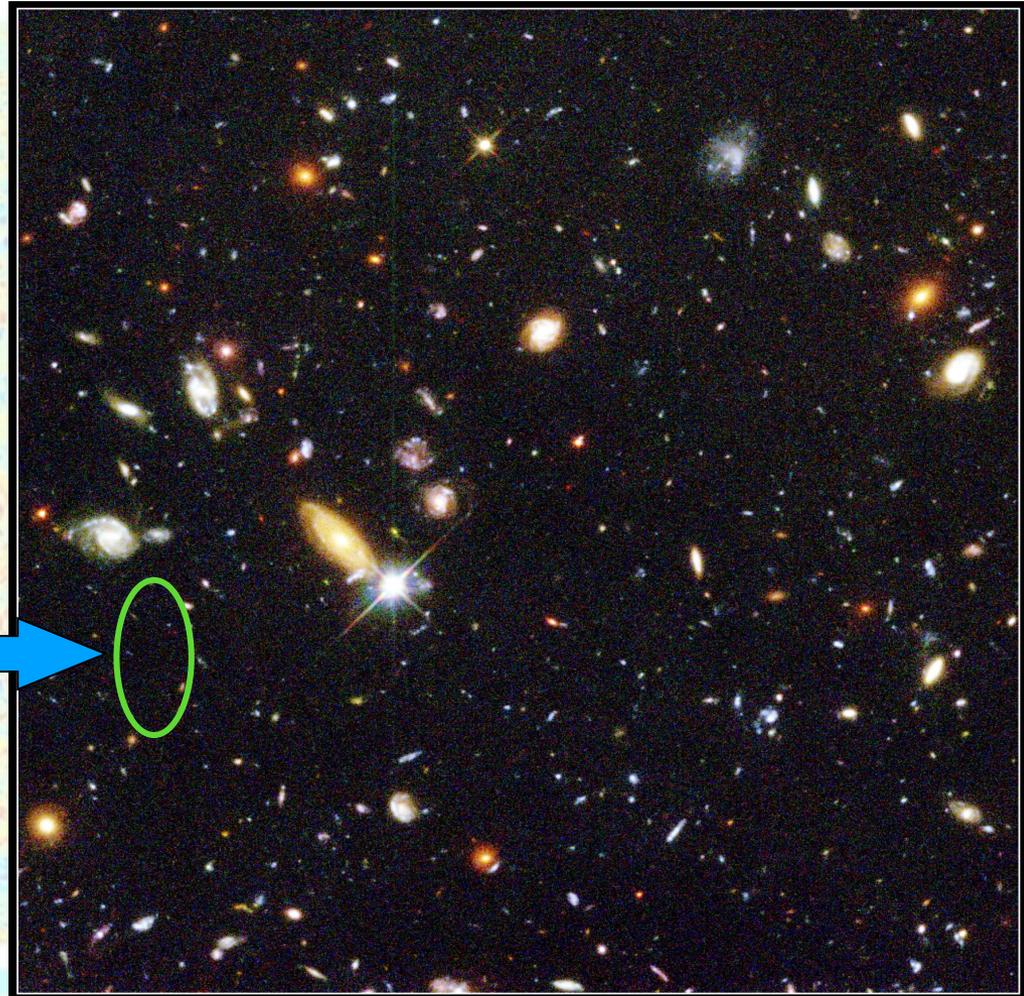


Uma visão do Universo no séc. XXI

Hubble Deep Field
(www.nasa.gov)

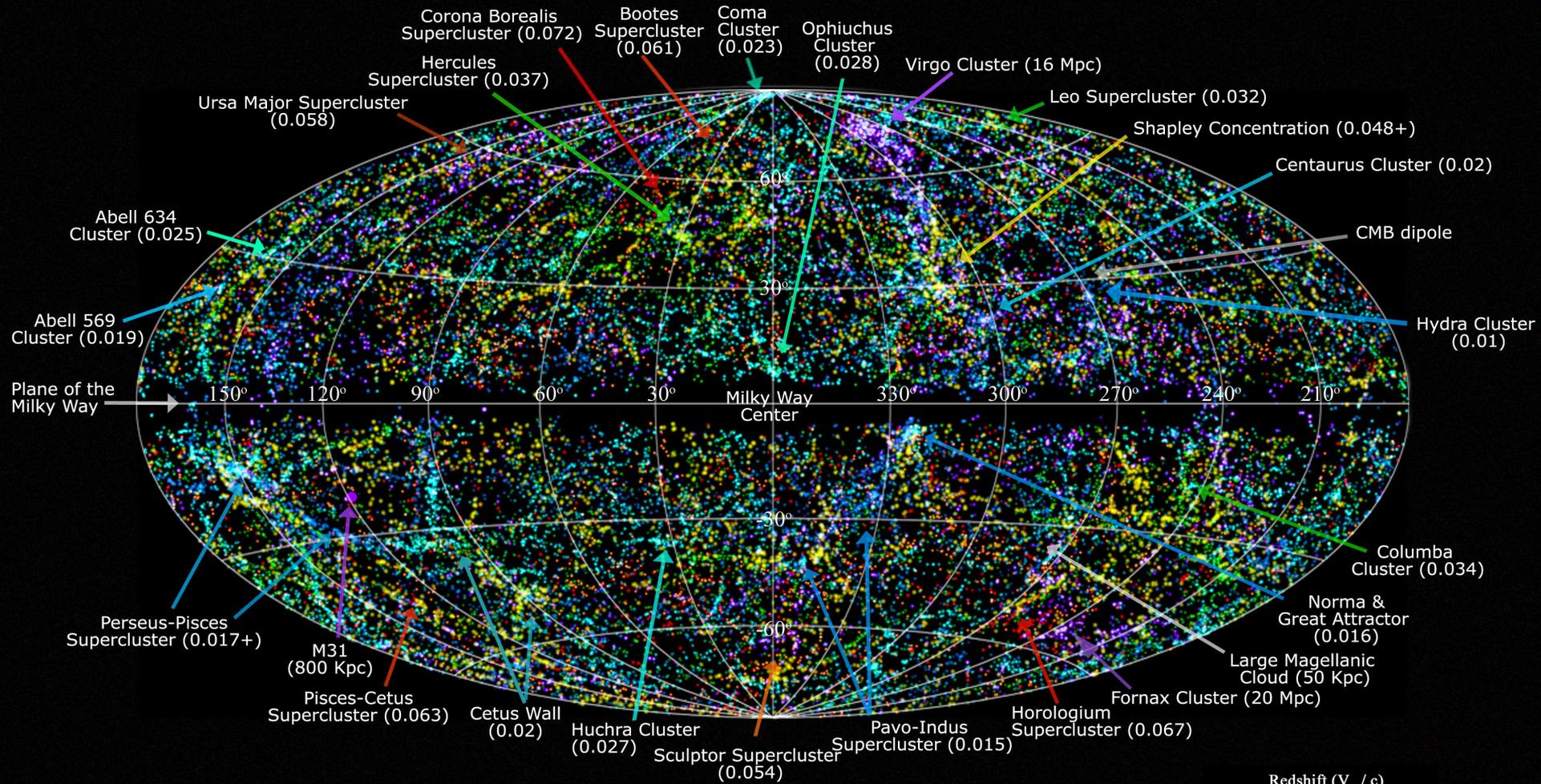
100 bilhões
em todo o céu

30.000
galáxias aqui

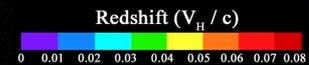


-200 μ K

2MASS Redshift Survey



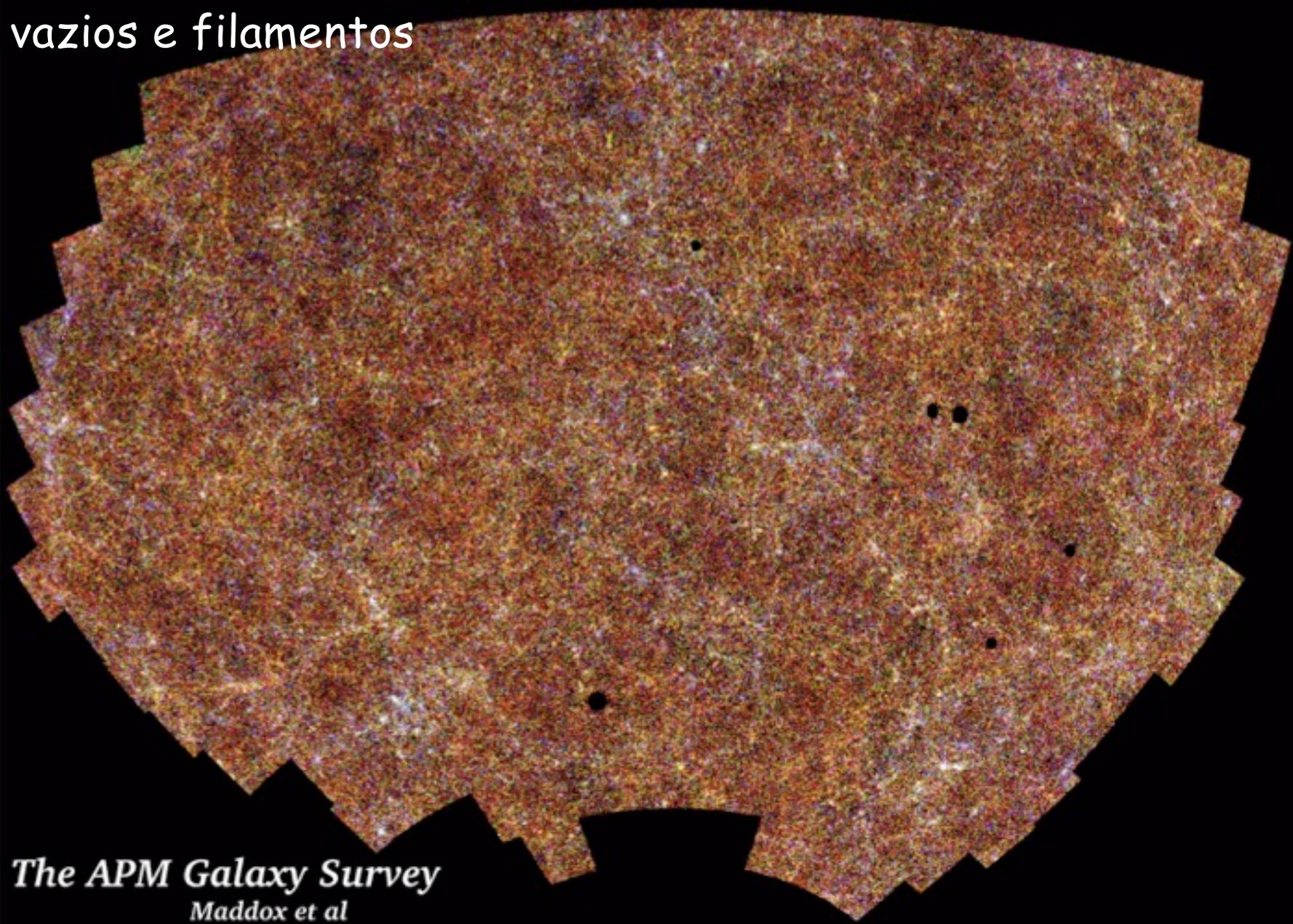
Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by the 2MRS redshift (Huchra et al 2011); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).



Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)



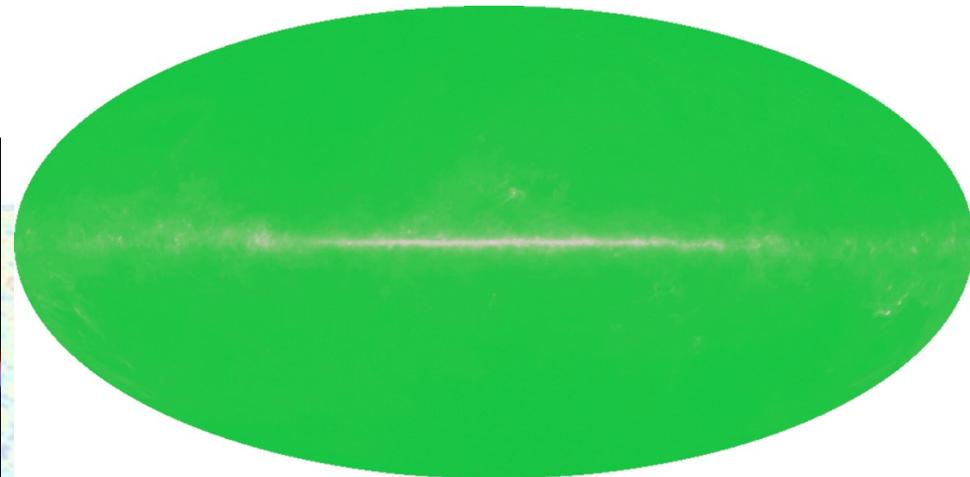
vazios e filamentos



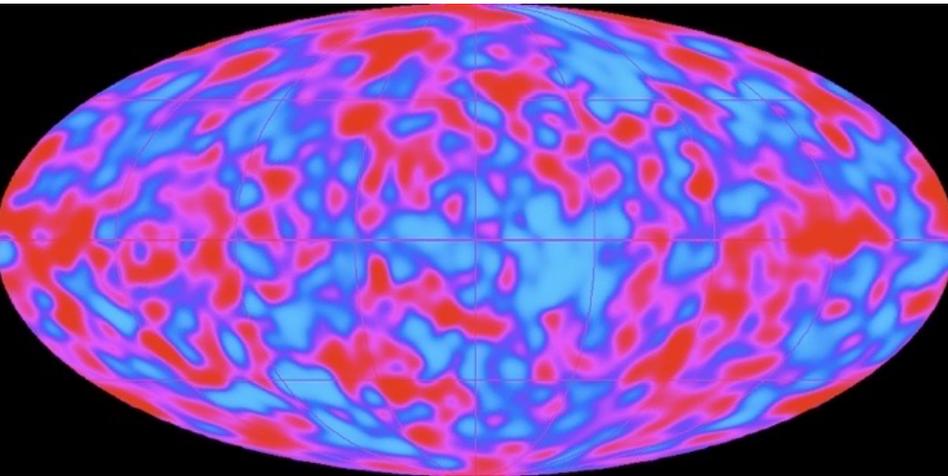
The APM Galaxy Survey
Maddox et al



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



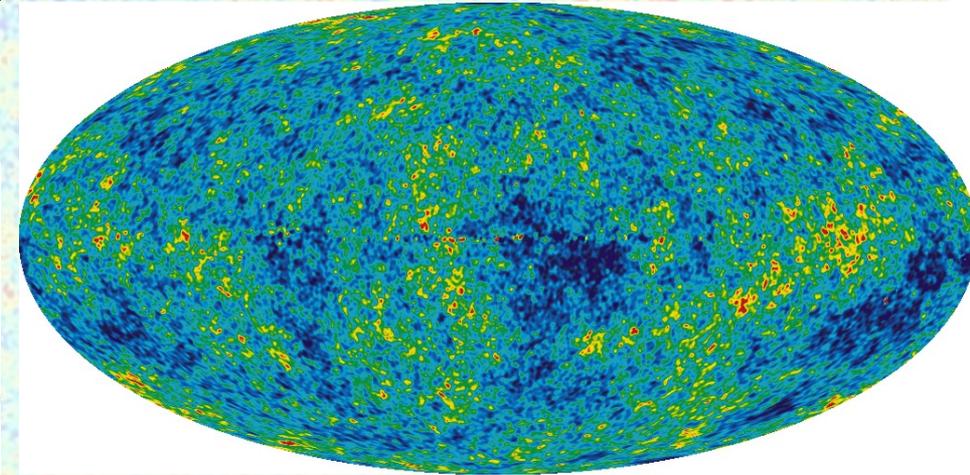
Satélite COBE (1996)



Satélite WMAP (2011)



Satélite Planck (2018)

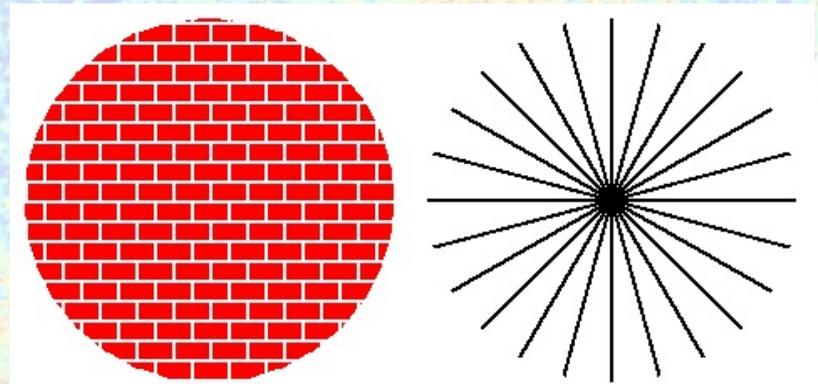


200 μ K

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

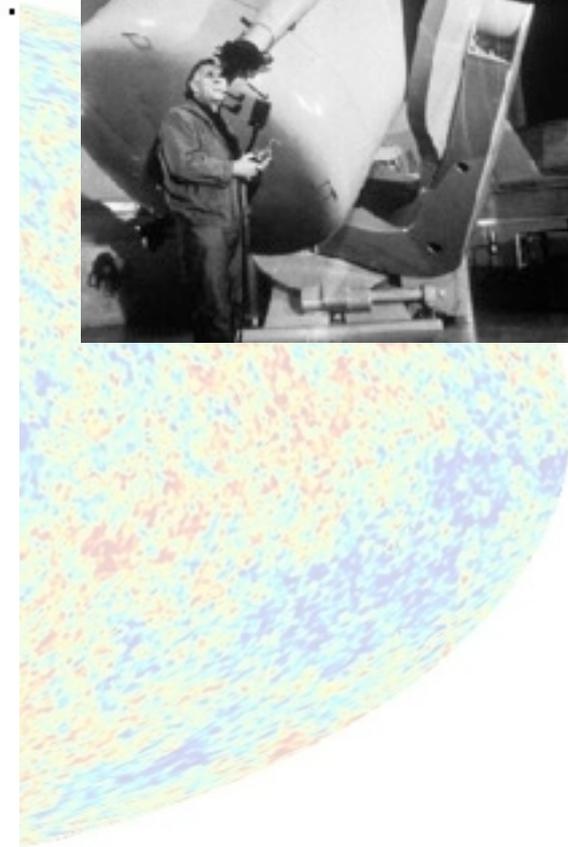
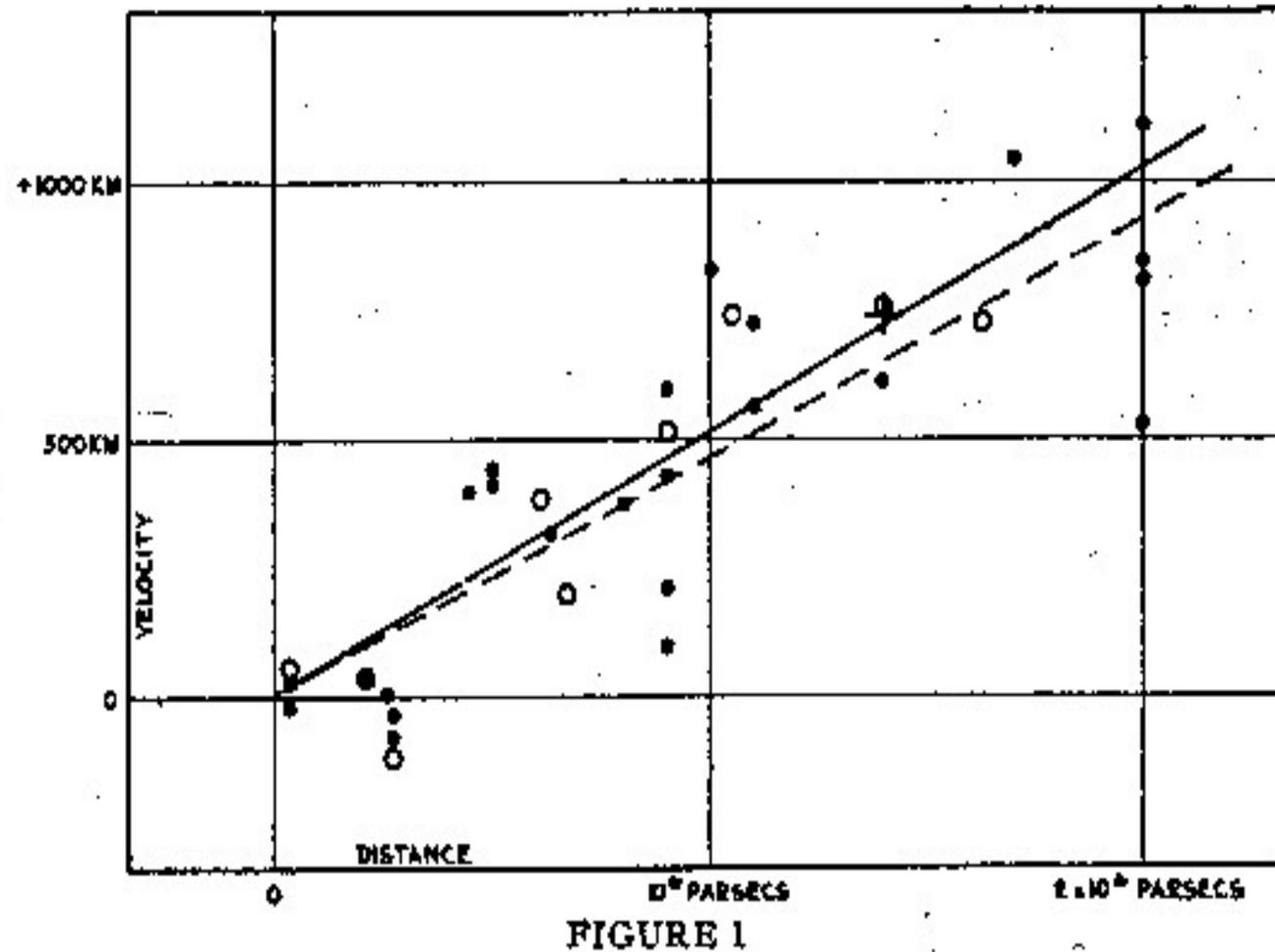


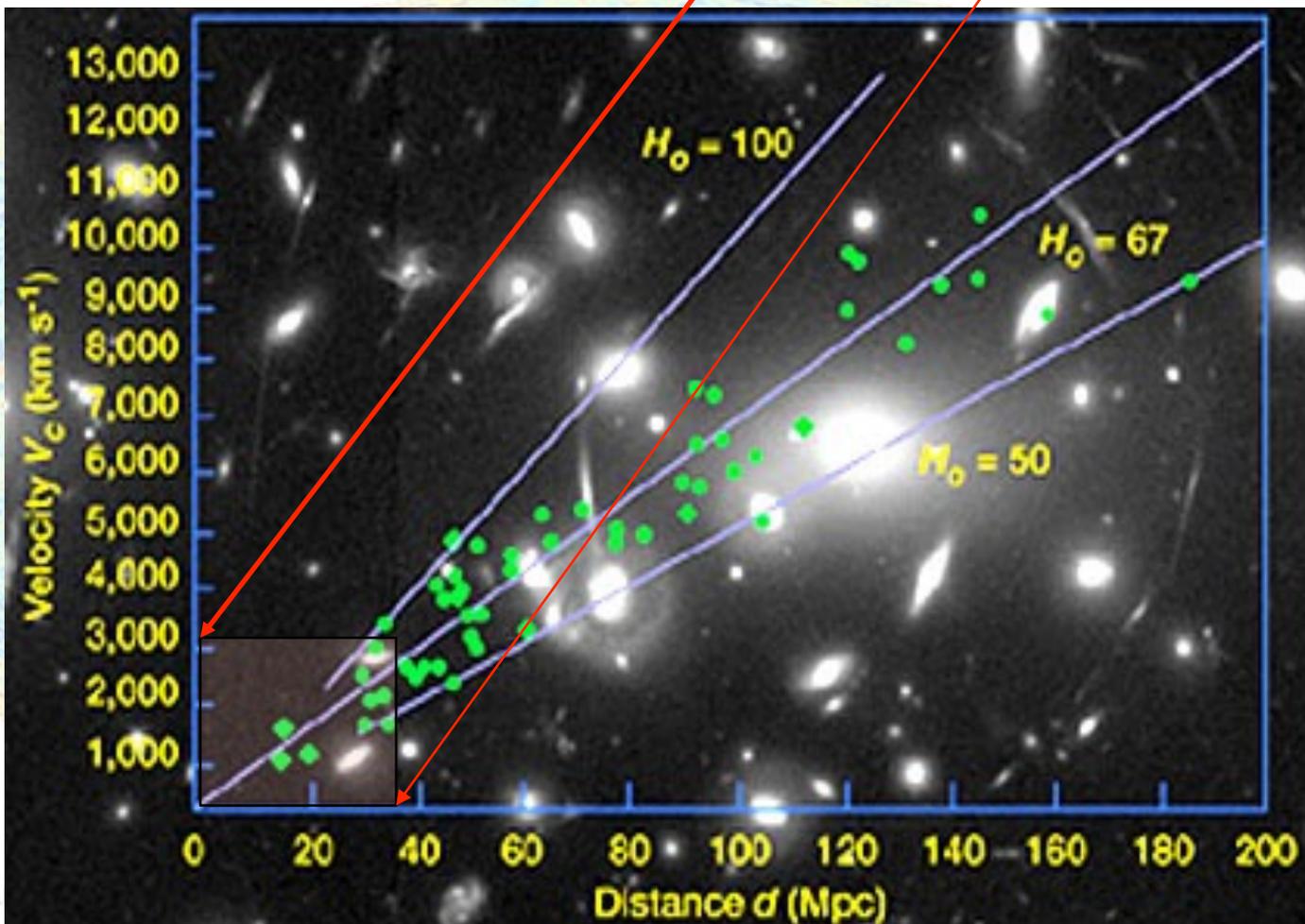
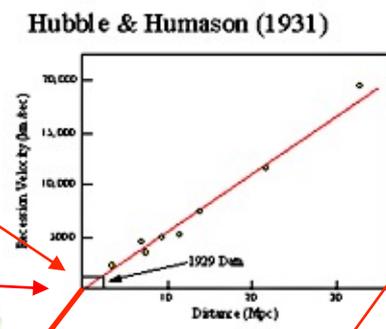
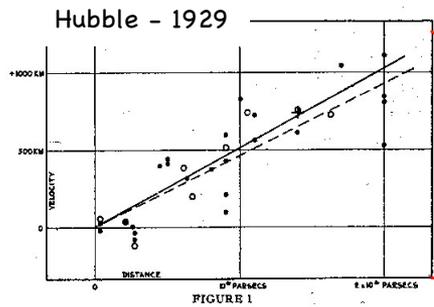
A EXPANSÃO DO UNIVERSO



A expansão do Universo

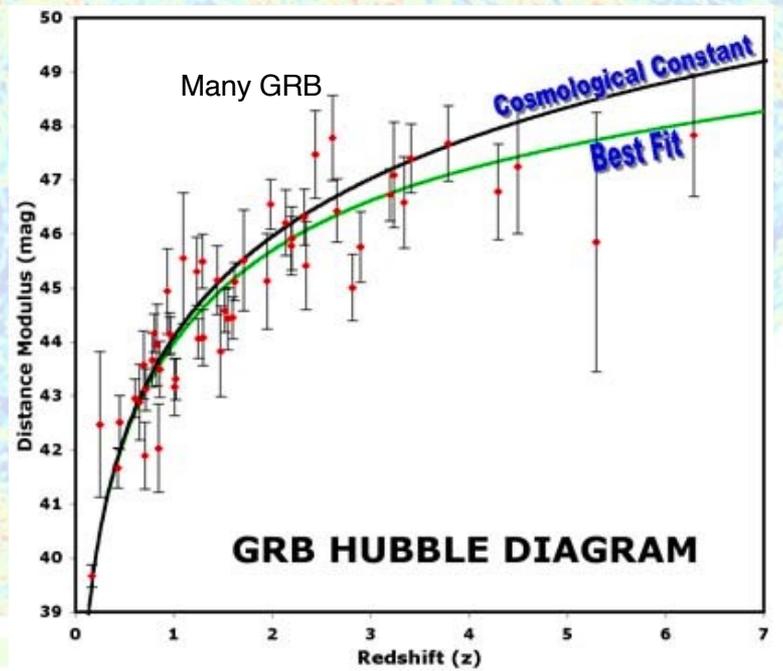
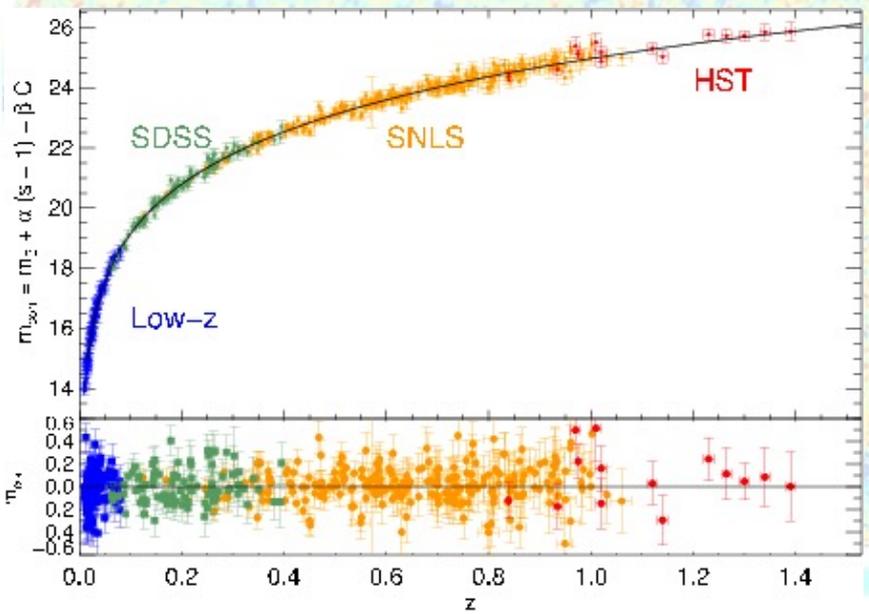
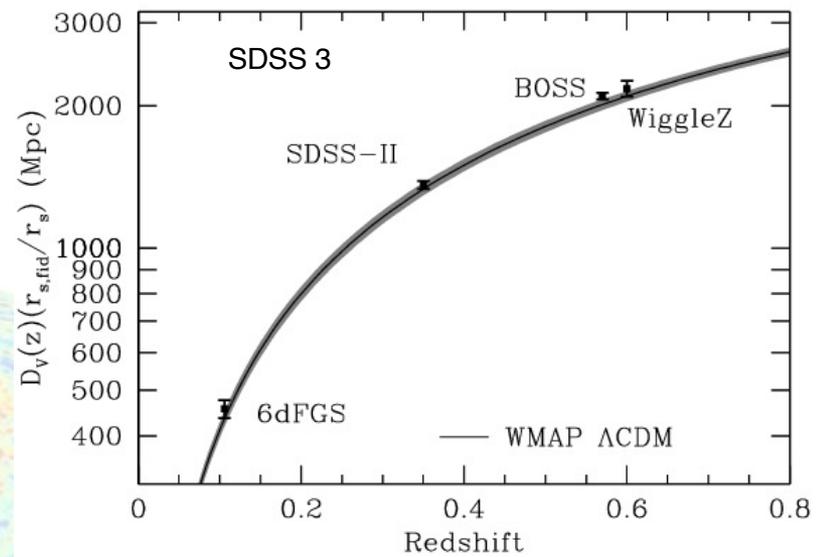
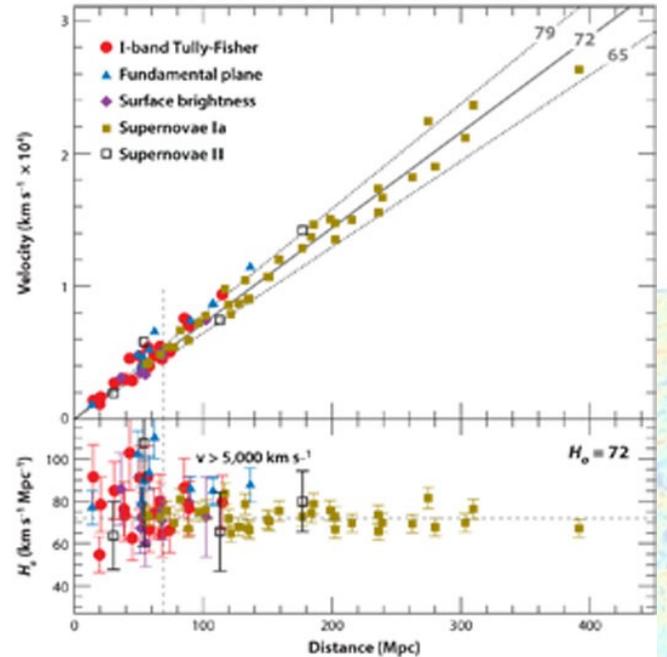
Hubble - 1929



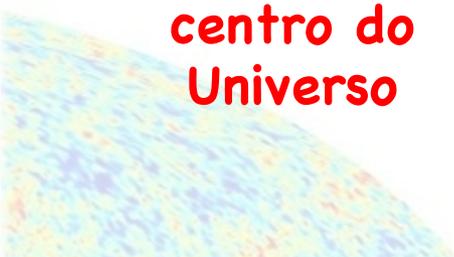
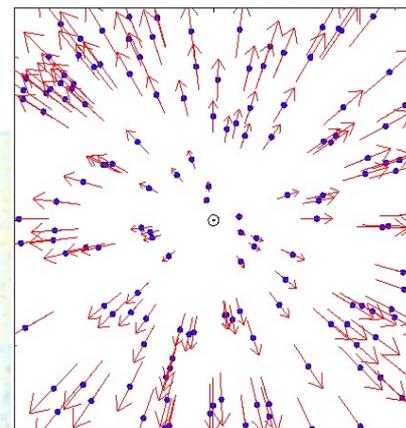
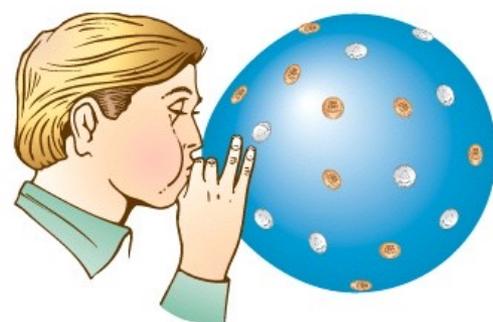




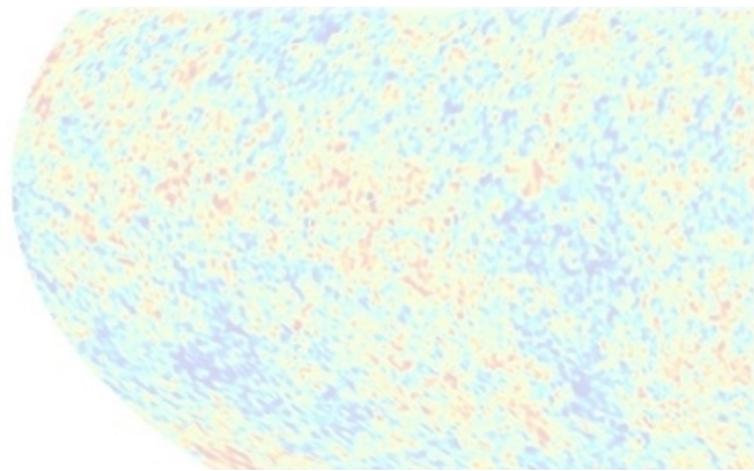
Cepheid Key Project (Freedman 2001)



A lei de Hubble

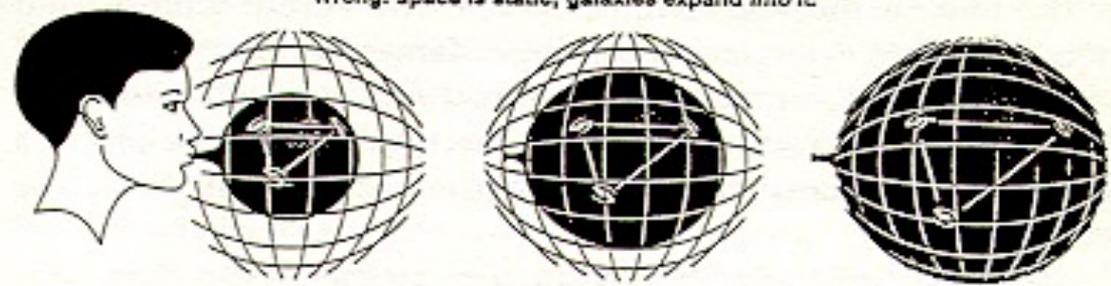


Não há centro do Universo



Lei de Hubble: $v=H_0d$

Wrong: space is static; galaxies expand into it.



Right: space is dynamic; galaxies expand with it.

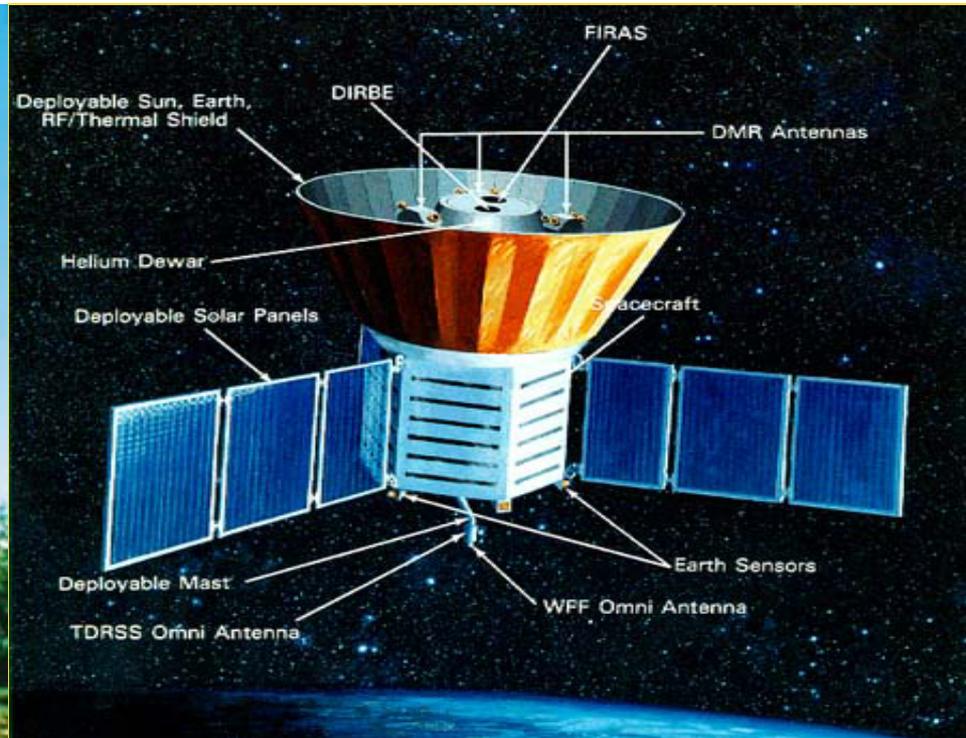
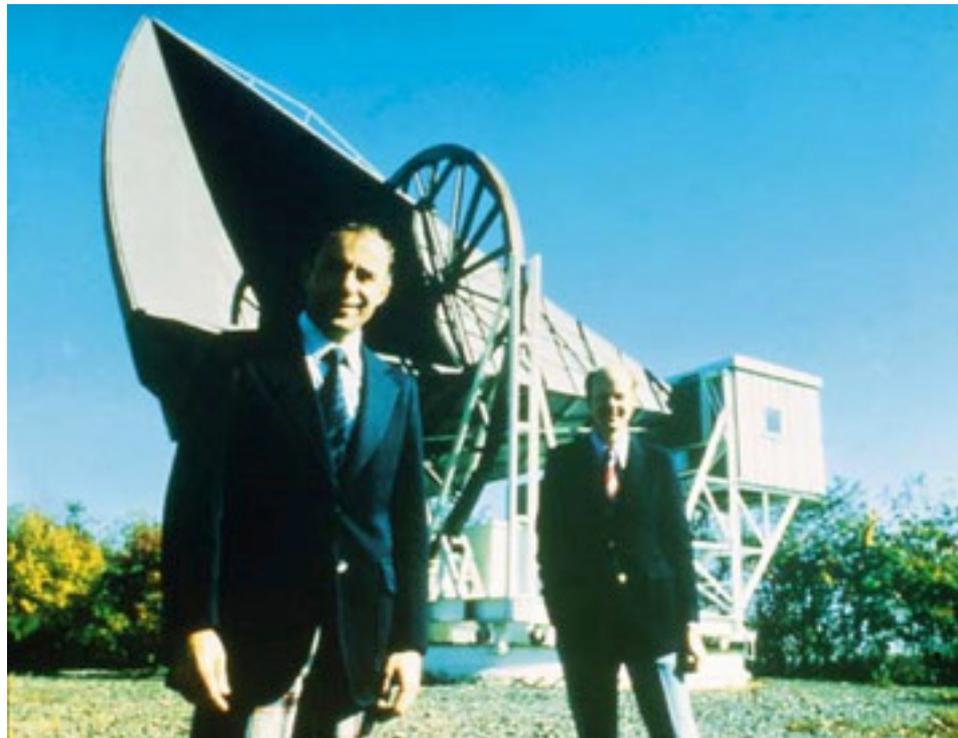


A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS





A Radiação C3smica de Fundo em Microondas (RCFM)



A. Penzias e R. Wilson

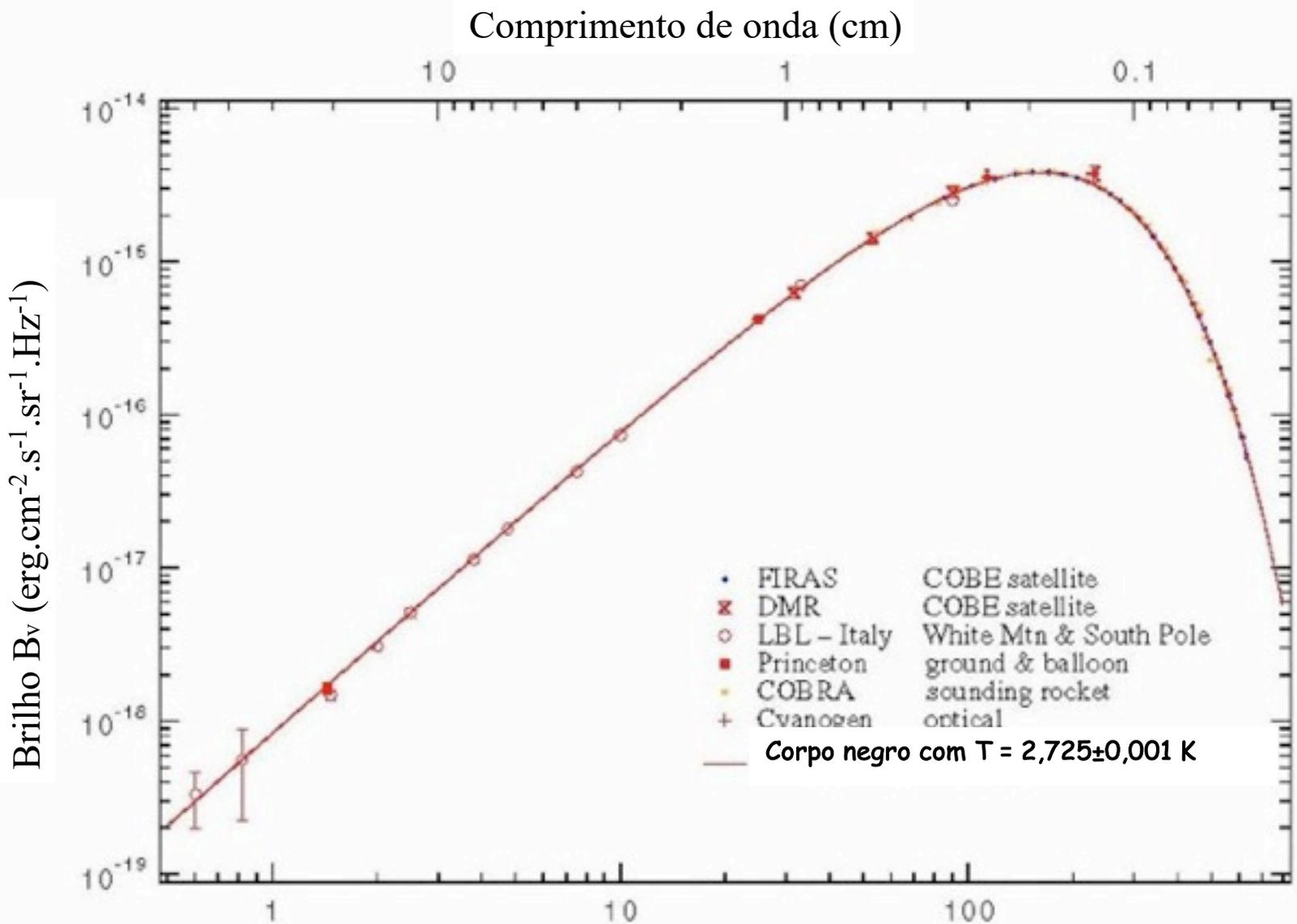
COBE (1989 - 1994)

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

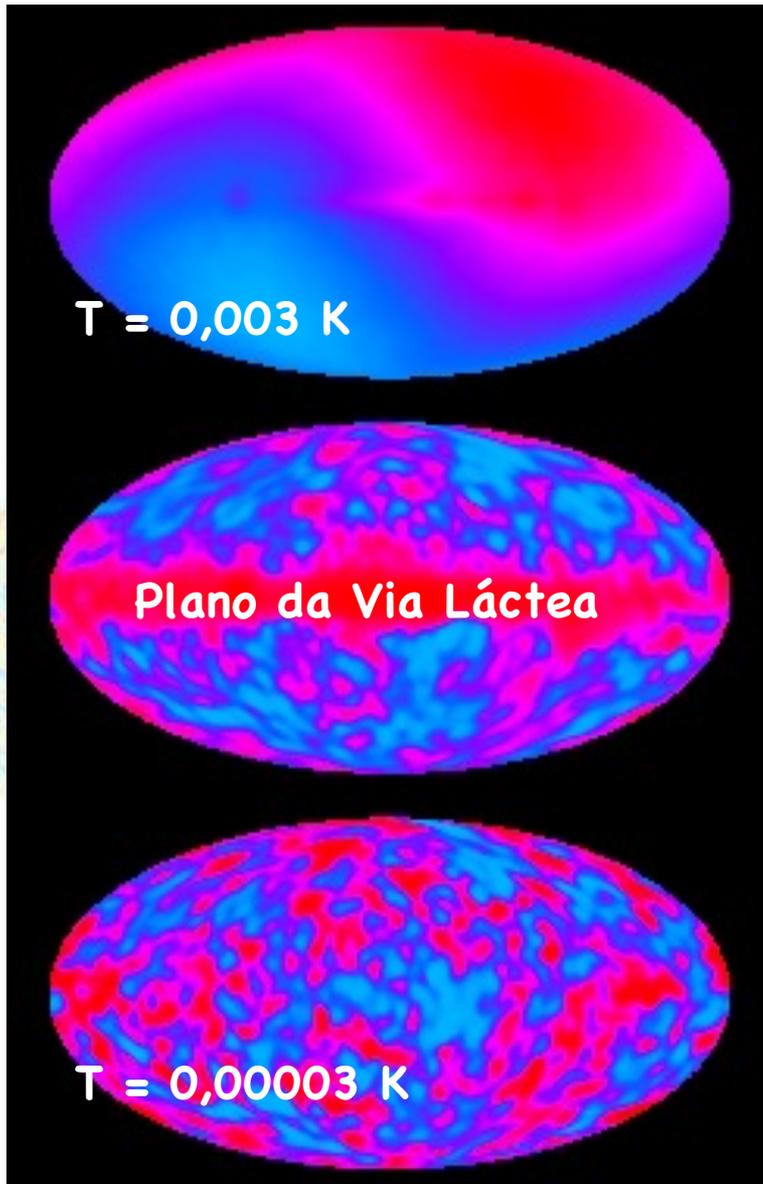
-200 μ K

200 μ K

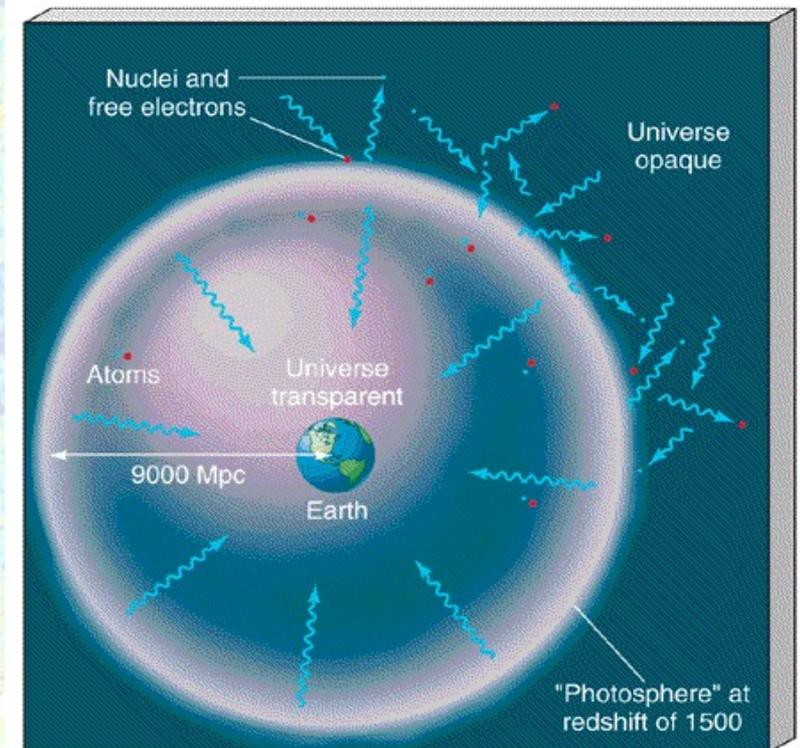
RCF - espectro de corpo negro



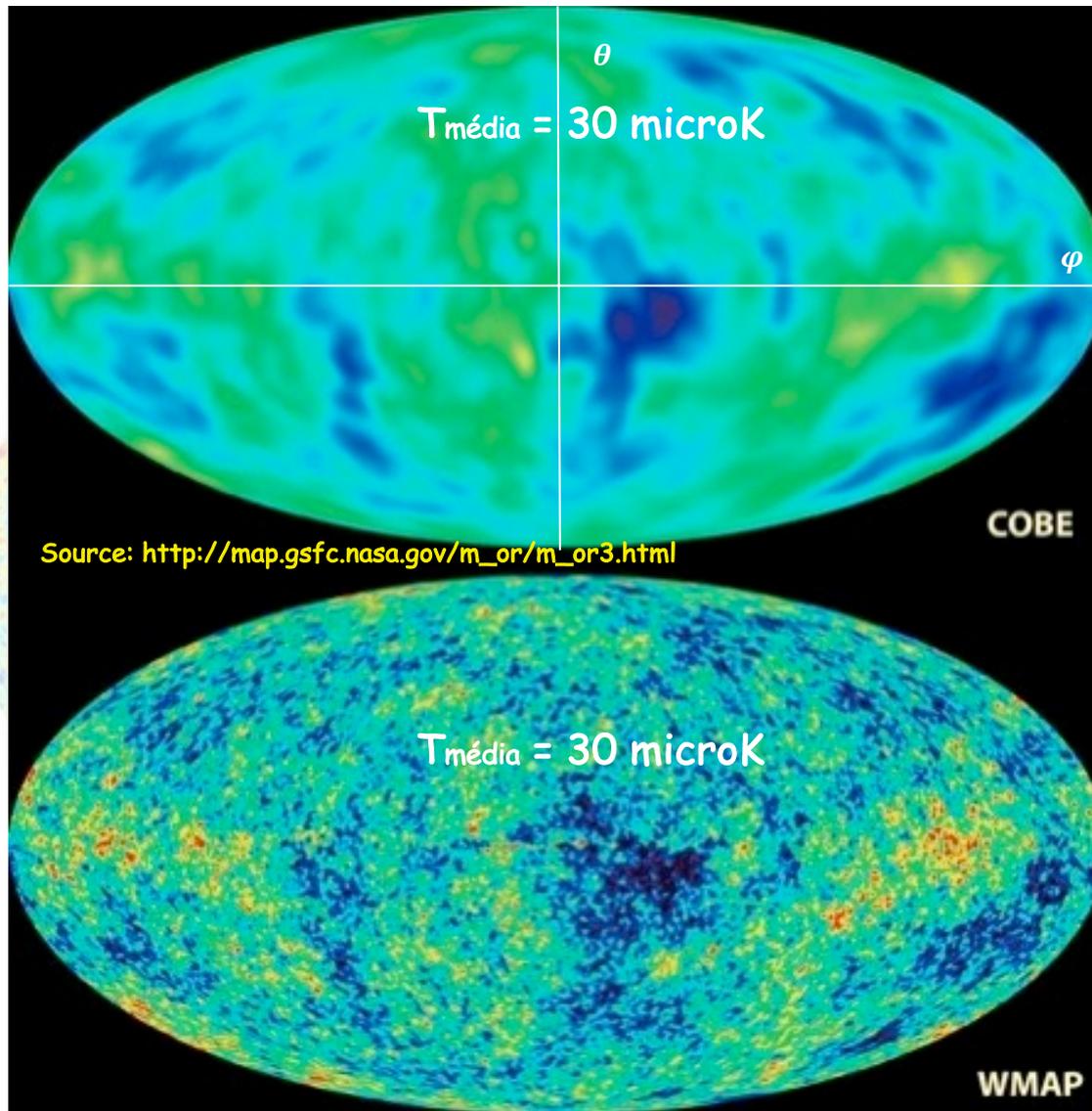
RCF - distribuição angular



- ☑ 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



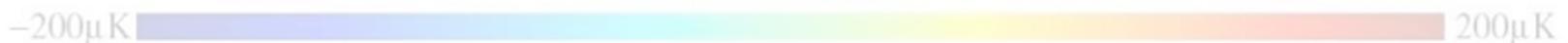
- ☑ Oscilações aparecem como diferenças de temperatura no céu, da ordem de dezenas de microKelvin
- ☑ compressão \Rightarrow mais quente \Rightarrow diferença +
- ☑ Rarefação \Rightarrow mais frio \Rightarrow diferença -

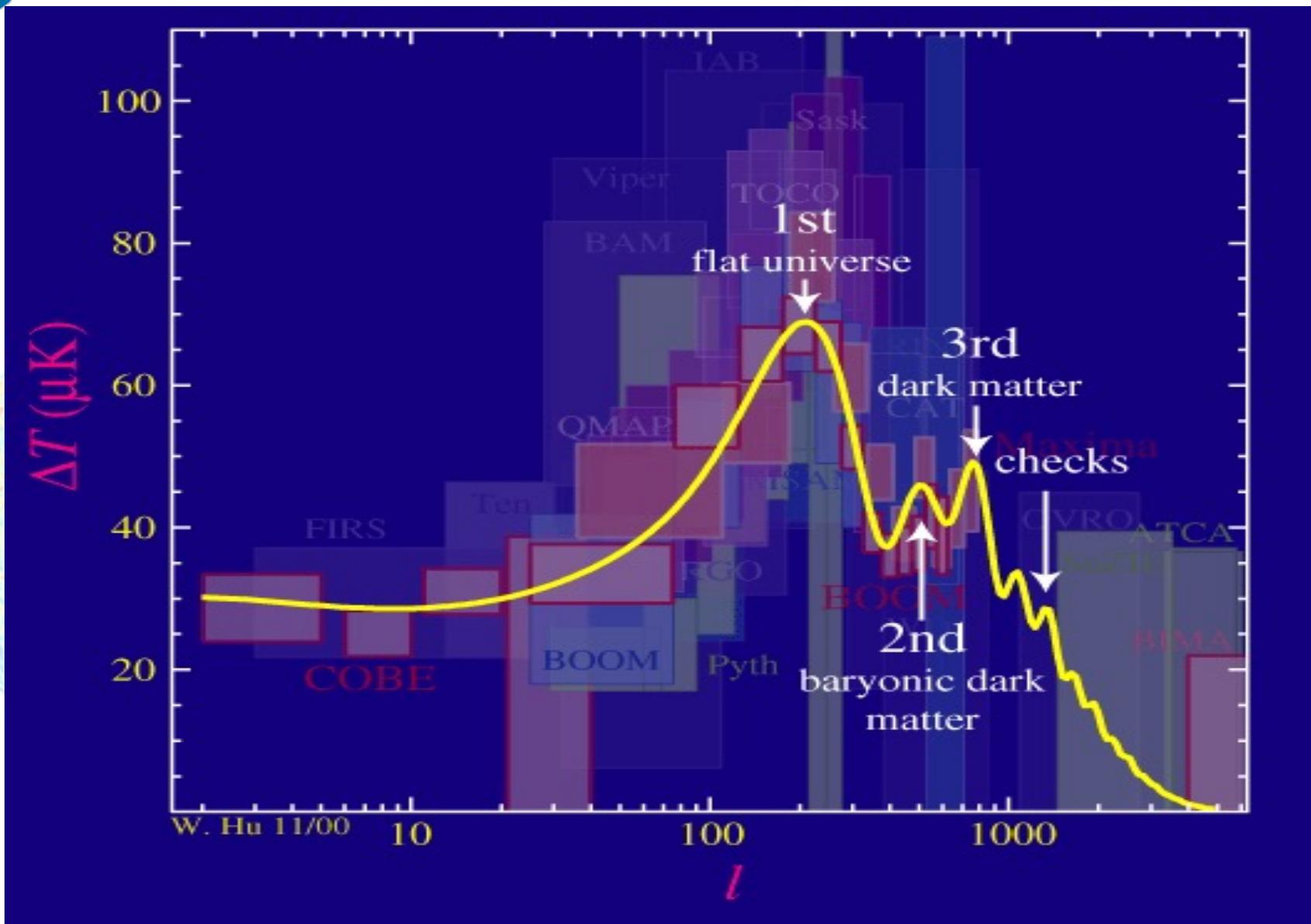
$$T(\theta, \varphi) = T_{RCF} + \Delta T(\theta, \varphi)$$

200 μ 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)
 - Ω_0 : densidade total (geometria e dinâmica)
 - Ω_b : densidade de bárions (dinâmica)
 - Ω_Λ : densidade da energia escura (aceleração da expansão)
- ☑ A posição do primeiro pico depende do modelo cosmológico escolhido



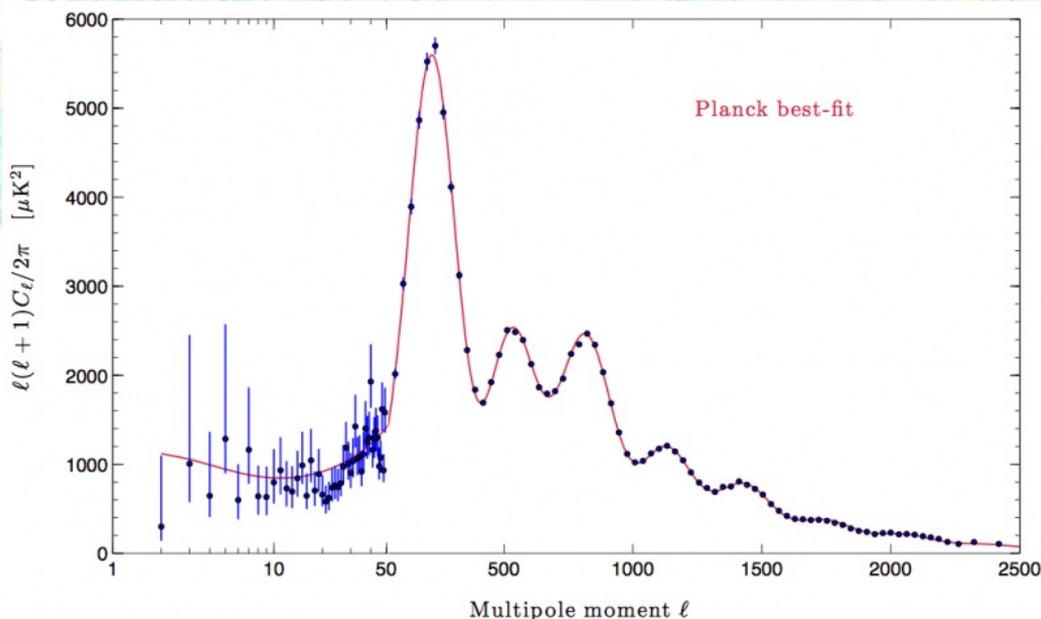


Os espectros de potência das flutuações

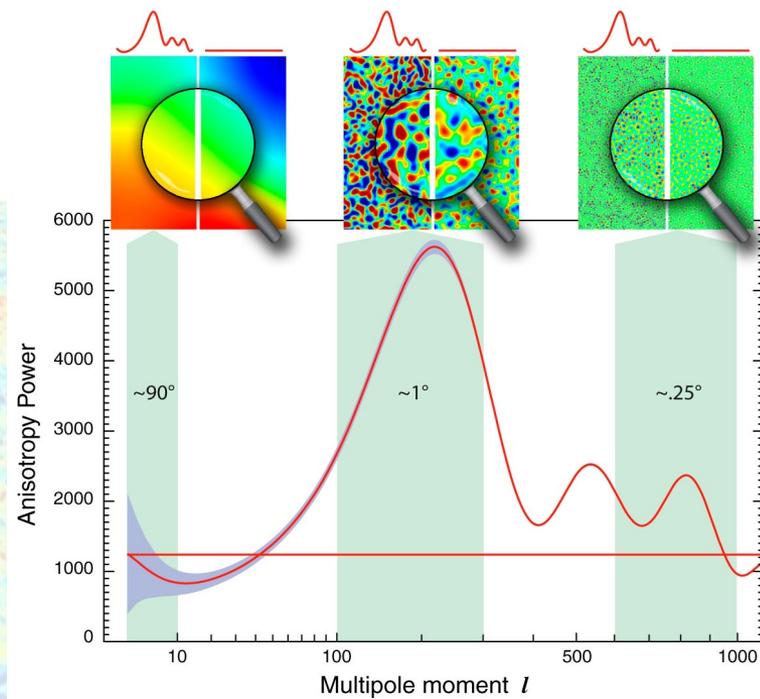
Os espectros descrevem a potência do campo de flutuações de temperatura em função da escala angular. Eles são descritos em termos da potência em cada posição

O "l" na abcissa corresponde à escala angular θ (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/>

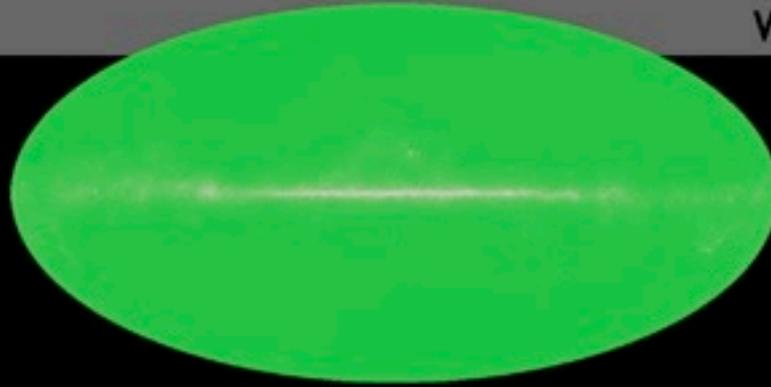
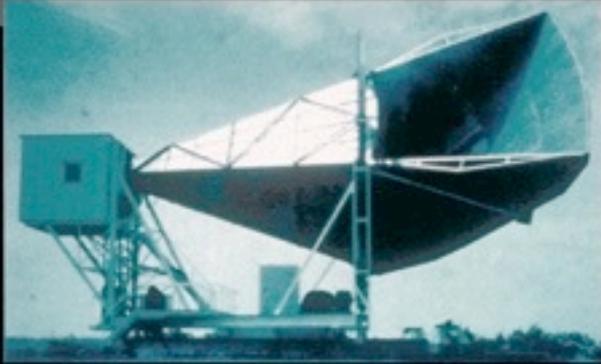
$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=0}^{\infty} \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

200 μ K

1965

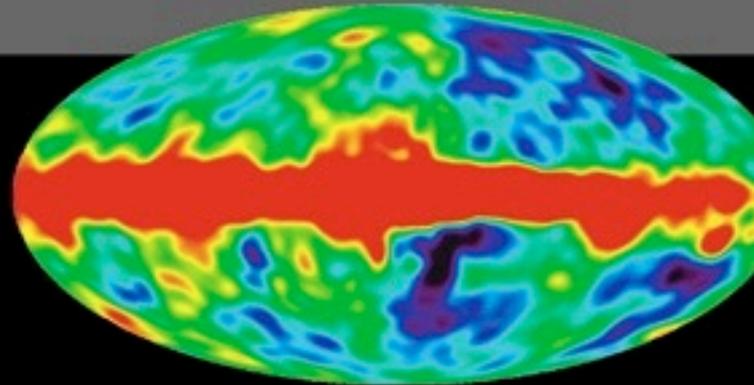
Fonte: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map>

Penzias and Wilson

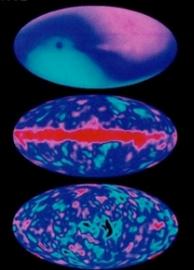


1992

COBE

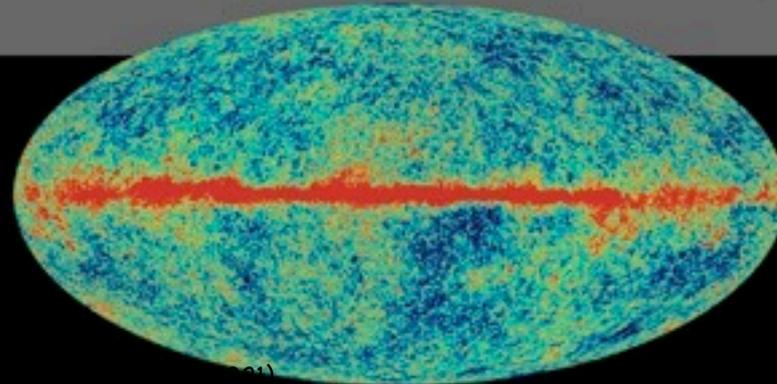
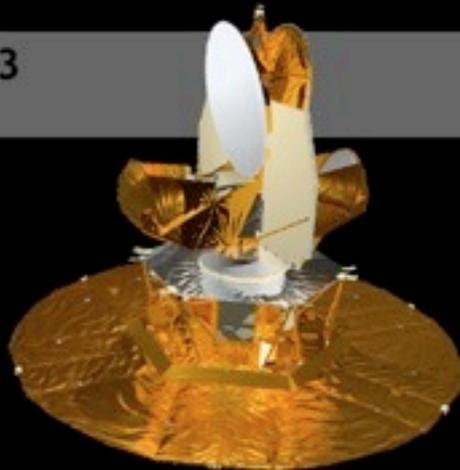


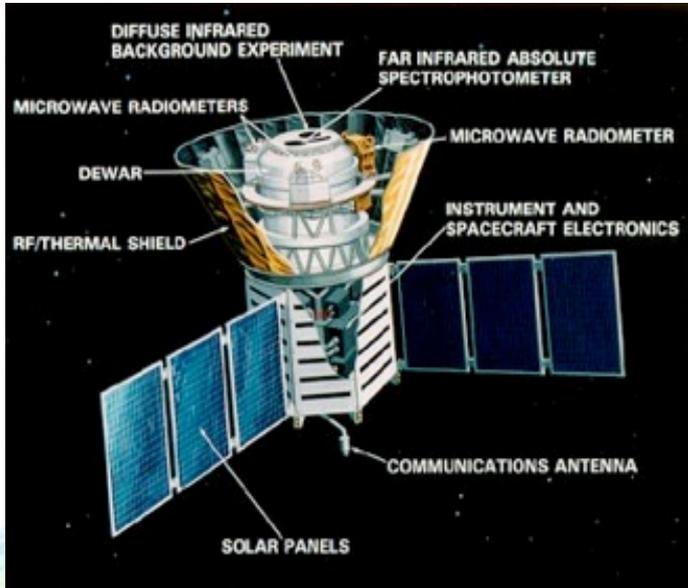
PHYSICS
TODAY
JUNE-1992



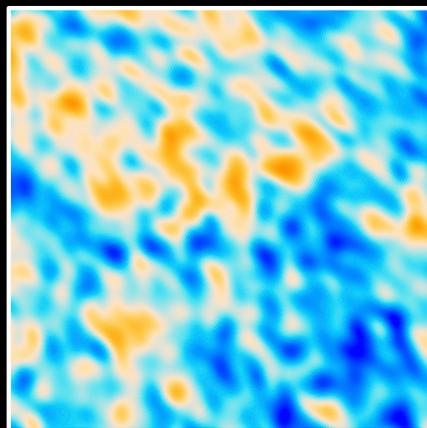
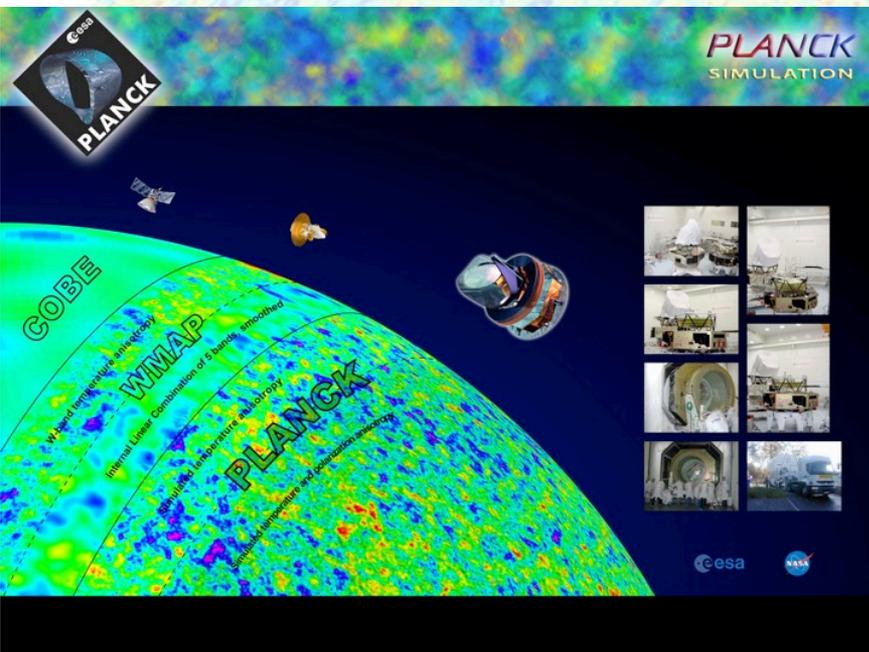
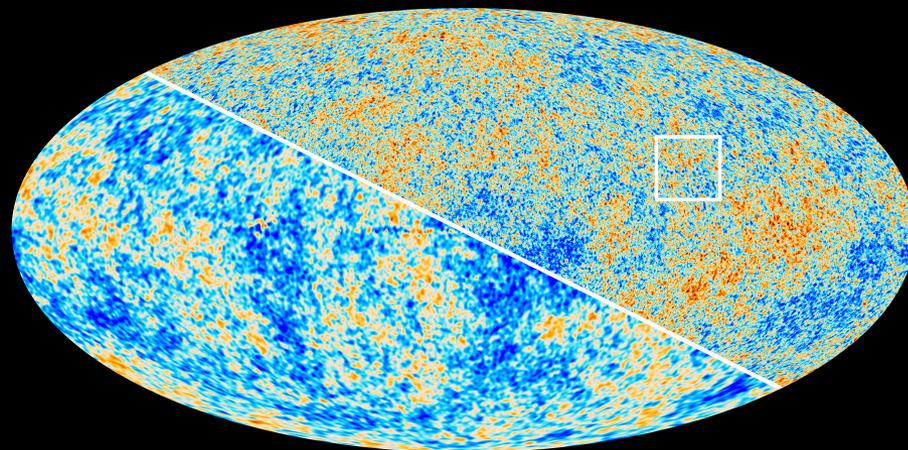
2003

WMAP

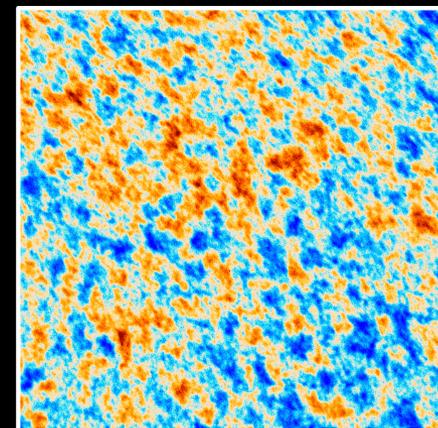




The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



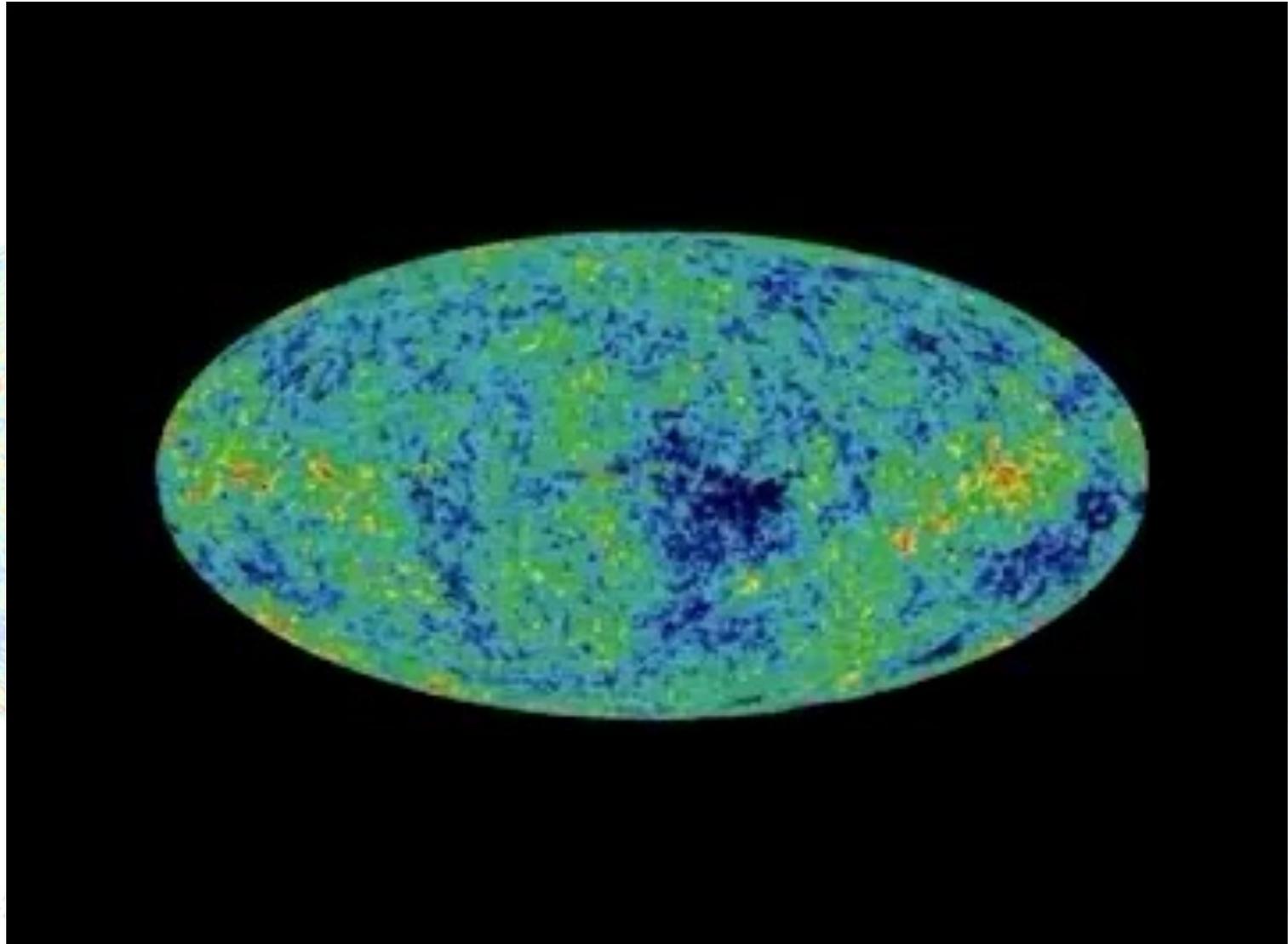
WMAP



Planck



Das flutuações de temperatura à formação das galáxias...



$10\mu\text{K}$

A FORMAÇÃO DE ELEMENTOS LEVES (NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL)

-200 μ K  200 μ K

A horizontal color scale bar is positioned at the bottom of the slide. It transitions from dark blue on the left to dark red on the right, with yellow and green in the middle. The labels '-200 μ K' and '200 μ K' are placed at the left and right ends of the bar, respectively.

A formação de elementos leves



Herman Alpher

Hans Bethe

George Gamov

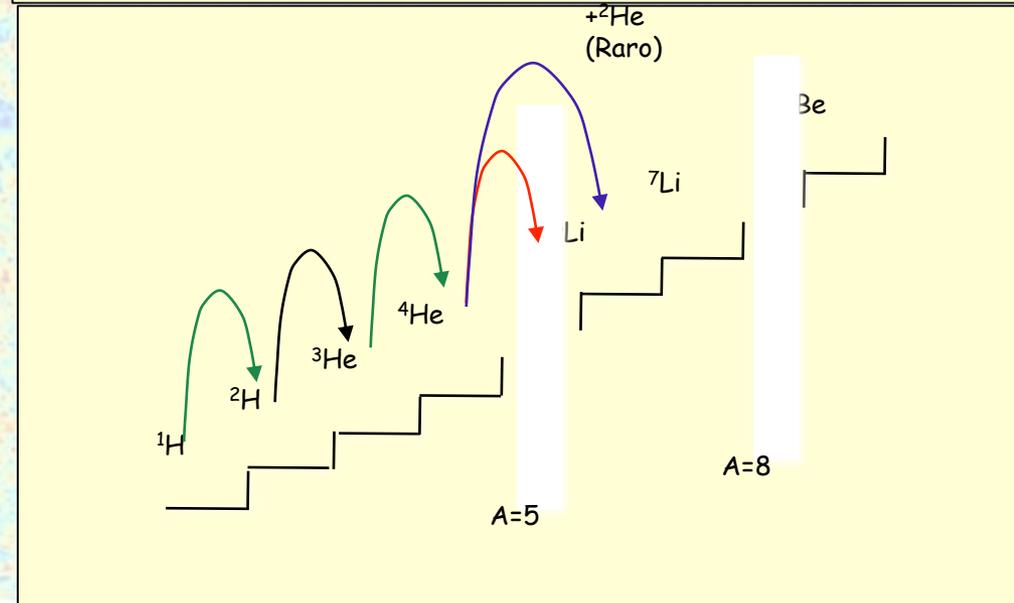
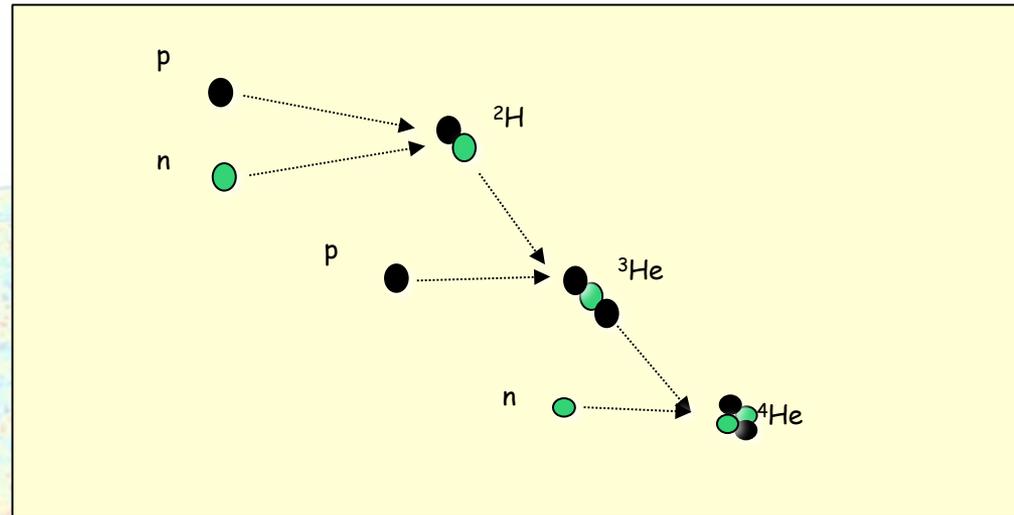
Em 1946, Alpher, Bethe e Gamov sugeriram a possibilidade de que todos os elementos químicos teriam sido gerados através de uma longa cadeia de captura de nucleons em 1 Universo primordial em expansão e que estaria esfriando-se.

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

A formação de elementos leves

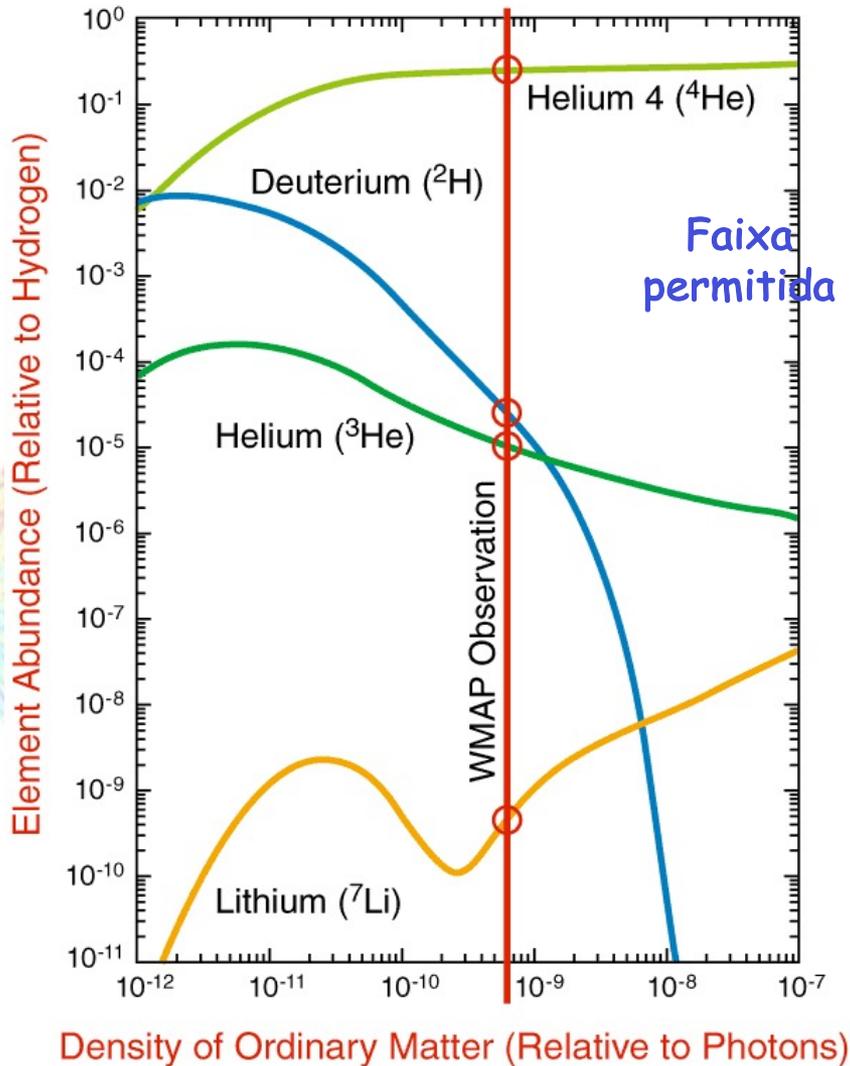
Previsões da teoria:

- Forma, essencialmente, Hidrogênio & $^4\text{Hélio}$
- Forma, em muito menor quantidade, ^2H , ^3He , 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)



Mg

C N O Ne

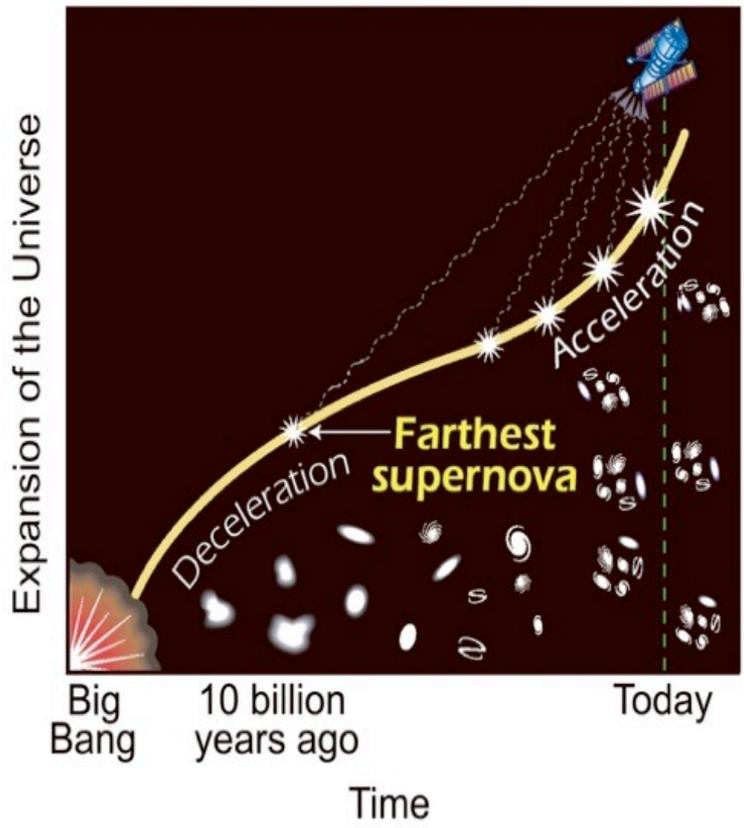
Si S Ar

Fe

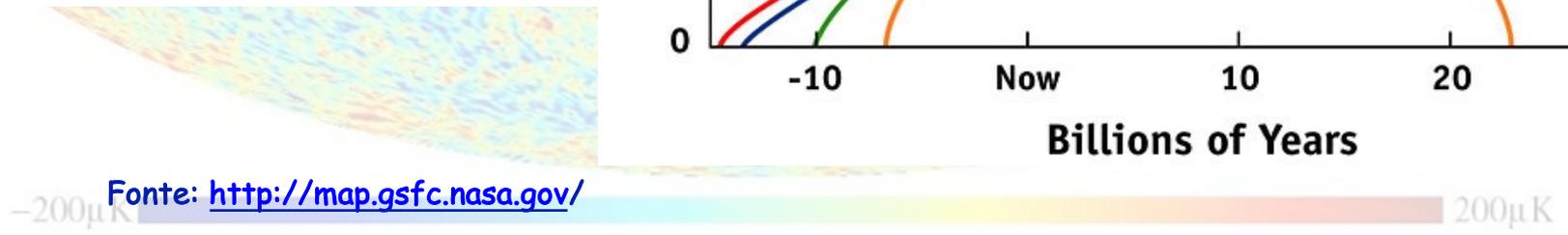
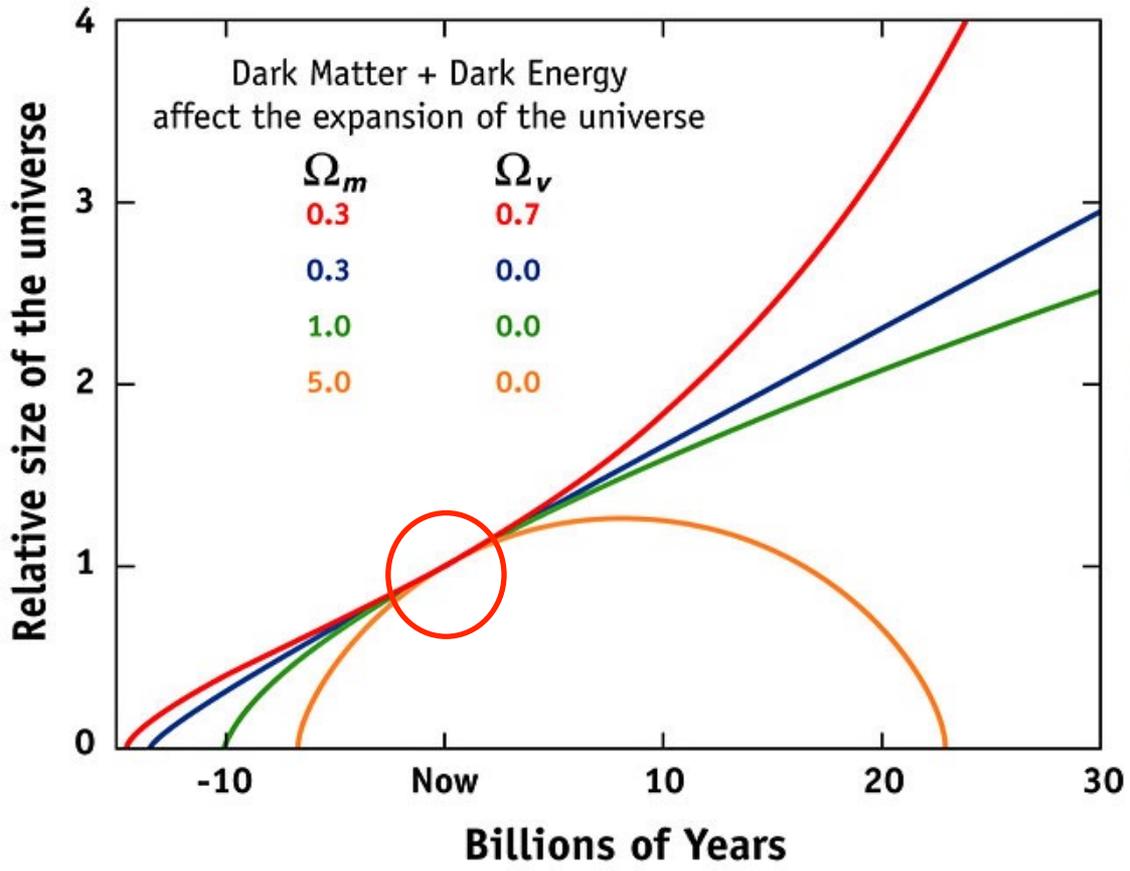
Courtesy Ben Mc Call

A ACELERAÇÃO DA EXPANSÃO

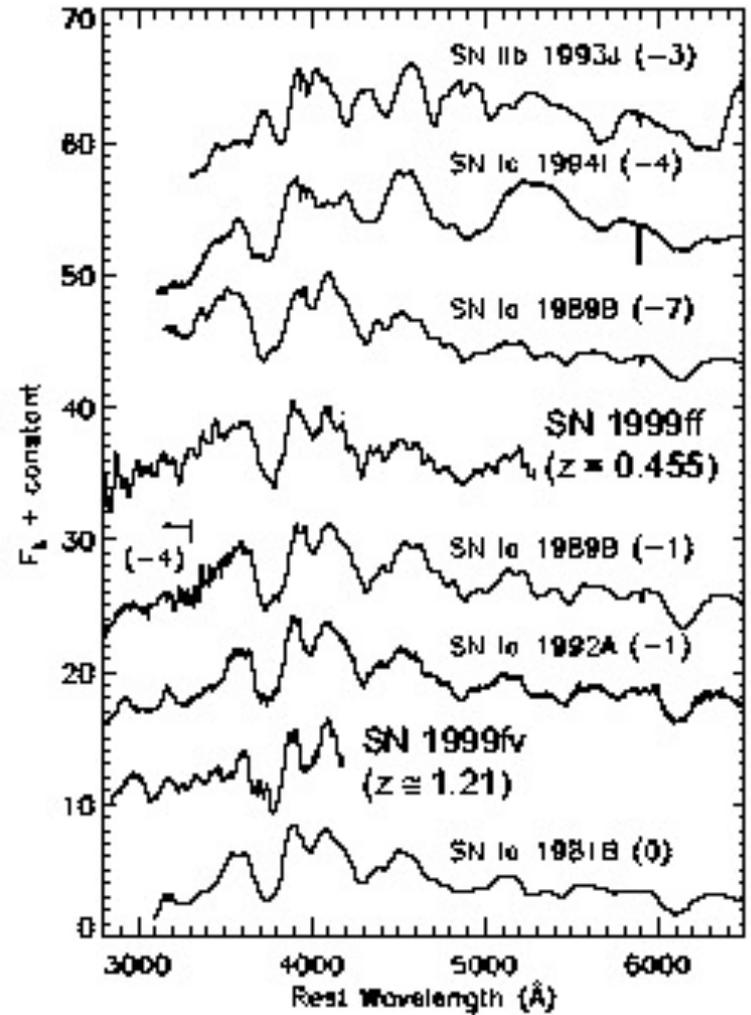
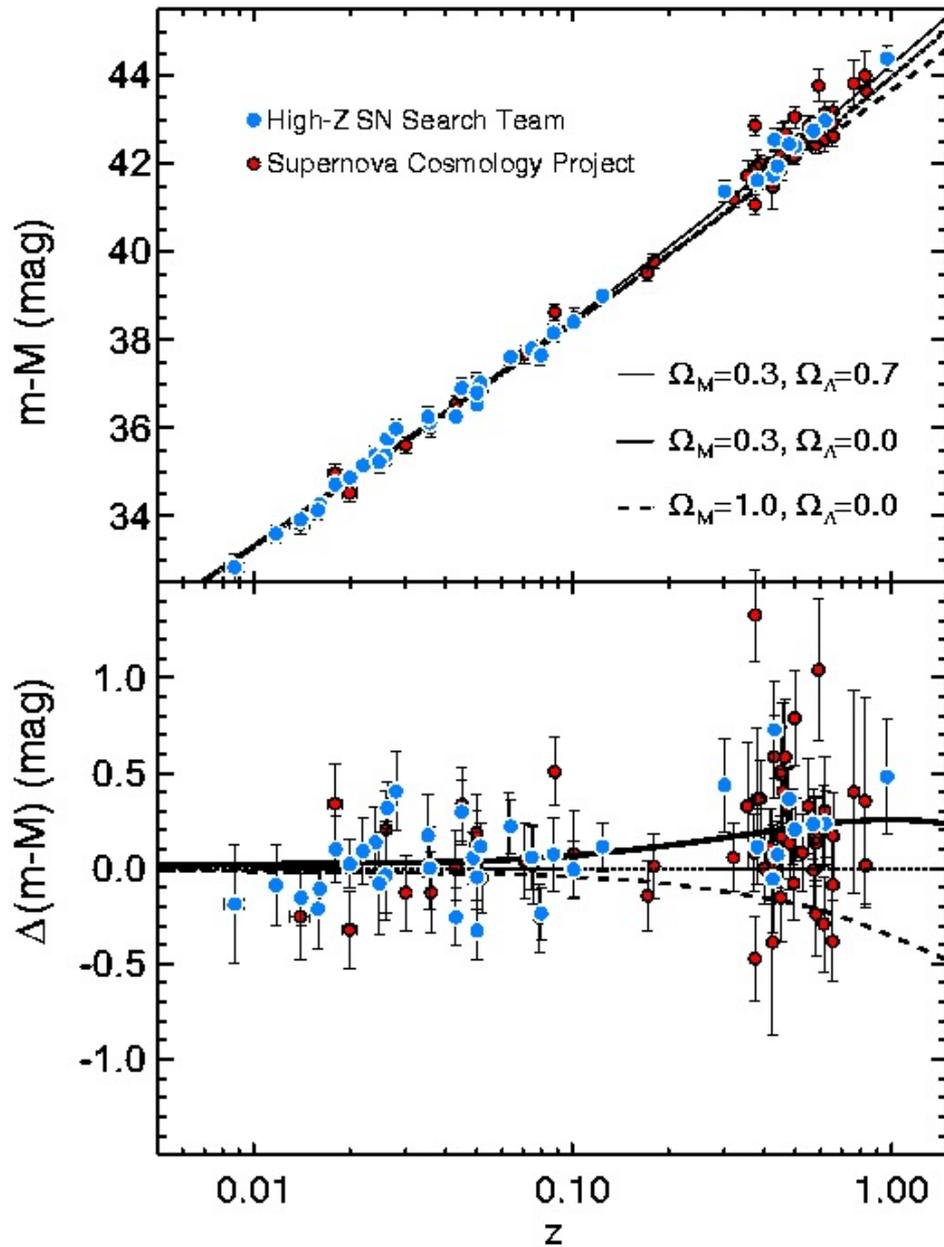




EXPANSION OF THE UNIVERSE

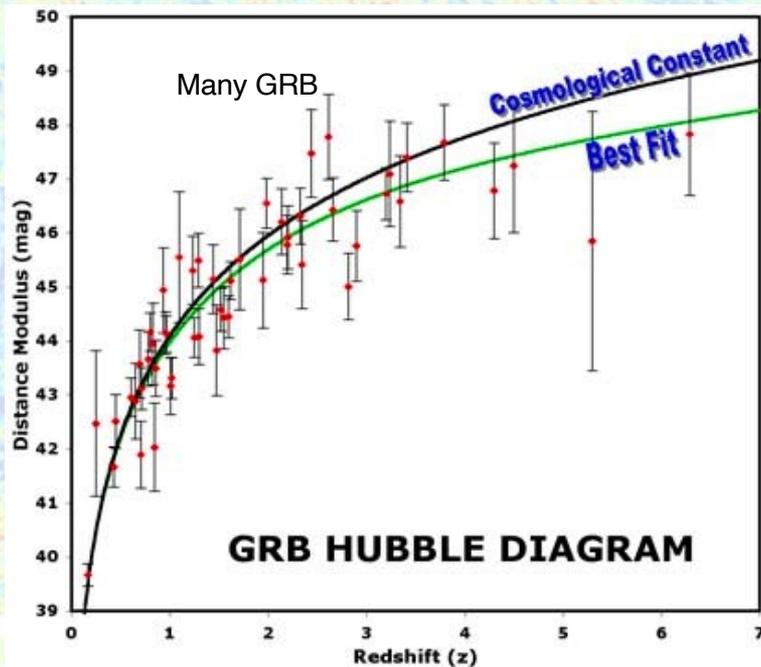
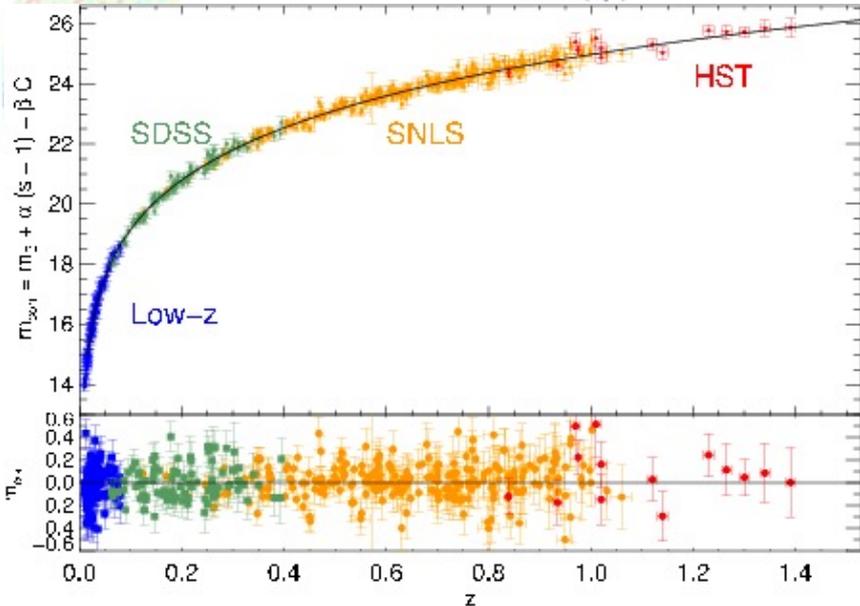
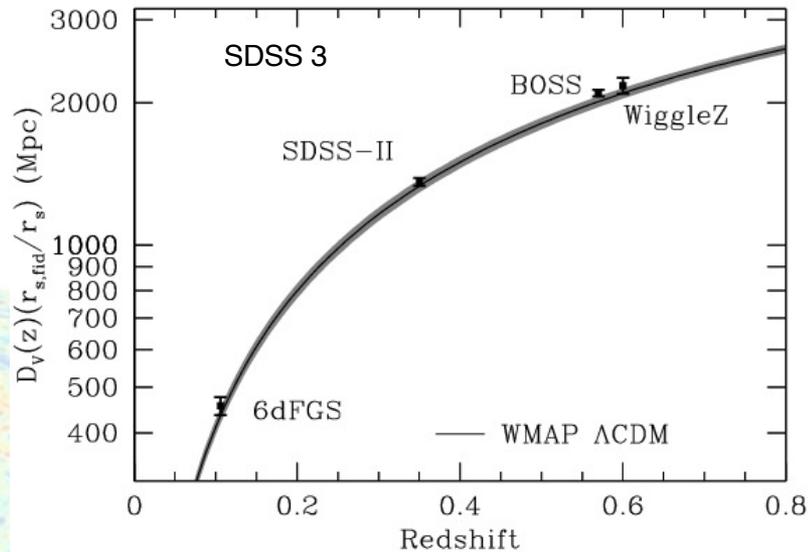
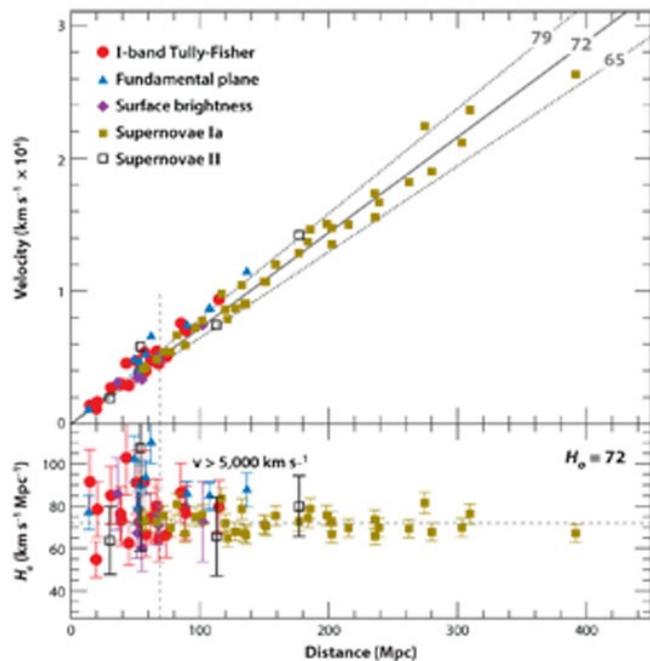


Fonte: <http://map.gsfc.nasa.gov/>





Cepheid Key Project (Freedman 2001)



A Cosmologia do séc. XXI

Einstein's GR

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

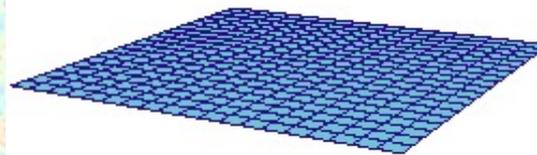
expansion

matter

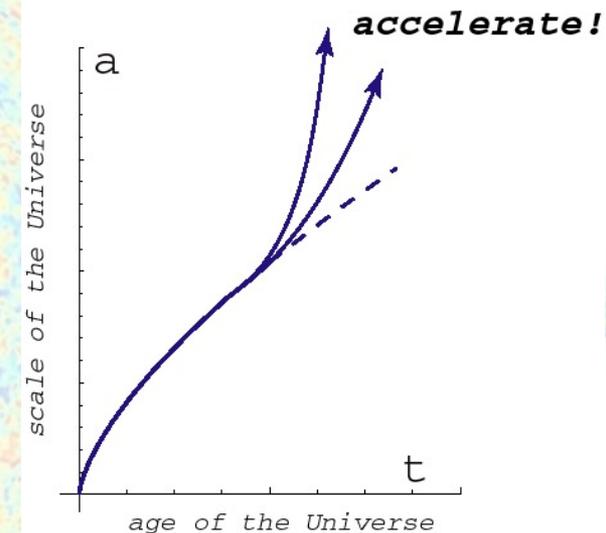
**Dark Energy:
Vacuum?
Quintessence?**

Geometry

flat!



Cosmology



Fonte: Robert Caldwell (Dartmouth College)

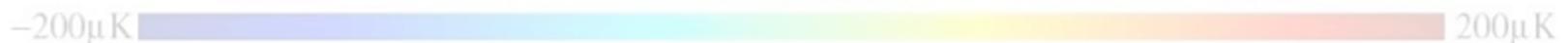
-200 μ K

200 μ K



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

