

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

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

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

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

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

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

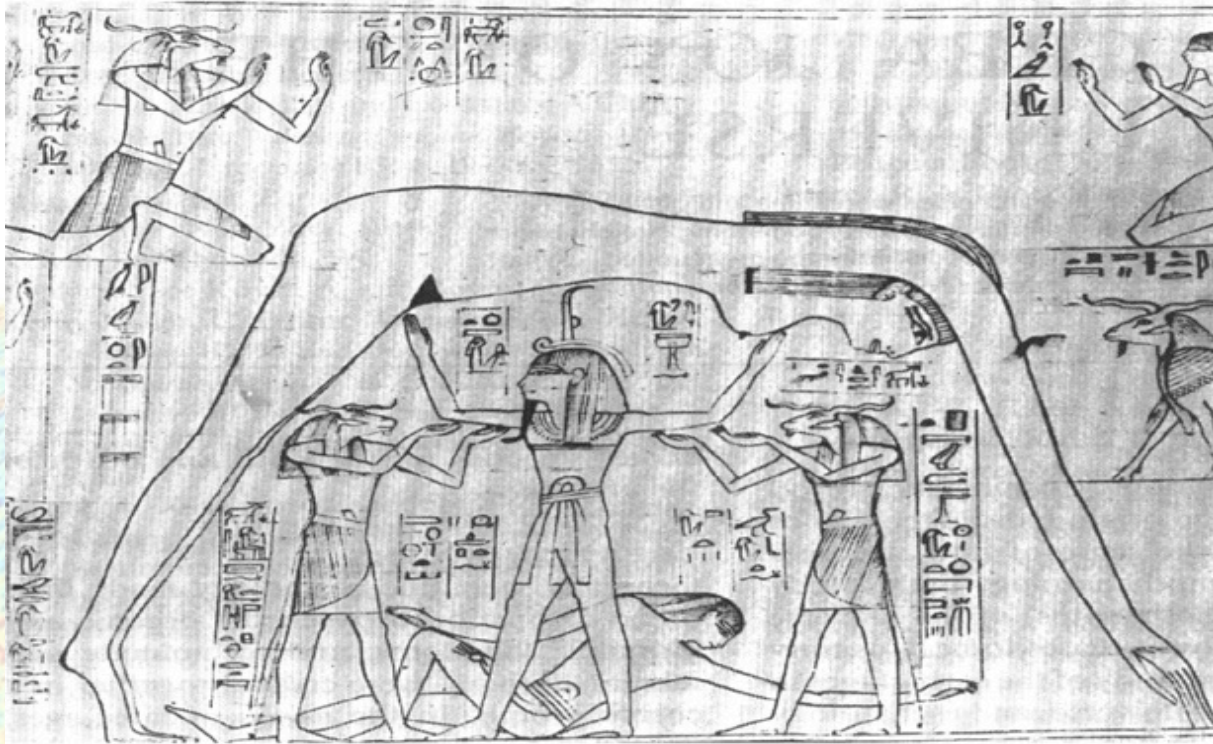
COSMOLOGY MARCHES ON



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 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.

-200μK  200μK

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

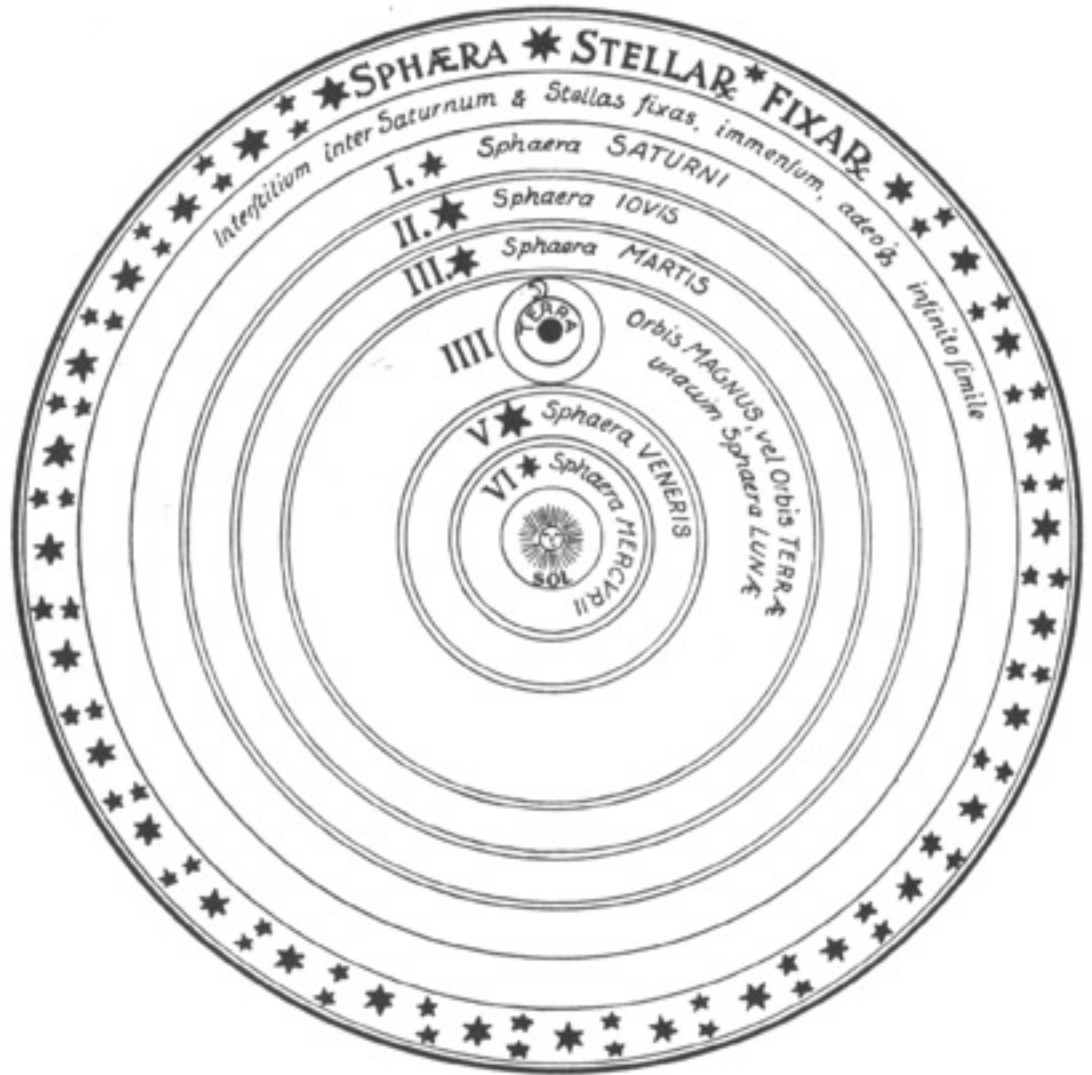


Nessa época os modelos de Universo consideravam que a Terra estava no centro de tudo e que o céu era uma tampa com buracos. A luz proveniente de fogos ardendo no lado de fora brilharia através dos buracos e alcançaria a Terra como a luz das estrelas.

Uma visão do Universo por volta de 1500 AC



Niclas Kopernik
(1473 – 1543)

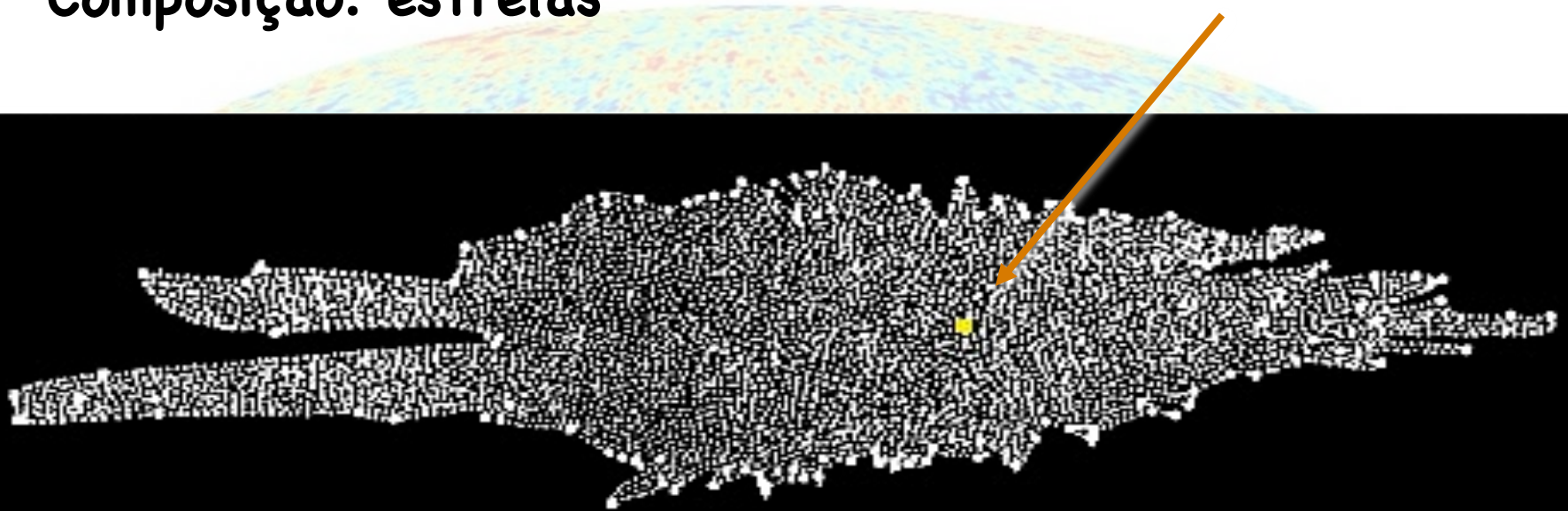




Uma visão do Universo por volta do final do séc. XIX

Composição: estrelas

Sistema Solar



30,000 anos luz

Origem: ?

William Herschel
(1738–1822)



Uma visão do
Universo no séc.
XXI



Uma comparação com a Cosmologia do Séc. XIX

☑ Final do século XIX e início do século XX

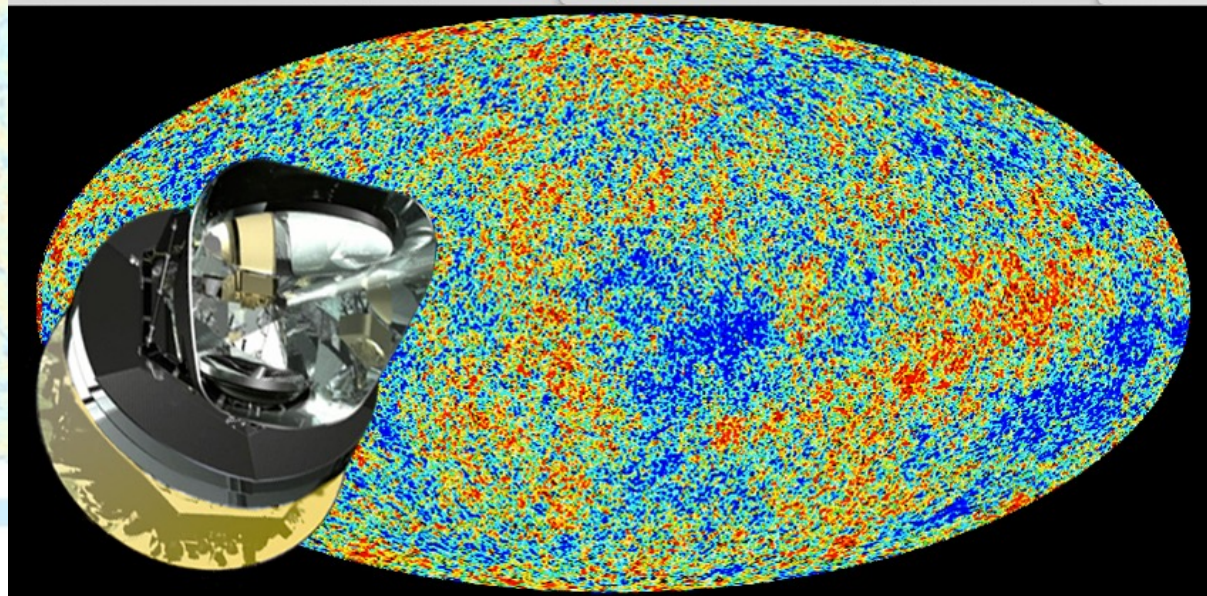
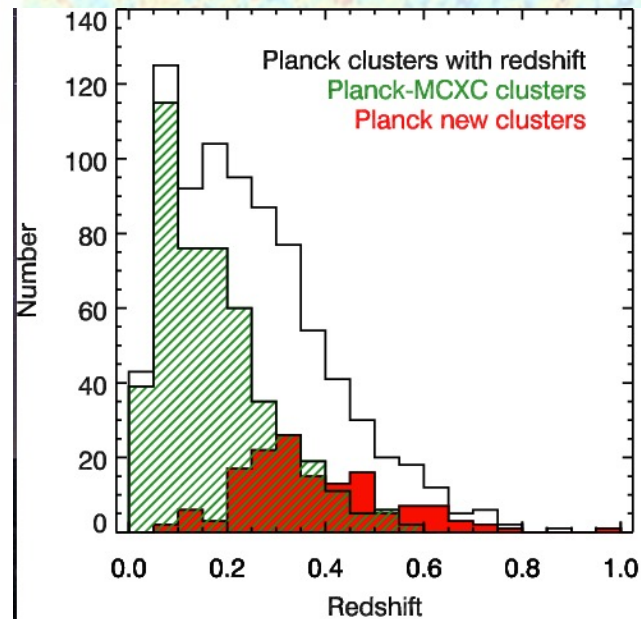
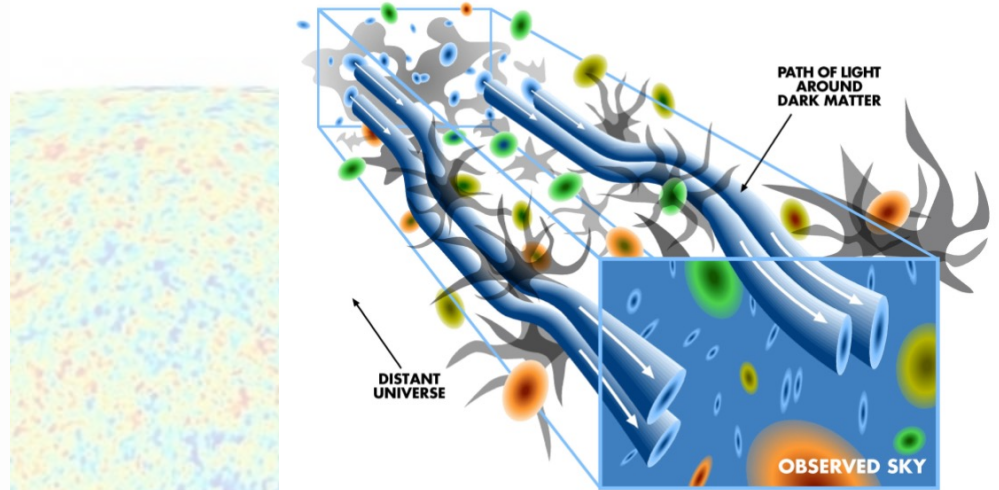
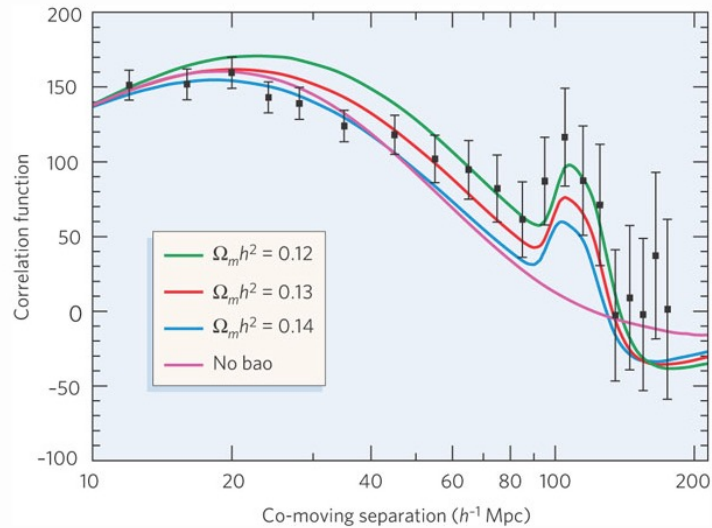
- Observação: telescópios ópticos e chapas fotográficas
- Universo "restrito" à Galáxia (~ 100 kpc)
- Descrição do Universo: Física Clássica (Eletromagnetismo, Mecânica Clássica e Termodinâmica)

☑ 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?

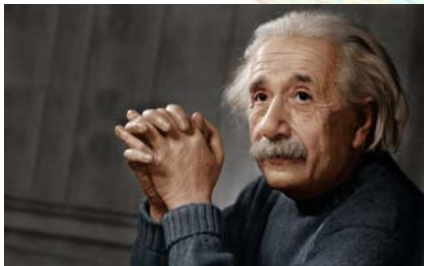




O modelo cosmológico padrão – MCP

- ✓ 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

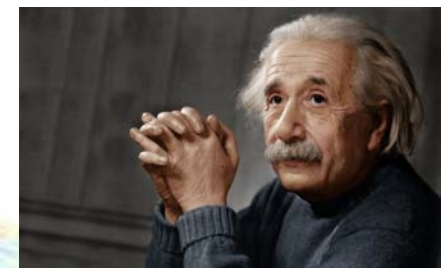
O universo observável

- ☑ 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.

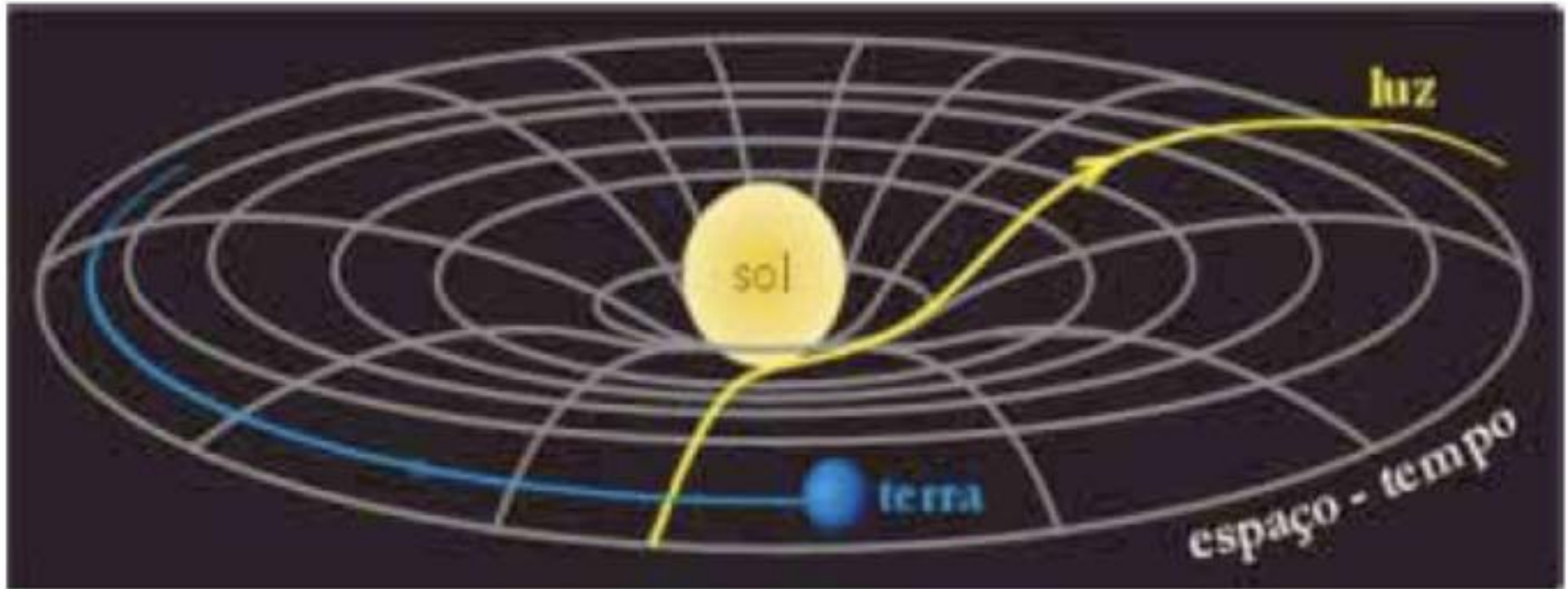
Georges
Lemaître



-200 μ K

200 μ K

As equações do MCP



Métrica de Robertson-Walker

(define um espaço-tempo maximamente simétrico).

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

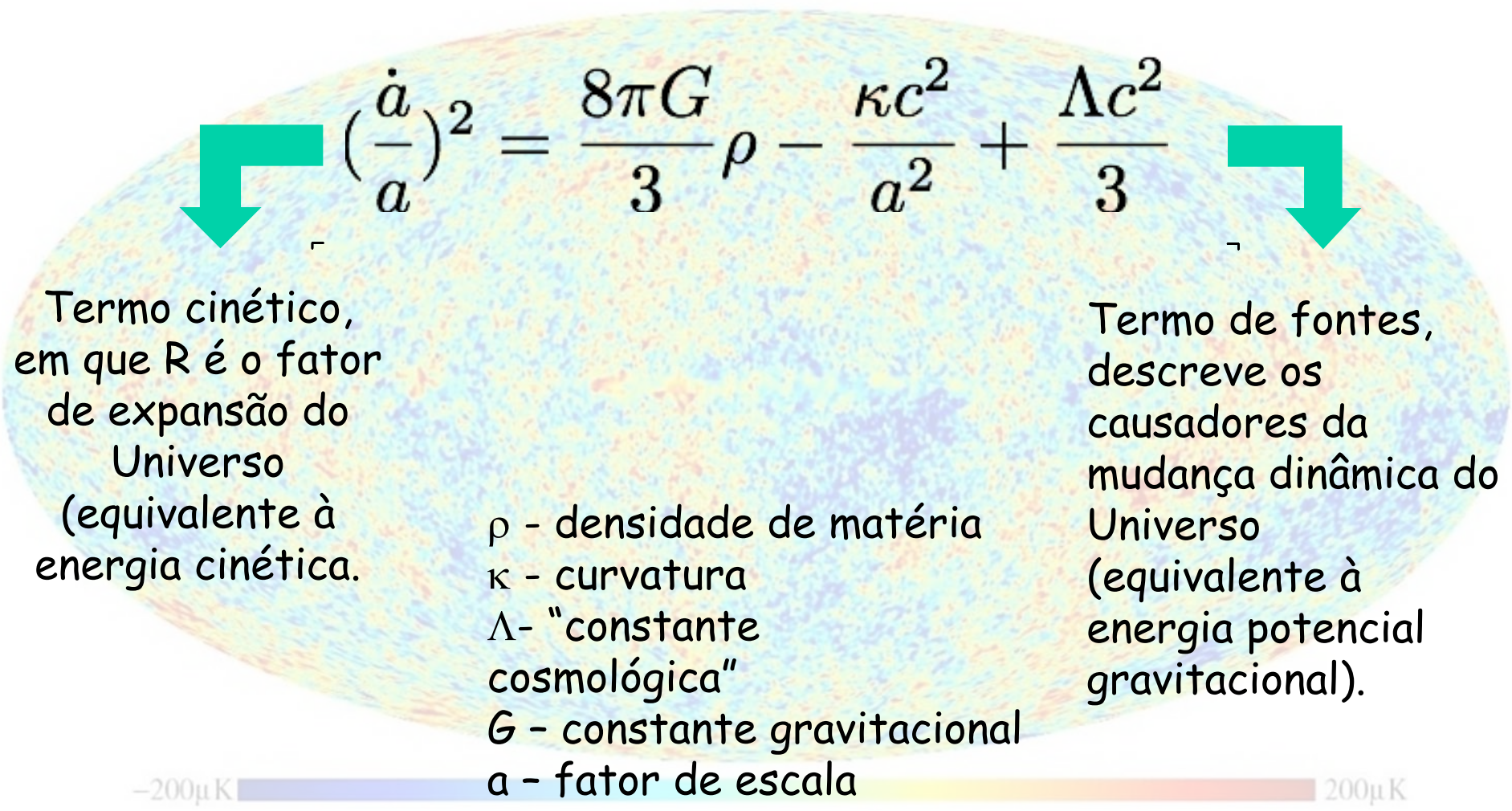
Fator de escala, define a expansão do Universo

C. A. Wuensche (2021)

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).

-200 μ K

200 μ K

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)

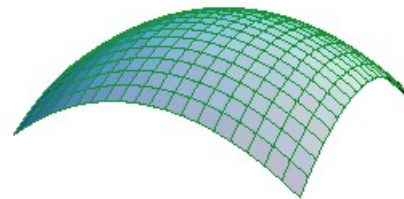
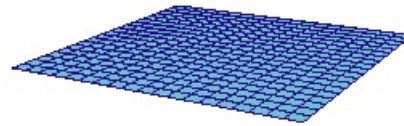
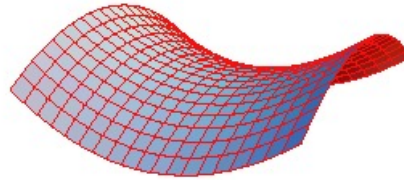
$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m - \rho_k$$

expansão

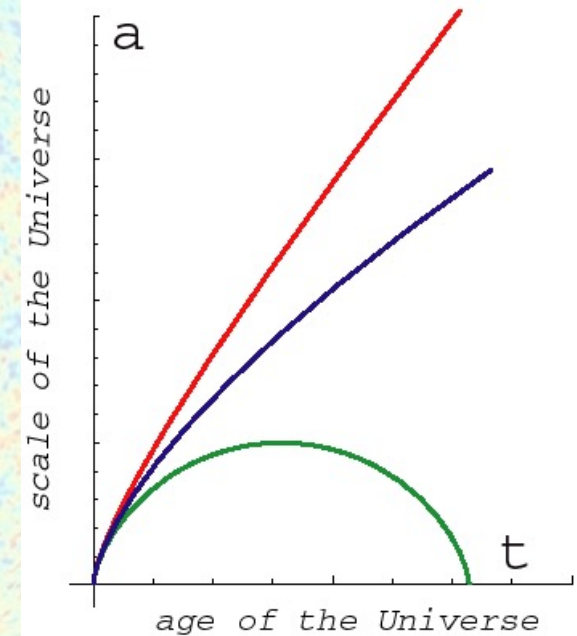
matéria

curvatura

Geometria



Cosmologia

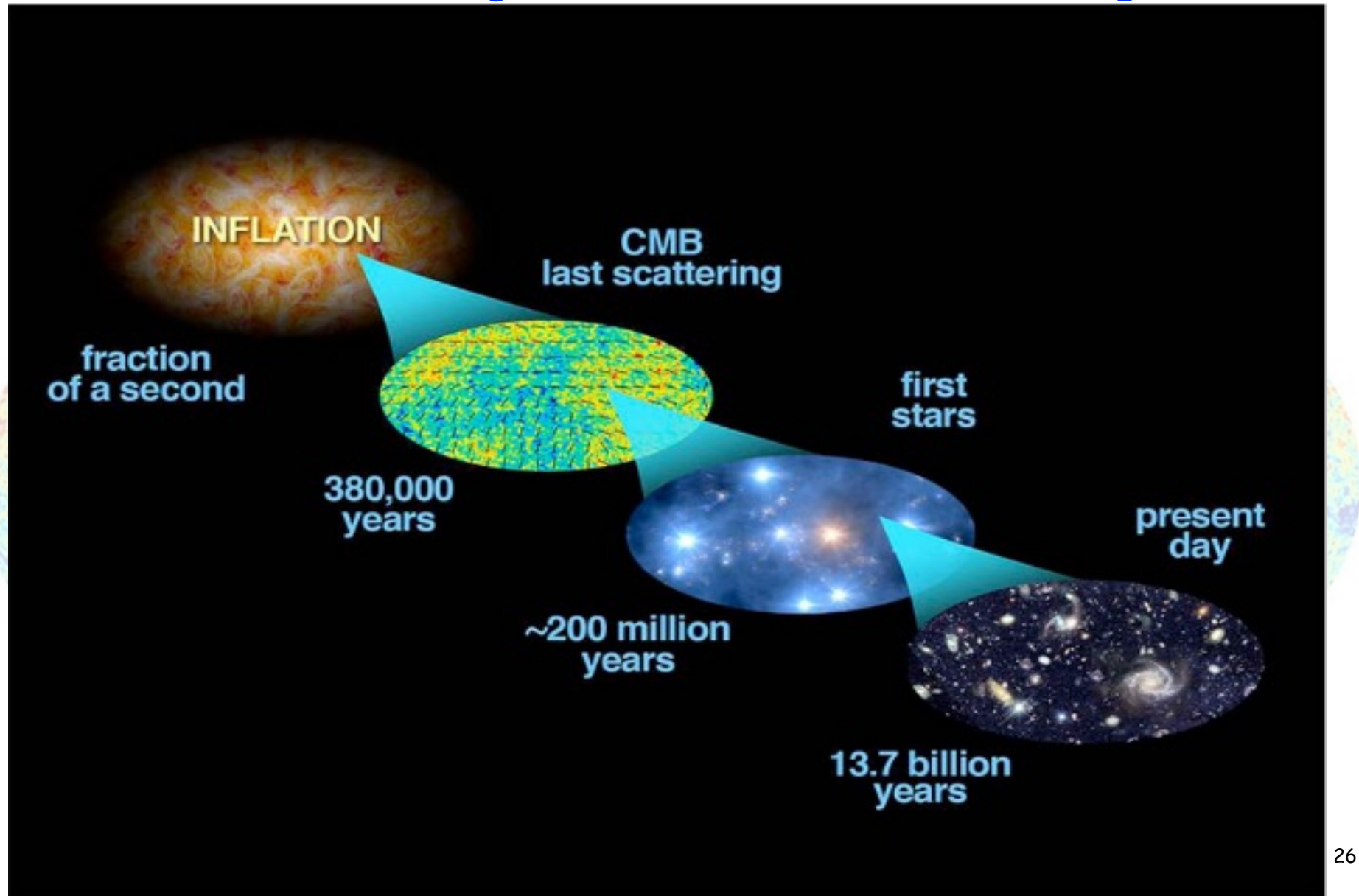


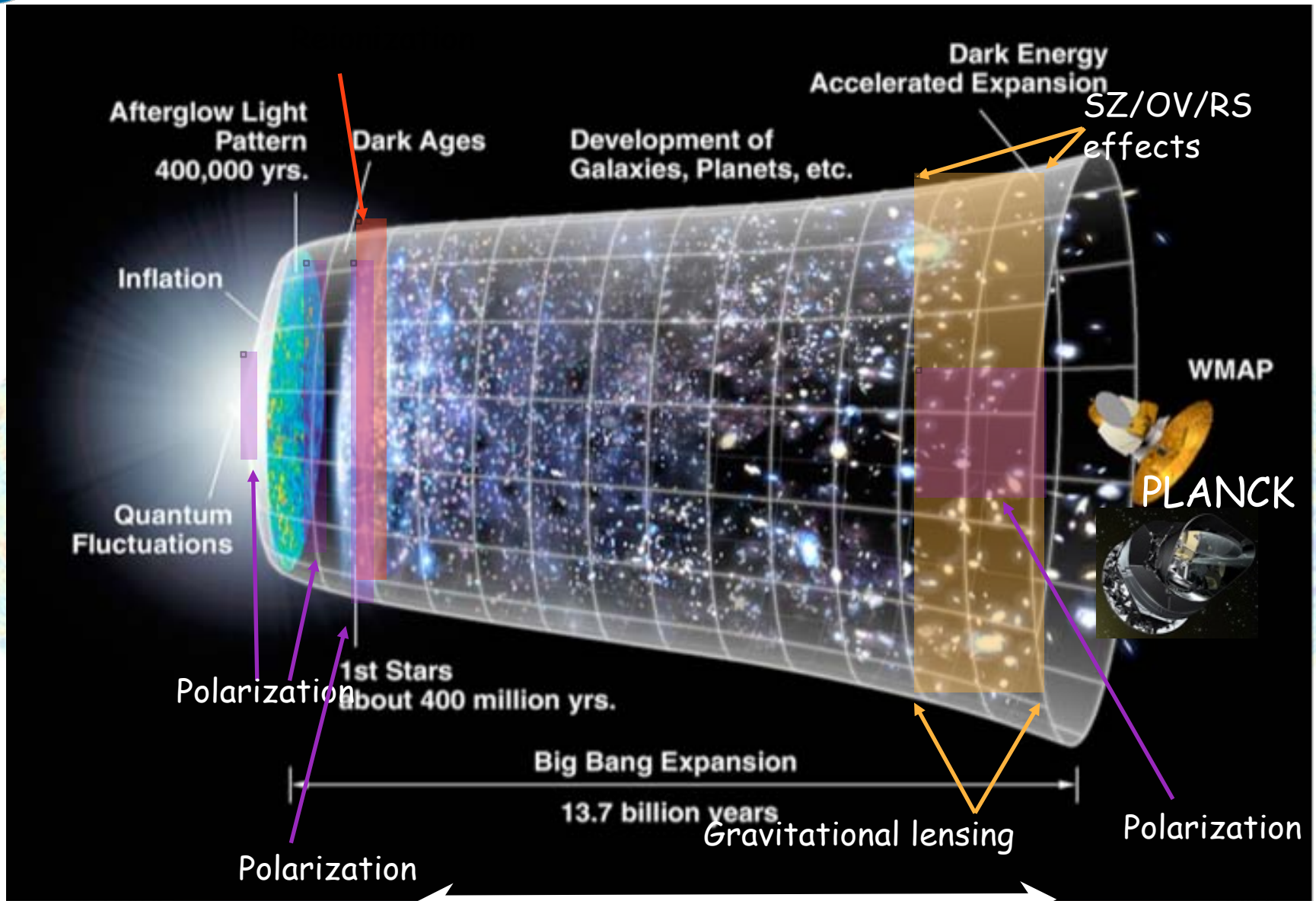


OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS



Observações em Cosmologia







OBSERVAÇÕES FUNDAMENTAIS

O paradoxo de Olbers



Por que o céu é escuro à noite?

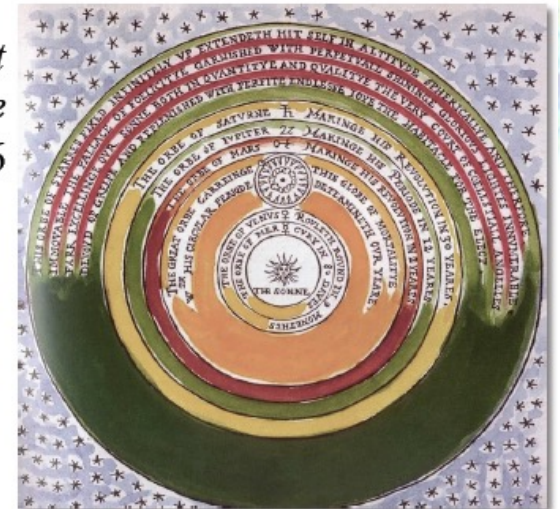
- ✓ Se o universo é infinito e possui infinitas estrelas, porque o céu é escuro à noite? Paradoxo de Olbers!!!! (Heinrich Olbers, 1823)
- ✓ A questão foi proposta, na verdade, por Thomas Digges em 1576
- ✓ Com muitas estrelas no céu, para onde quer que olhemos, haverá alguma para interceptar nossa linha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

Cunningham,
*The Cosmological
Glass*, 1559



Estrelas fixas na esfera
celeste: não há paradoxo

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



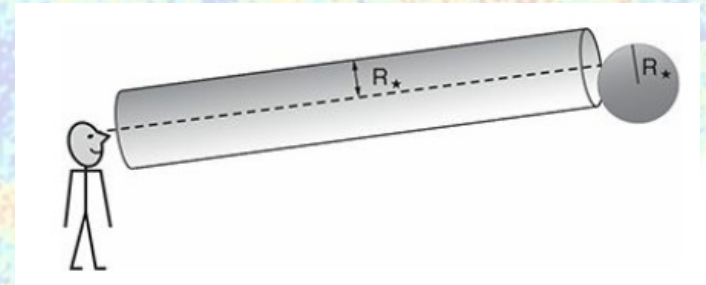
Estrelas distribuídas
num universo infinito:
há paradoxo!

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

- $n_* = 10^9$ estrelas/Mpc³; $L_* = L_{\text{sol}}$; $R_* = R_{\text{sol}}$ ($\sim 2 \times 10^{-14}$ 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 $N = n_* V = n_* (d \cdot \pi R_{\text{sol}}^2)$

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!!!!

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

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

-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

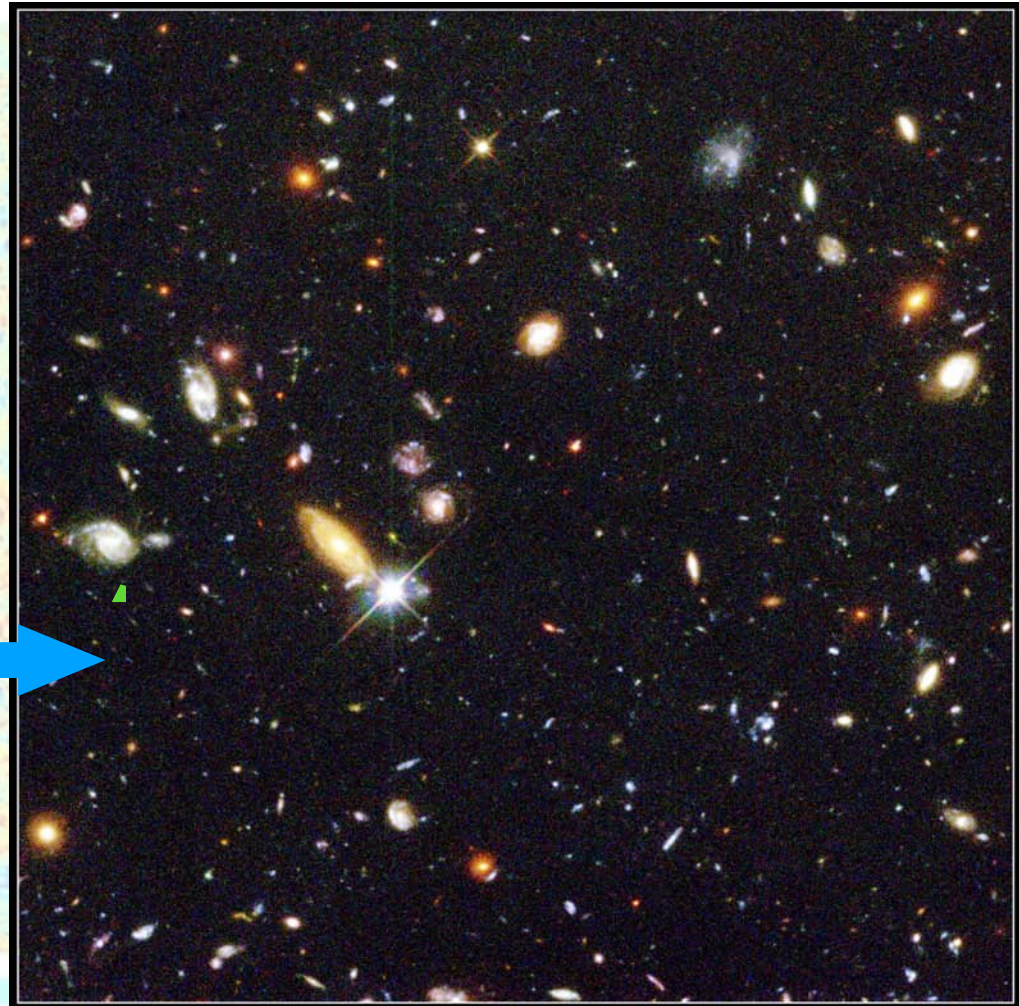
Hubble Deep Field
(www.nasa.gov)

100 bilhões
em todo o céu

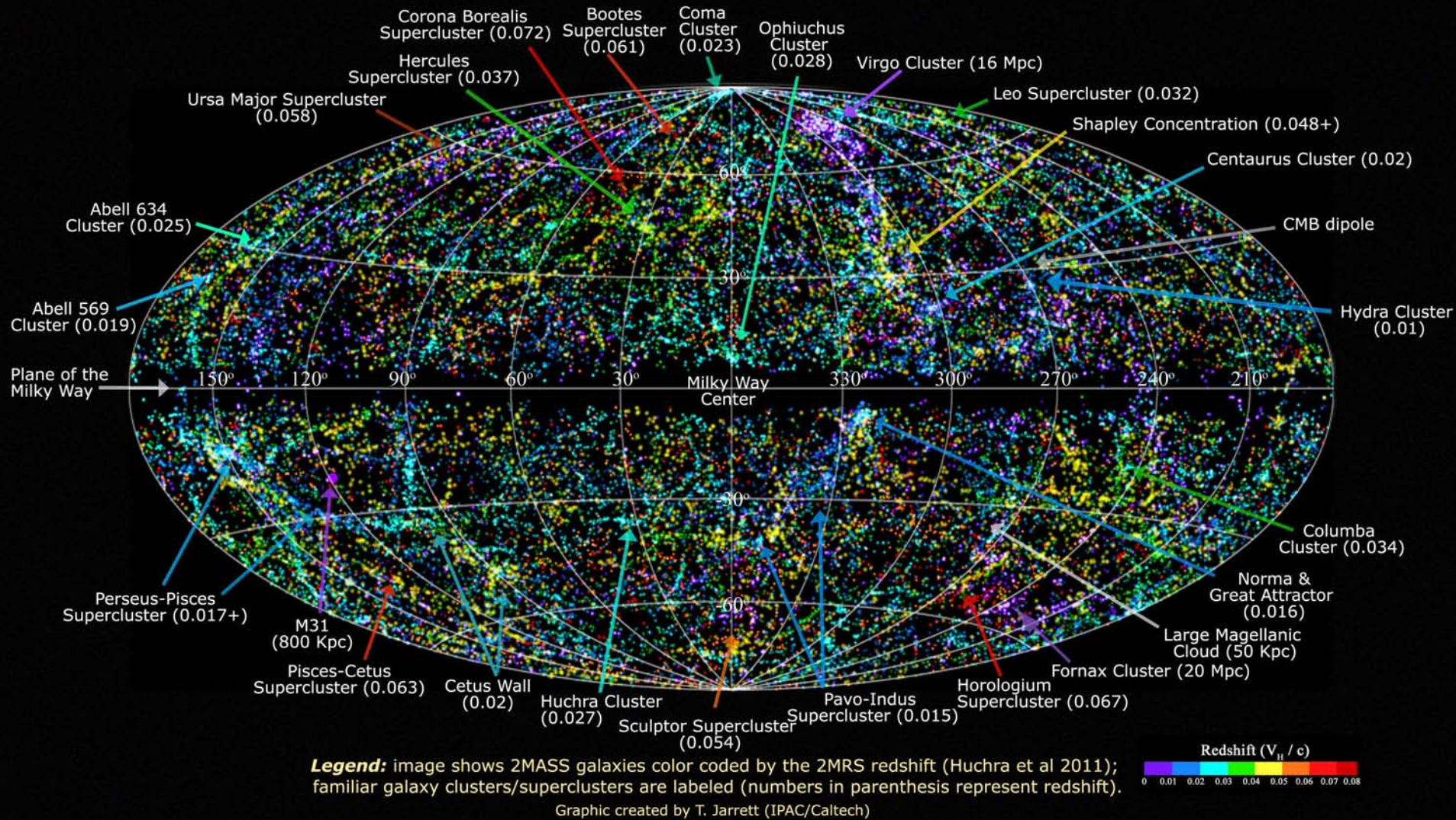
30.000
galáxias aqui



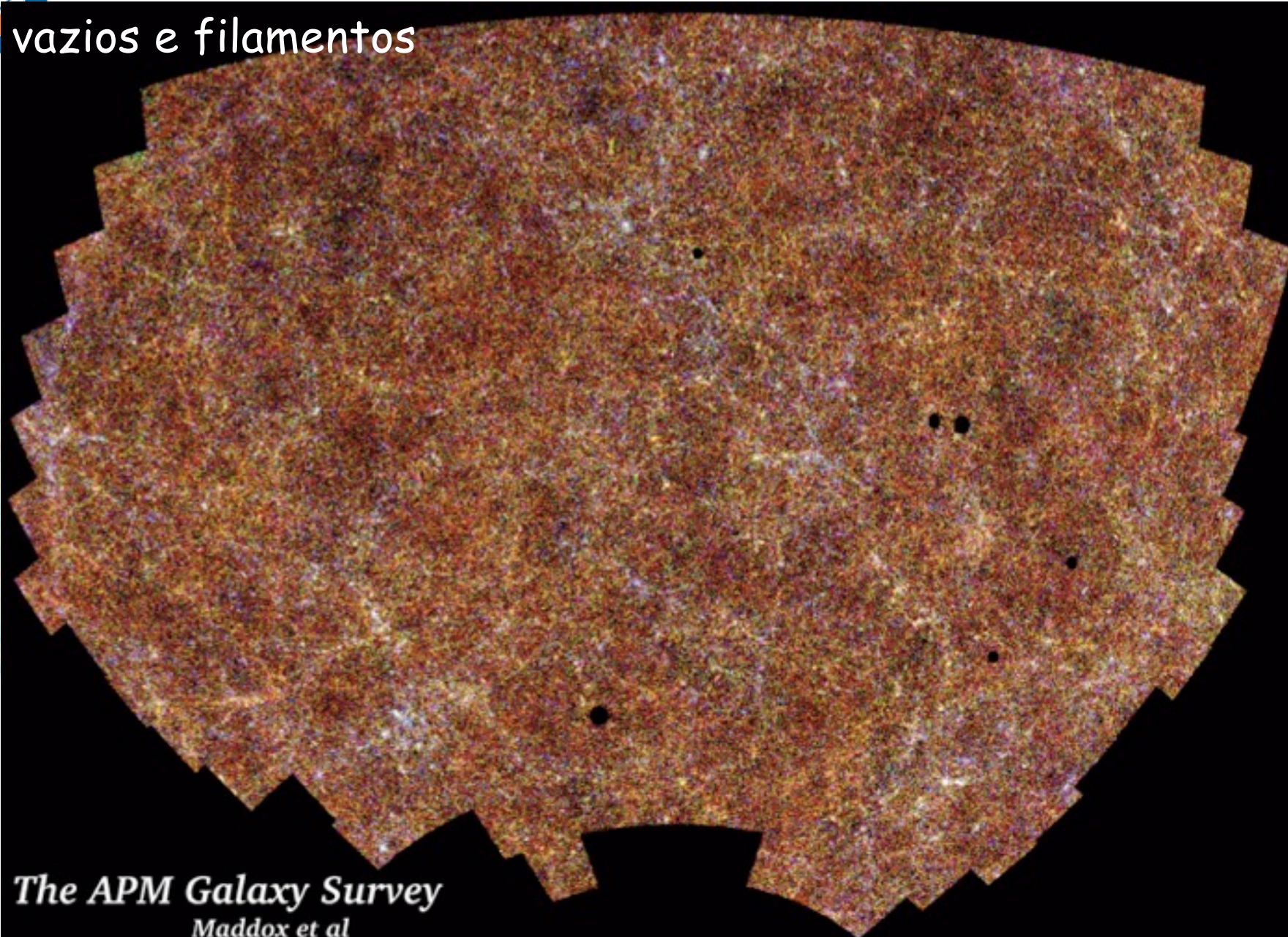
-200 μ K



2MASS Redshift Survey

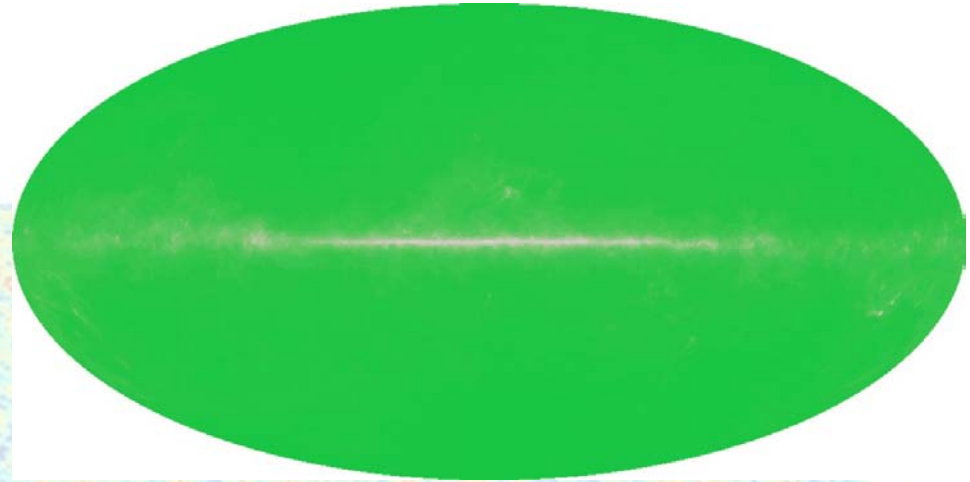


vazios e filamentos

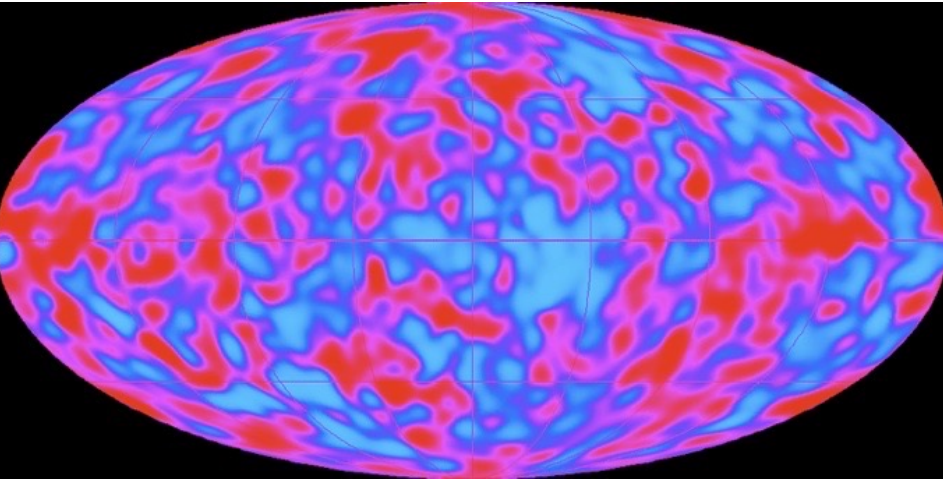




**Medida de Penzias e Wilson
(1965, simulado)**



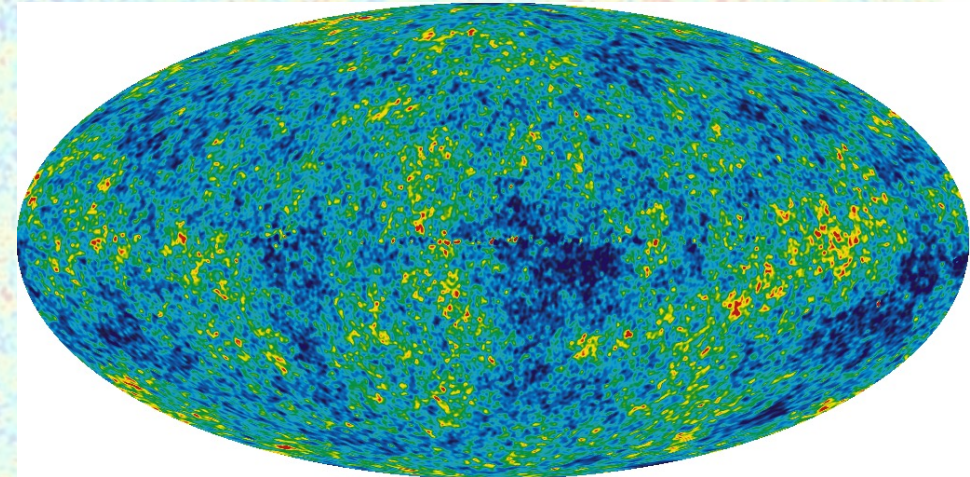
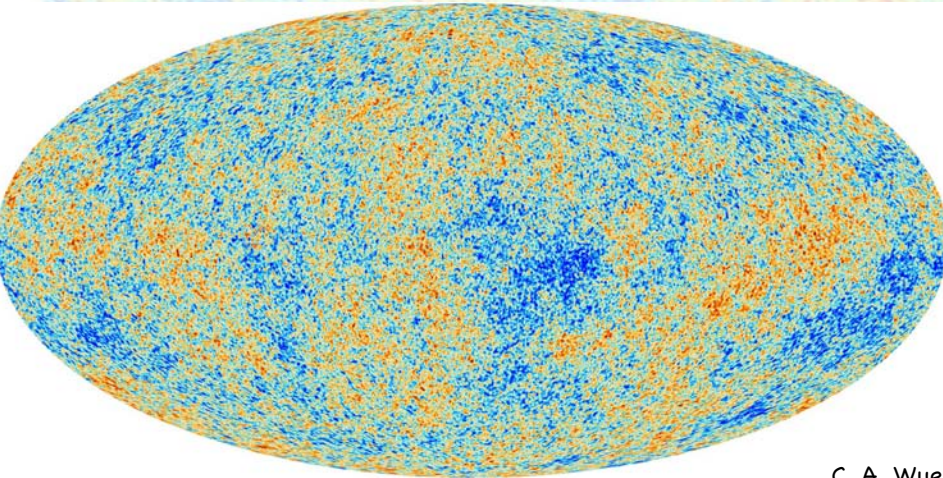
Satélite COBE (1996)



Satélite WMAP (2011)



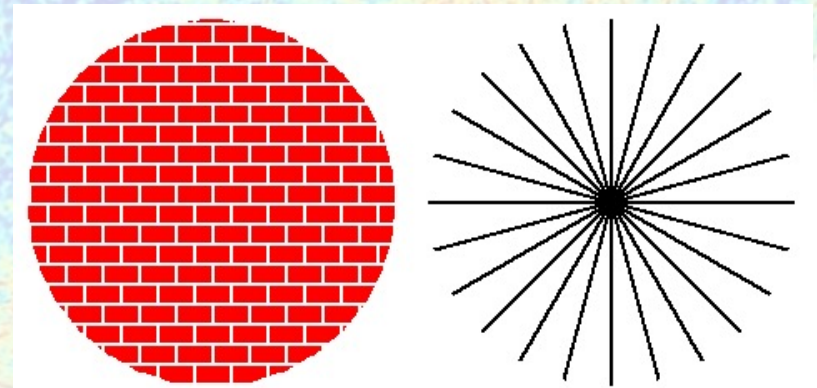
Satélite Planck (2018)



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

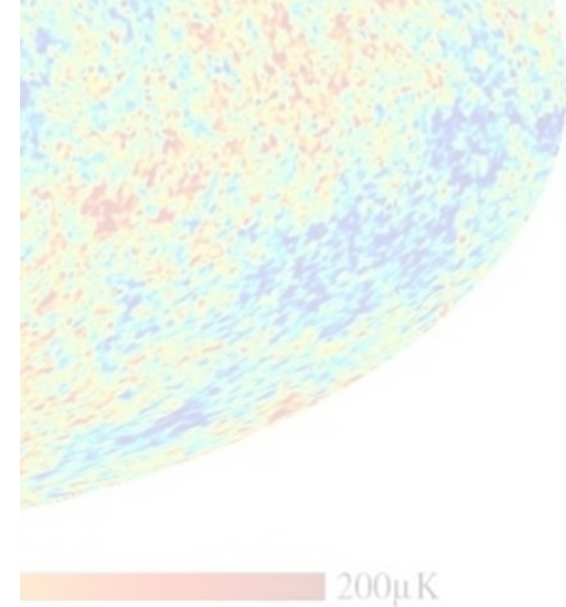
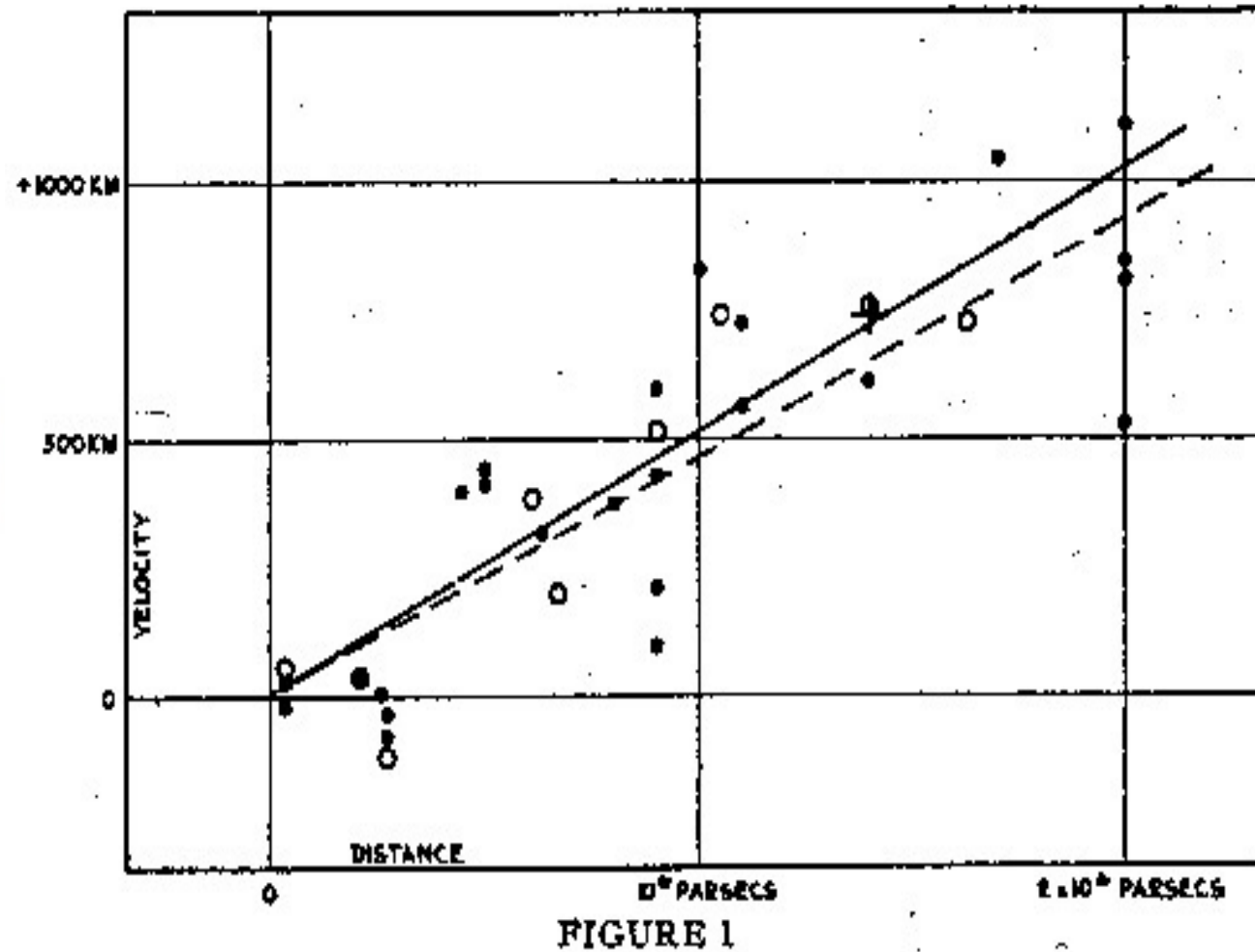


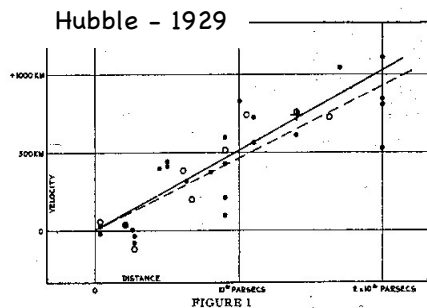
A EXPANSÃO DO UNIVERSO



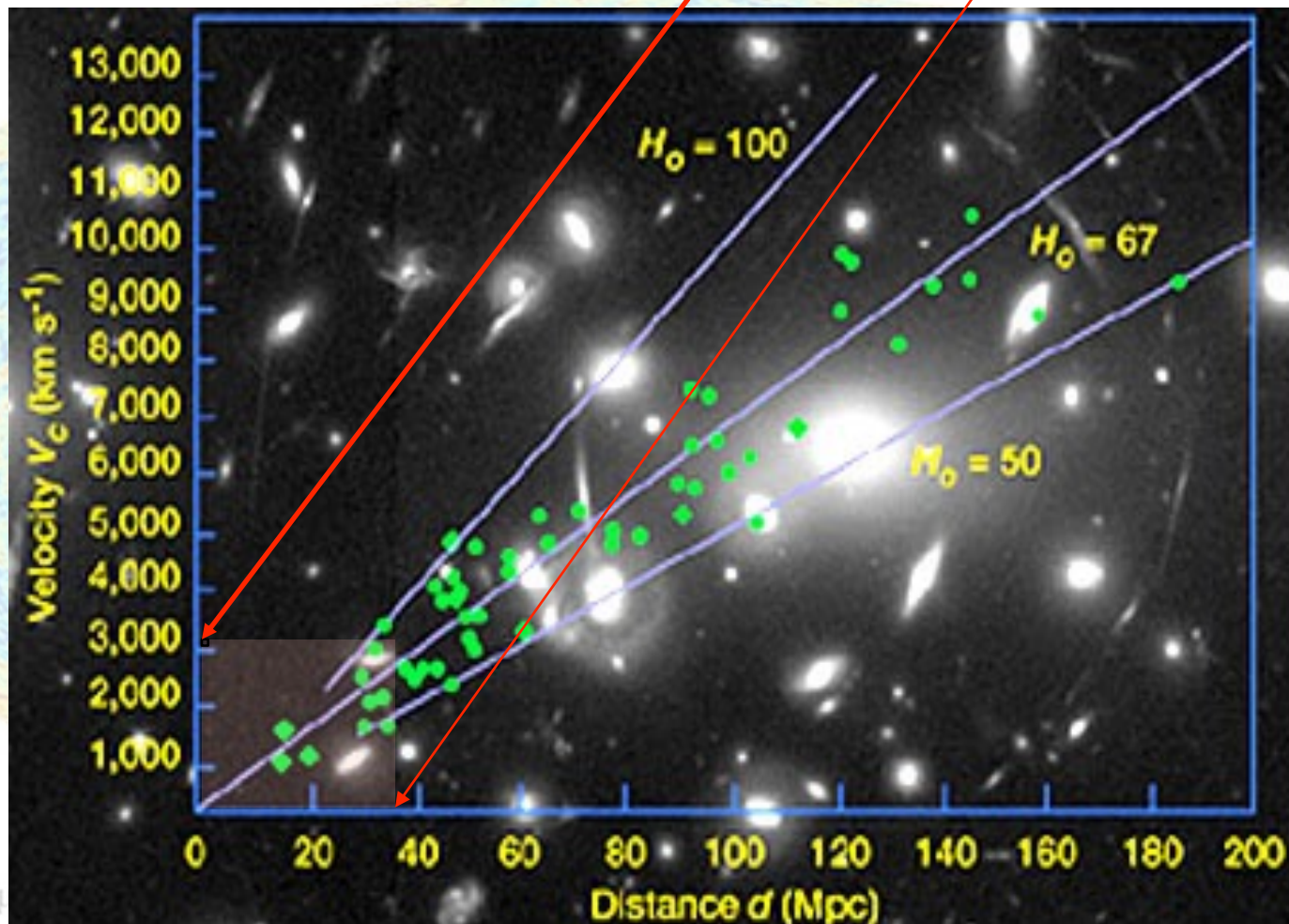
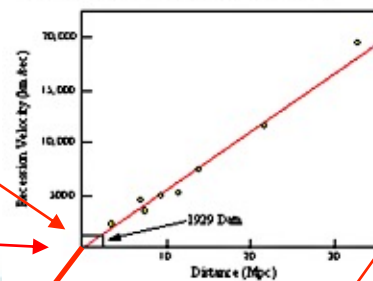
A expansão do Universo

Hubble - 1929



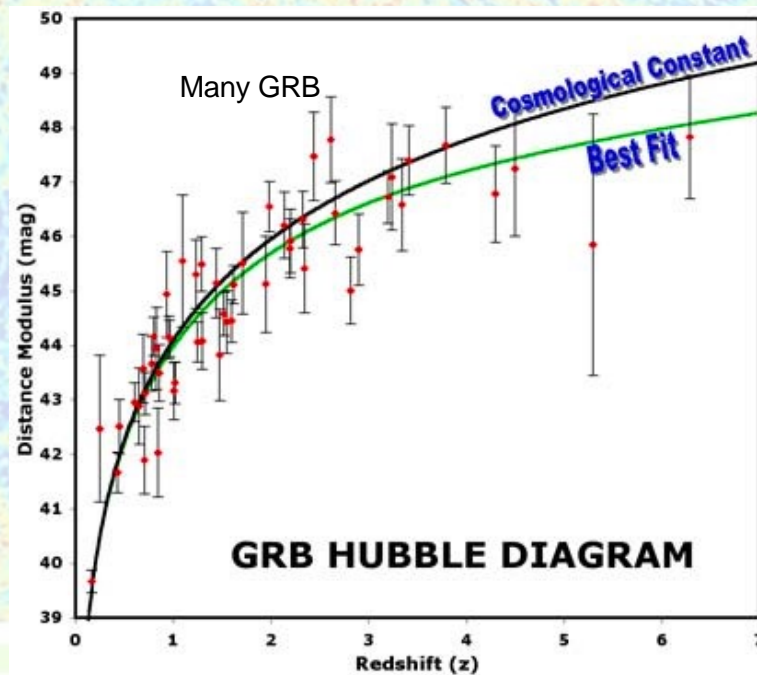
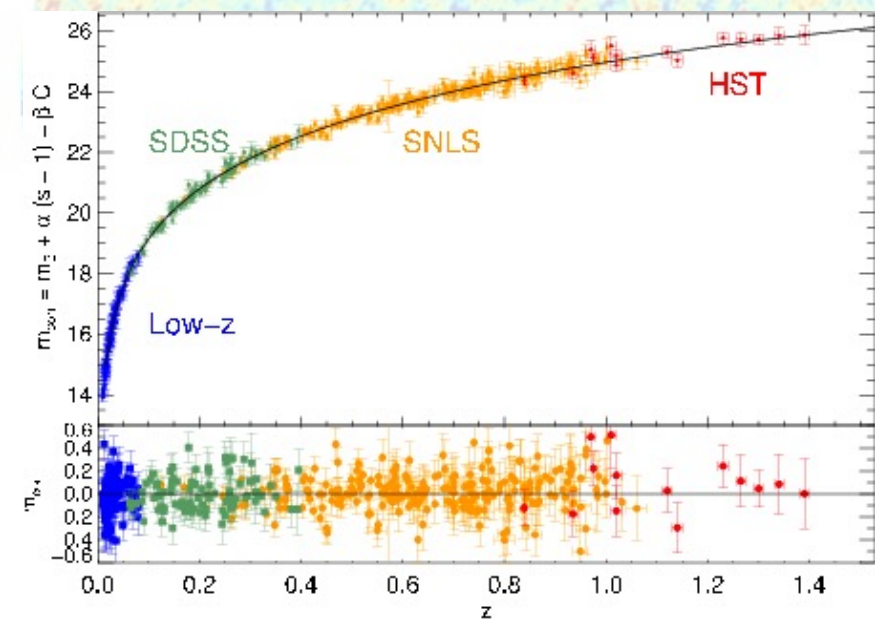
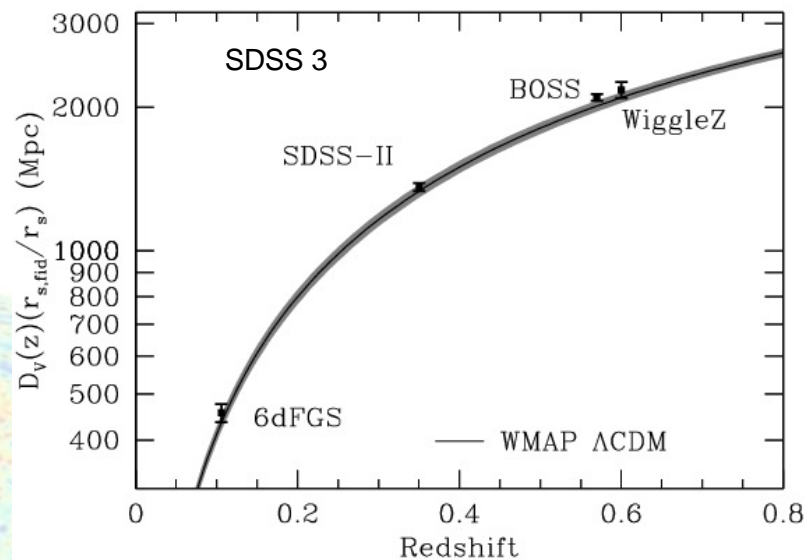
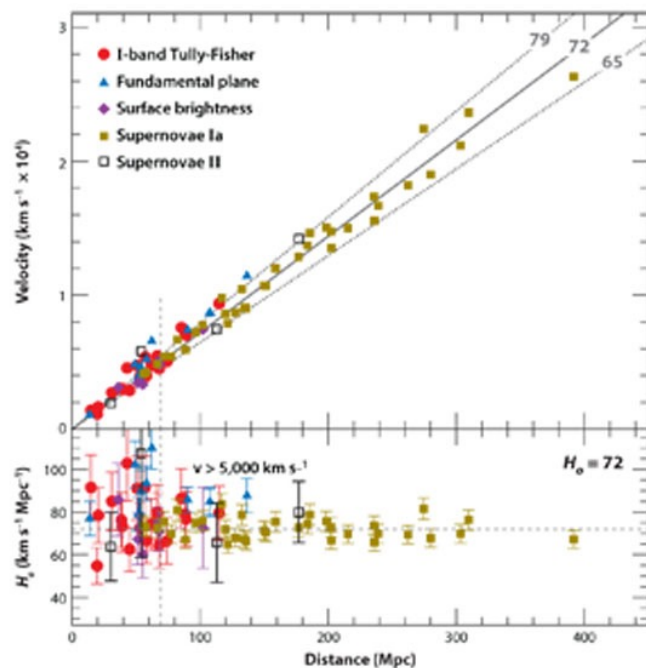


Hubble & Humason (1931)

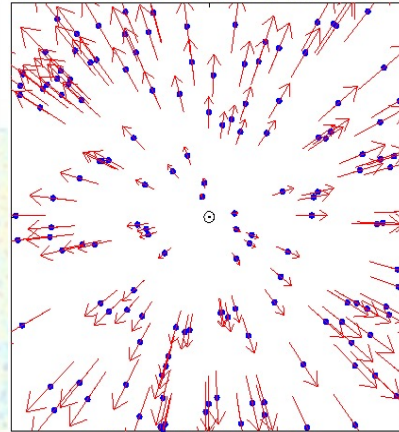




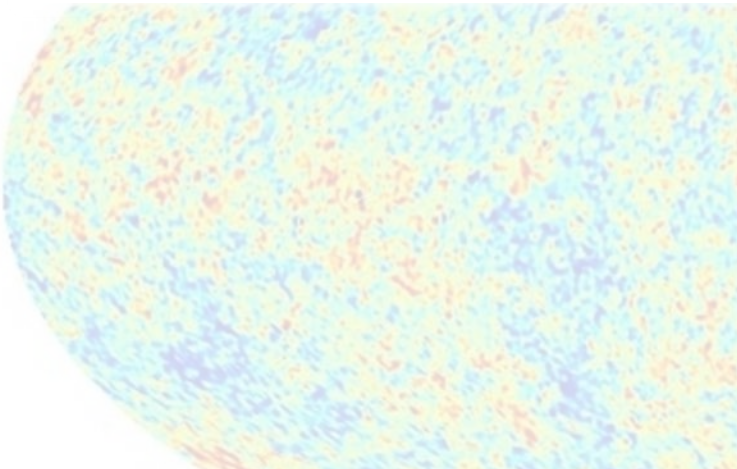
Cepheid Key Project (Freedman 2001)



A lei de Hubble



**Não há
centro do
Universo**



Lei de Hubble: $v = H_0 d$

Wrong: space is static; galaxies expand into it.



Right: space is dynamic; galaxies expand with it.



-200 μ K

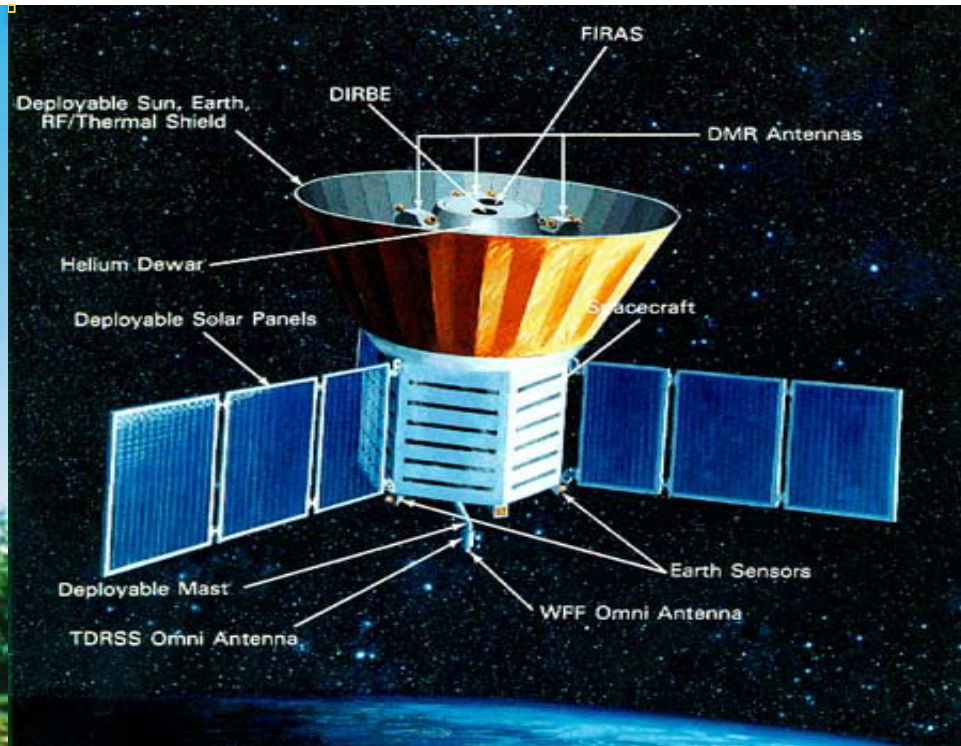
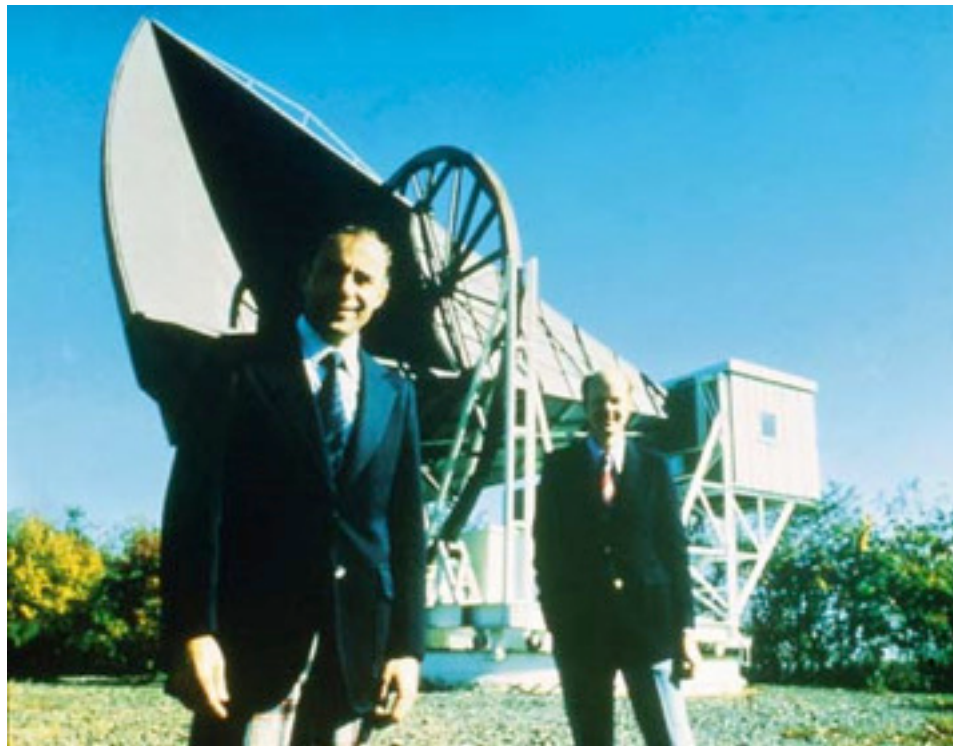
200 μ K

A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS





A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM)



A. Penzias e R. Wilson

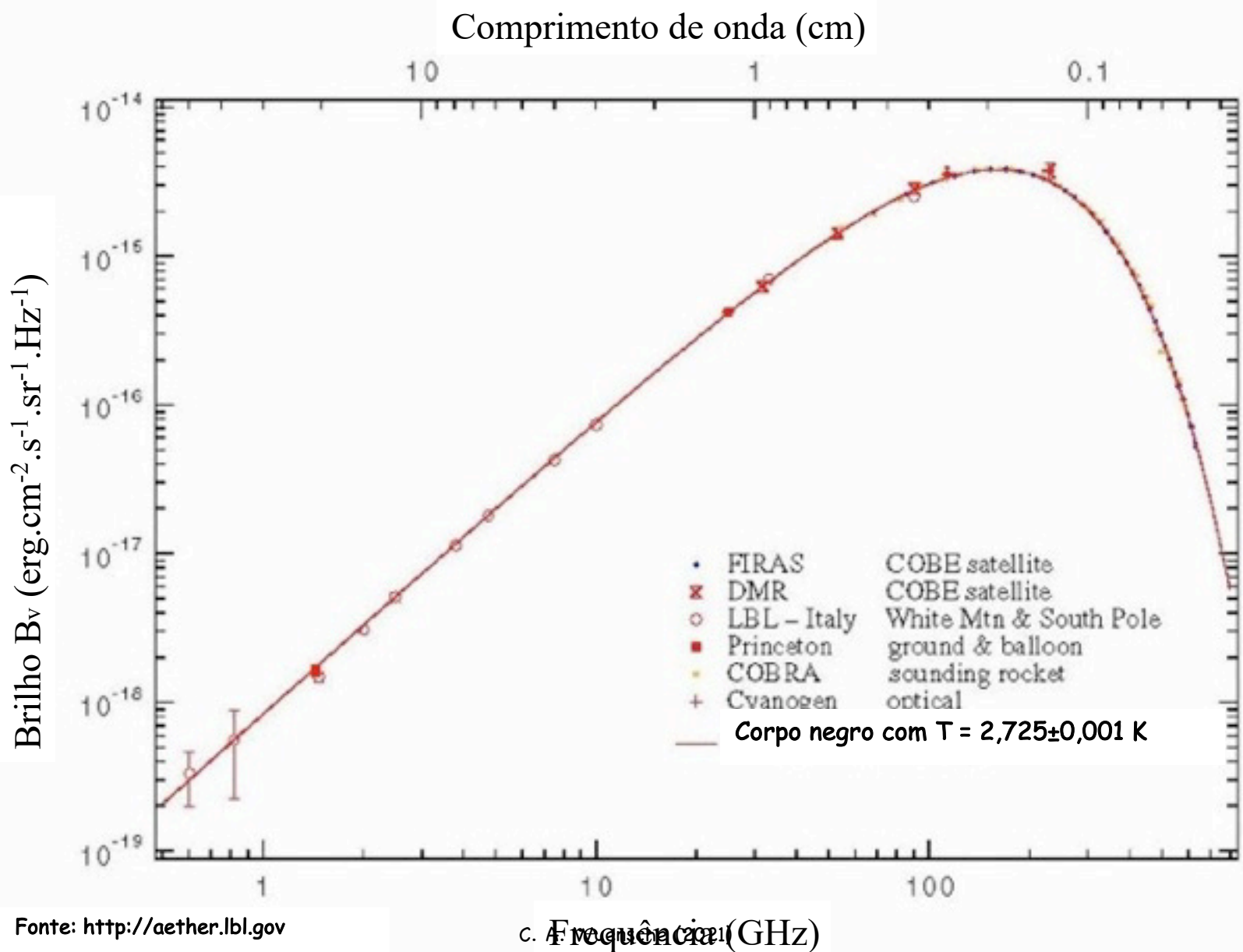
COBE (1989 - 1994)

Observamos seu espectro, **distribuição angular**, **polarização**.

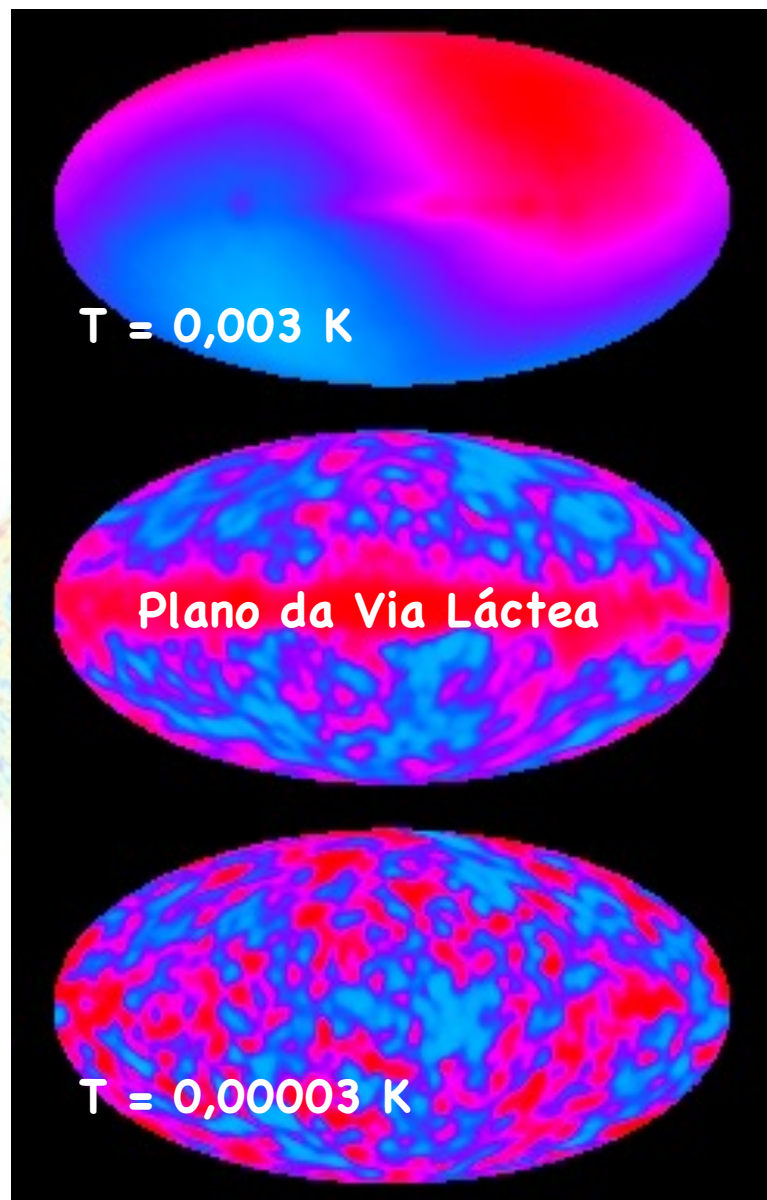
-200 μ K

200 μ K

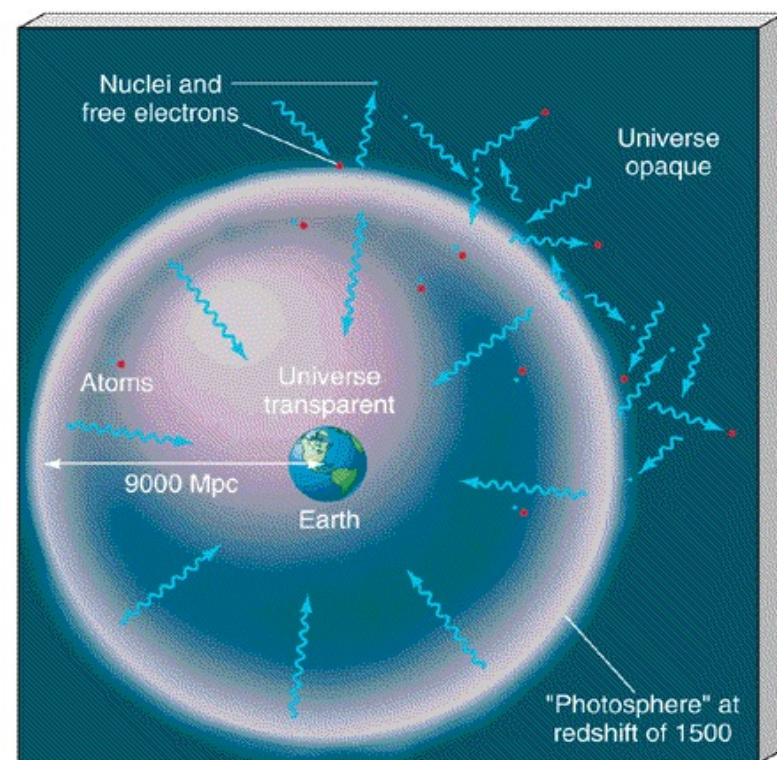
RCF - espectro de corpo negro



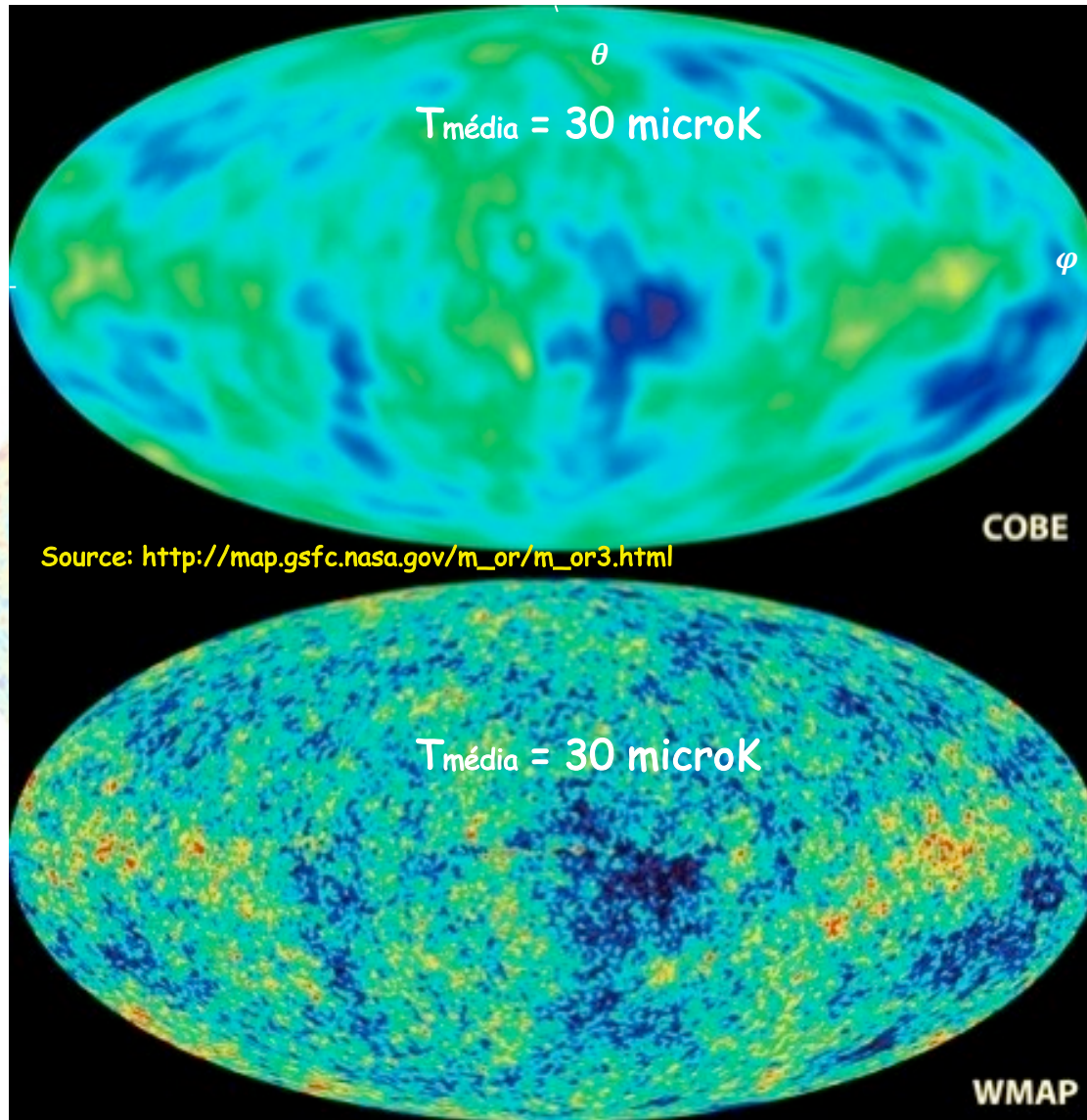
RCF - distribuição angular



- ☑ 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 -

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



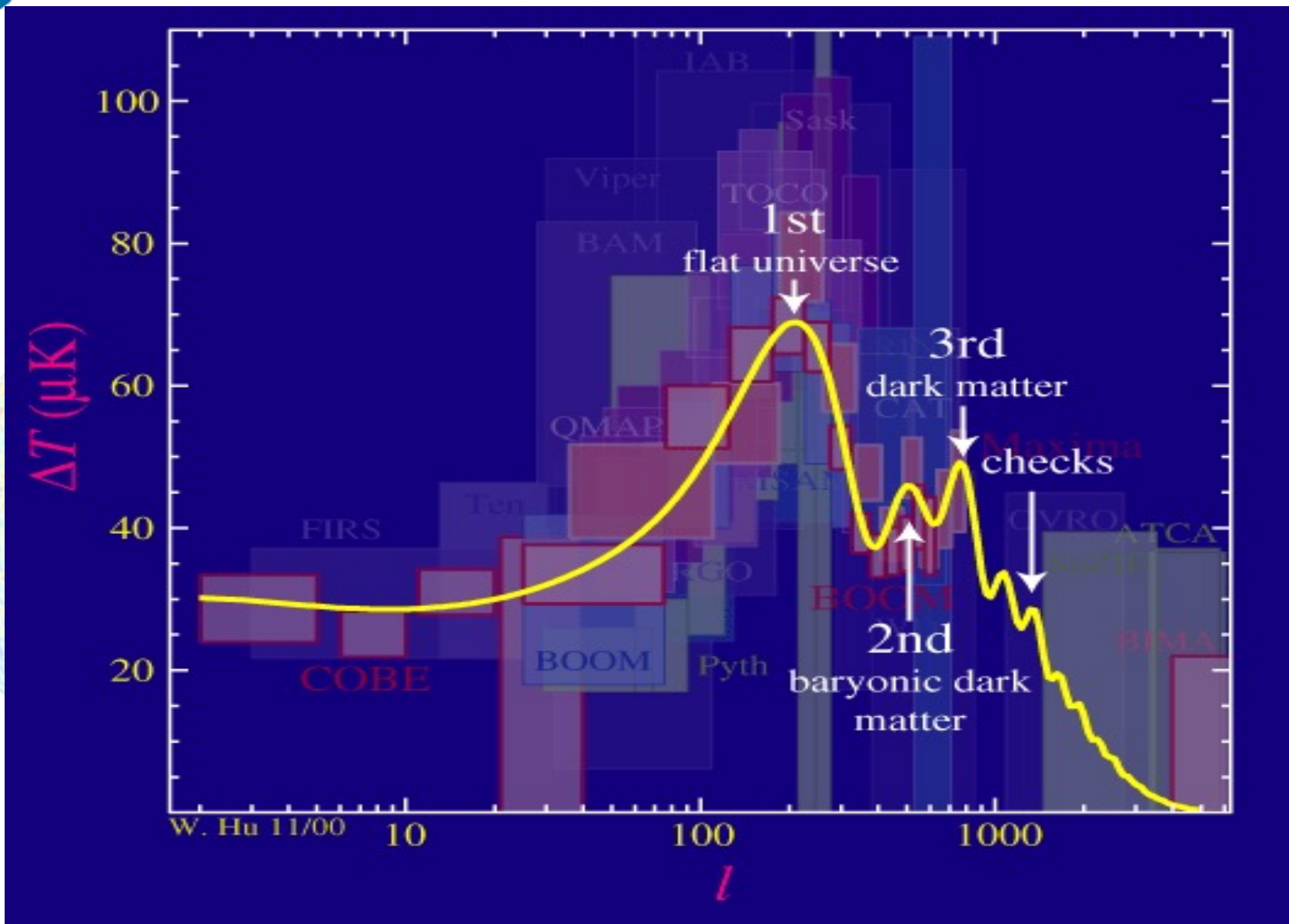
Análise do mapa \Rightarrow espectro de potência

- ☑ A posição e a altura dos picos de uma combinação dos parâmetros que descrevem nosso Universo:

Fonte: home page Wayne Hu

 - 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



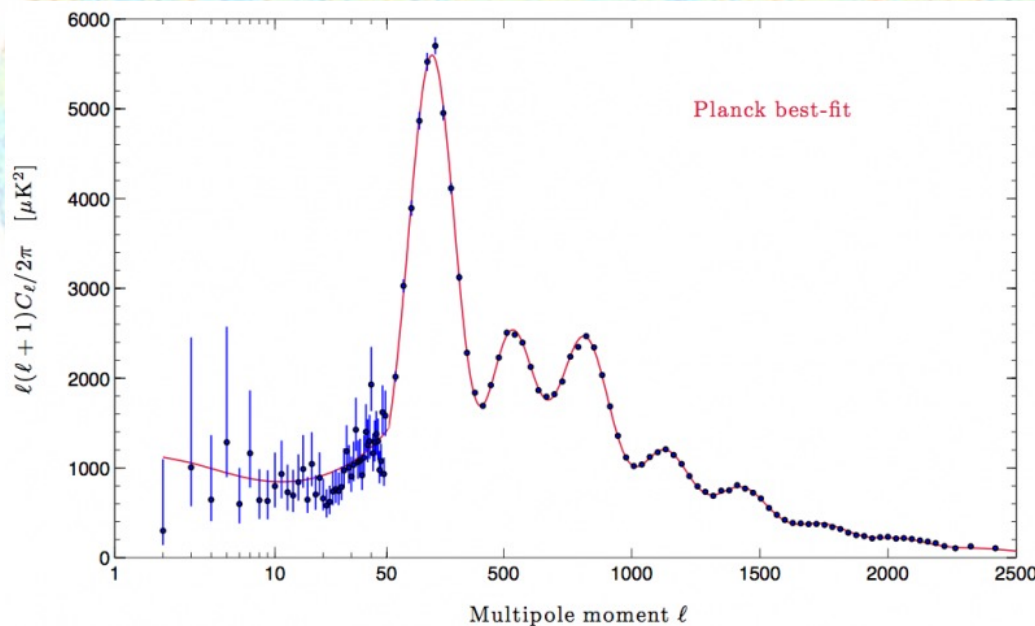


Os espectros de potência das flutuações

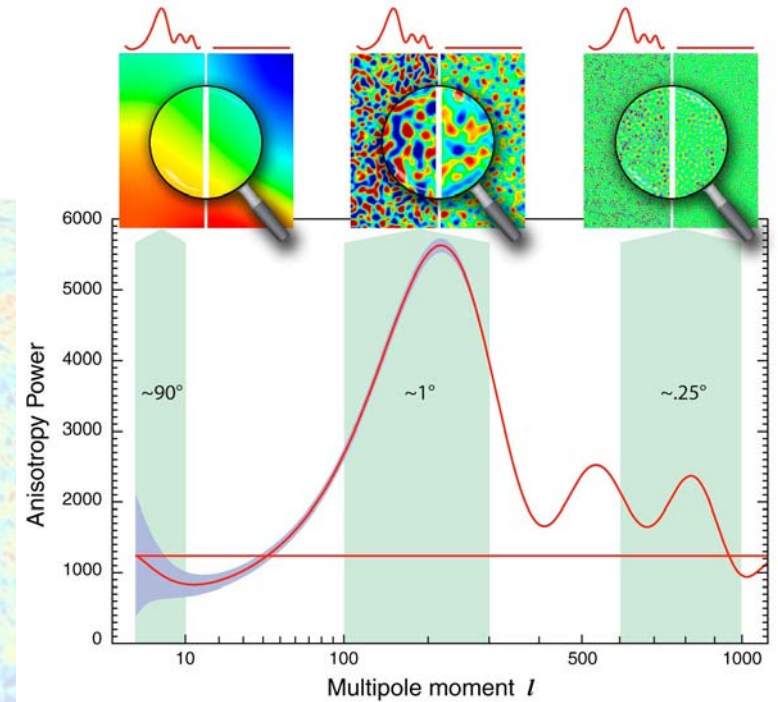
Os espectros descrevem a potência do campo de flutuações de temperatura em função da escala angular. Eles são descritos em termos da potência em cada posição

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>



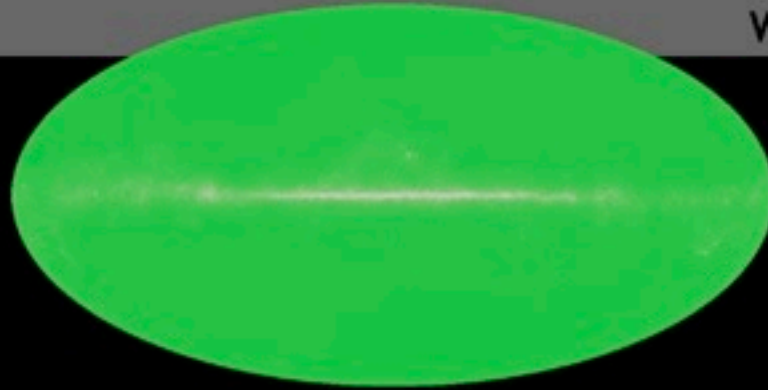
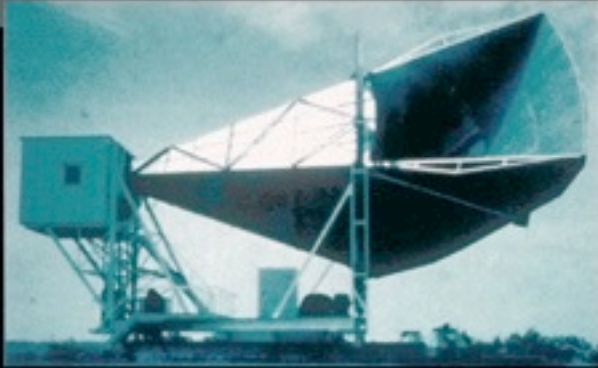
Fonte: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/>

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

1965

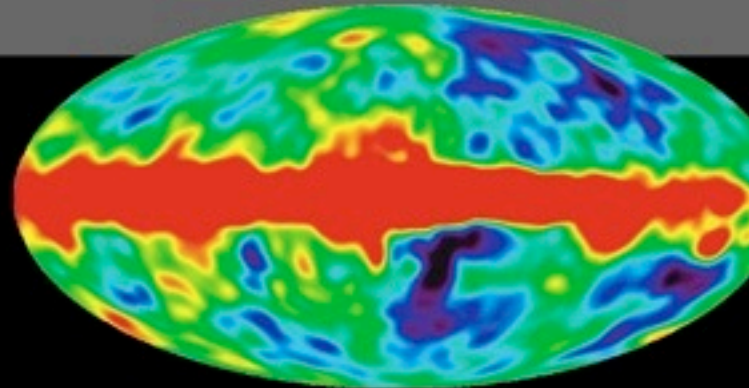
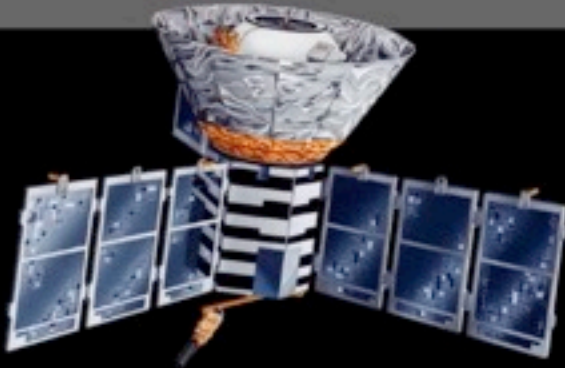
Fonte: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map>

Penzias and
Wilson

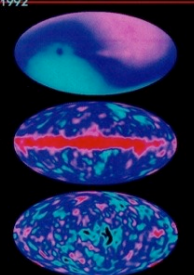


1992

COBE

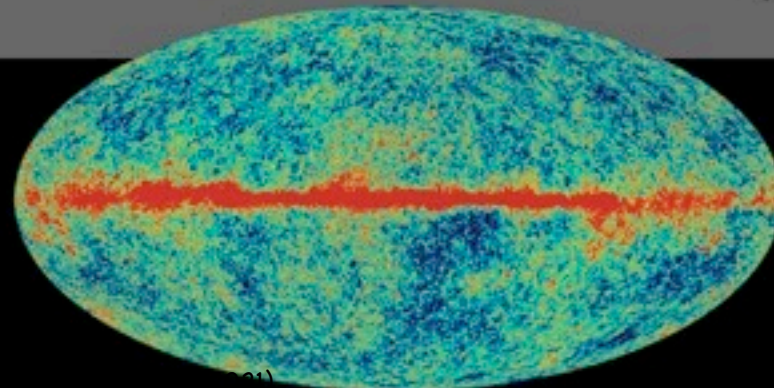
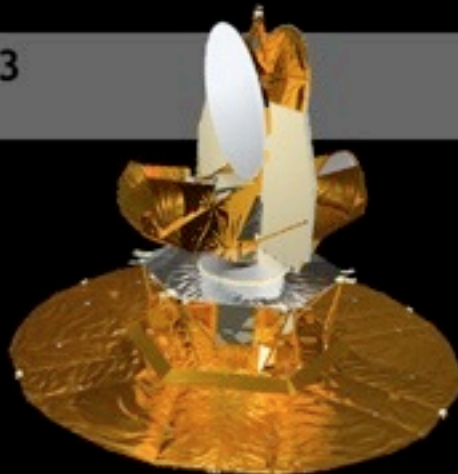


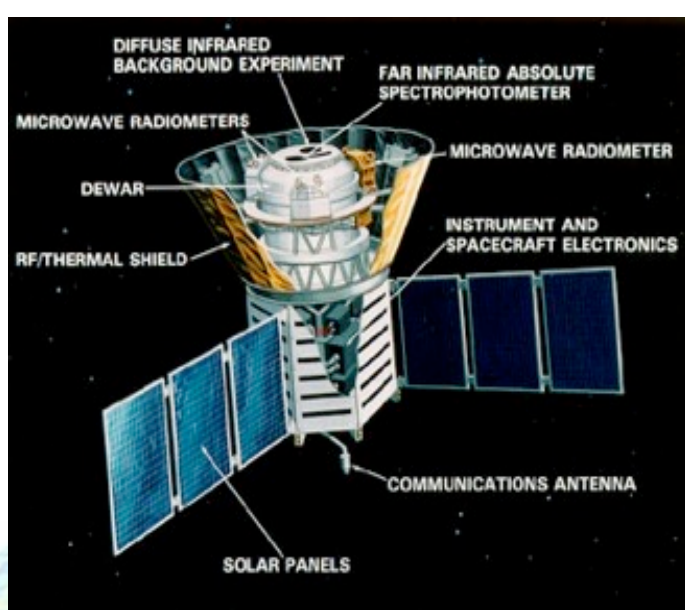
PHYSICS
TODAY
JUNE 1992



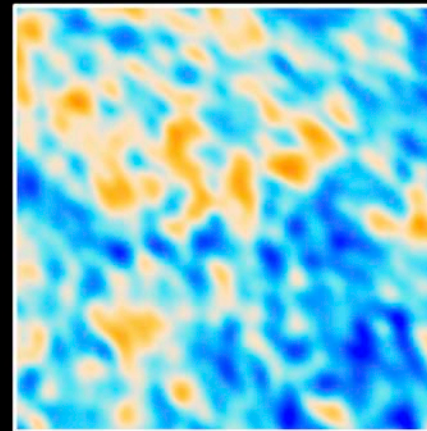
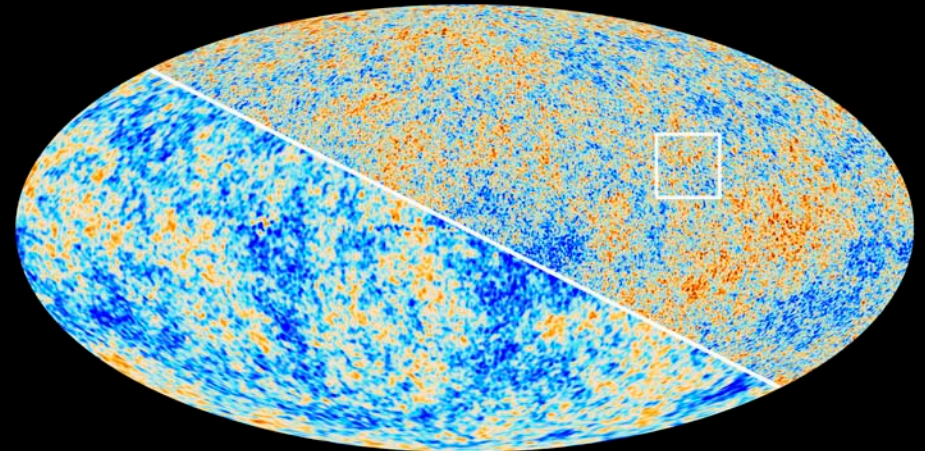
2003

WMAP

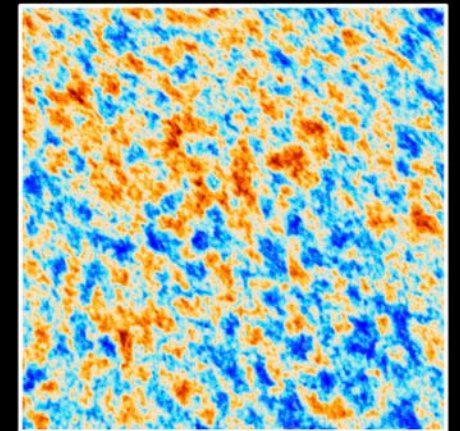




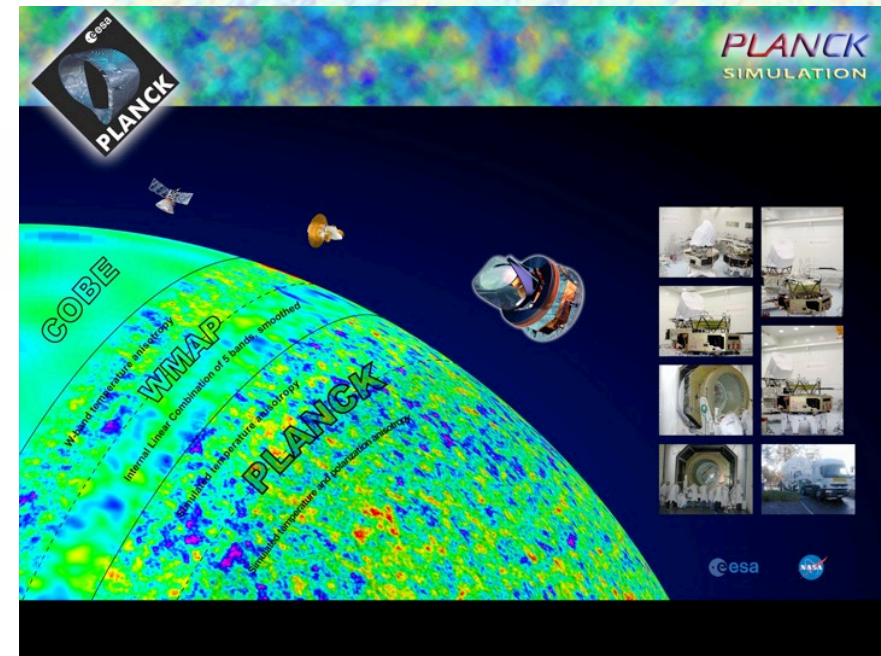
The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



WMAP

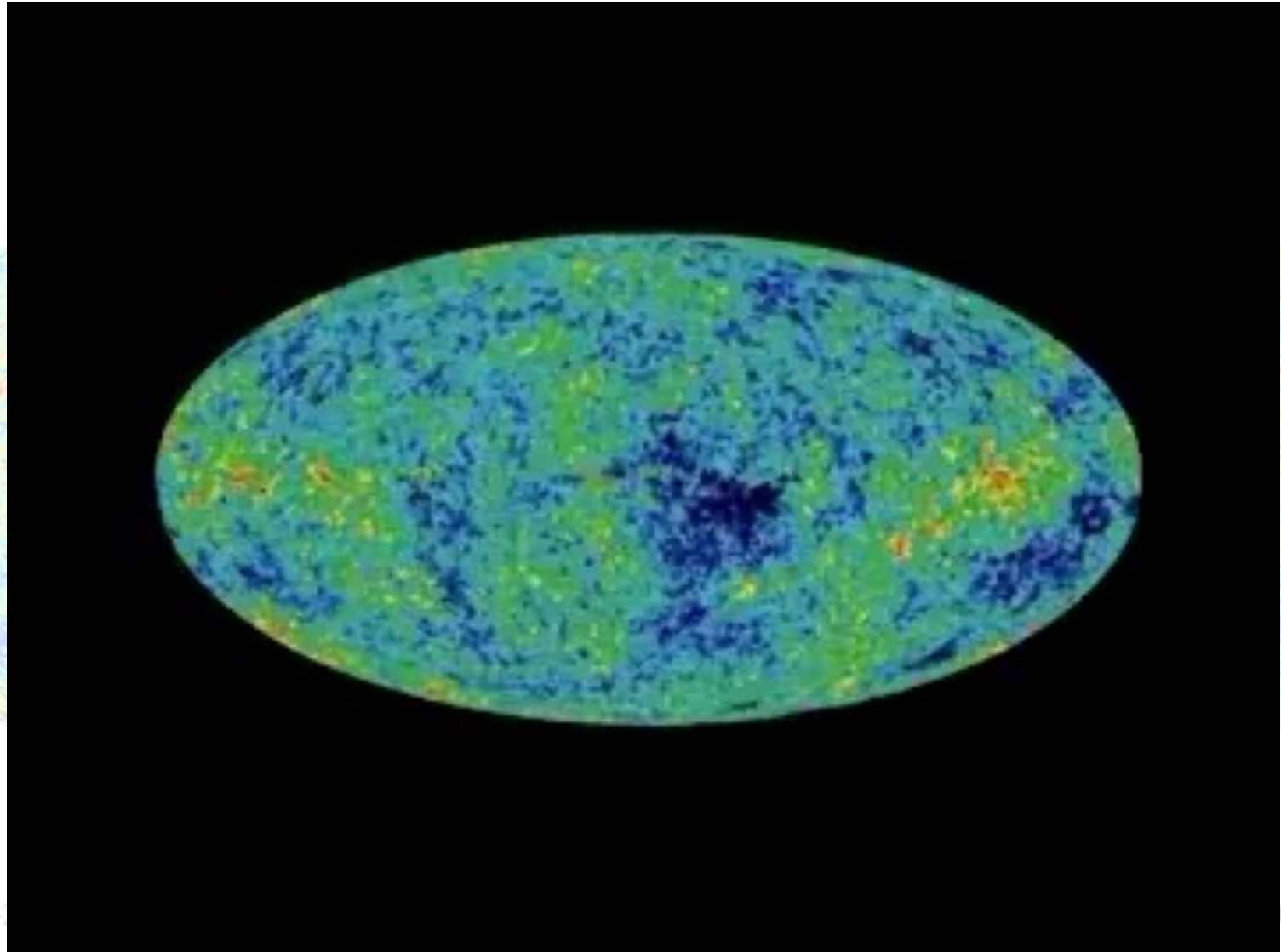


Planck





Das flutuações de temperatura à formação das galáxias...



0 μ K

A FORMAÇÃO DE ELEMENTOS LEVES (NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL)



A formação de elementos leves



Herman Alpher

Hans Bethe

George Gamov

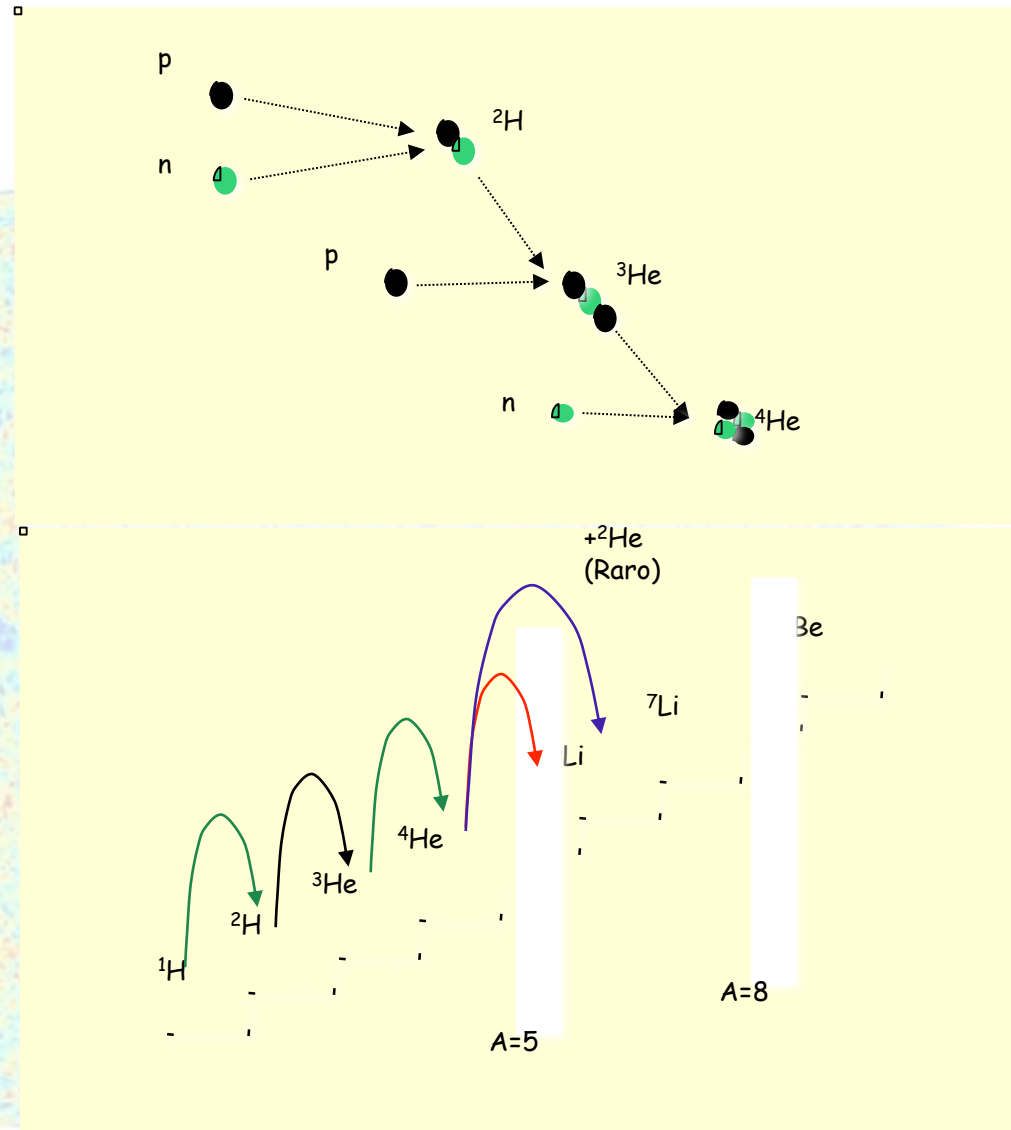
Em 1946, Alpher, Bethe e Gamov sugeriram a possibilidade de que todos os elementos químicos teriam sido gerados através de uma longa cadeia de captura de nucleons em 1 Universo primordial em expansão e que estaria esfriando-se.

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

A formação de elementos leves

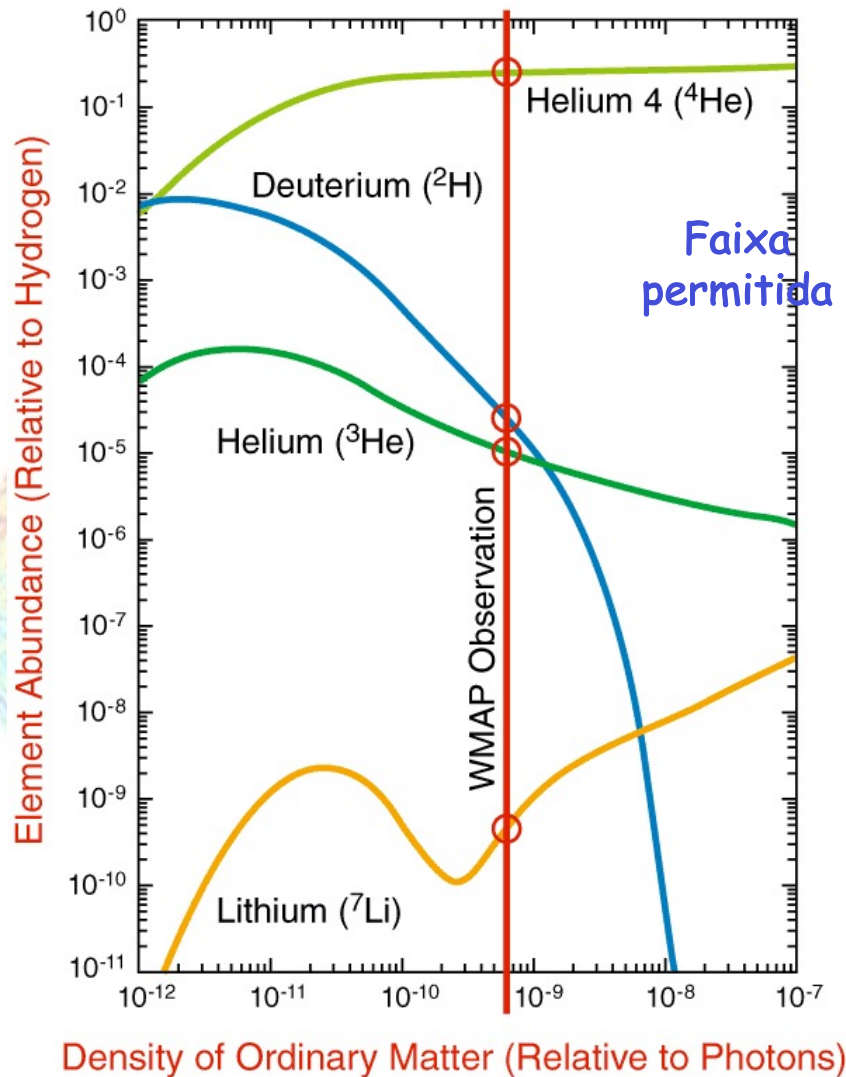
Previsões da teoria:

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

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)

H

He

□ □ □ □
C N O Ne

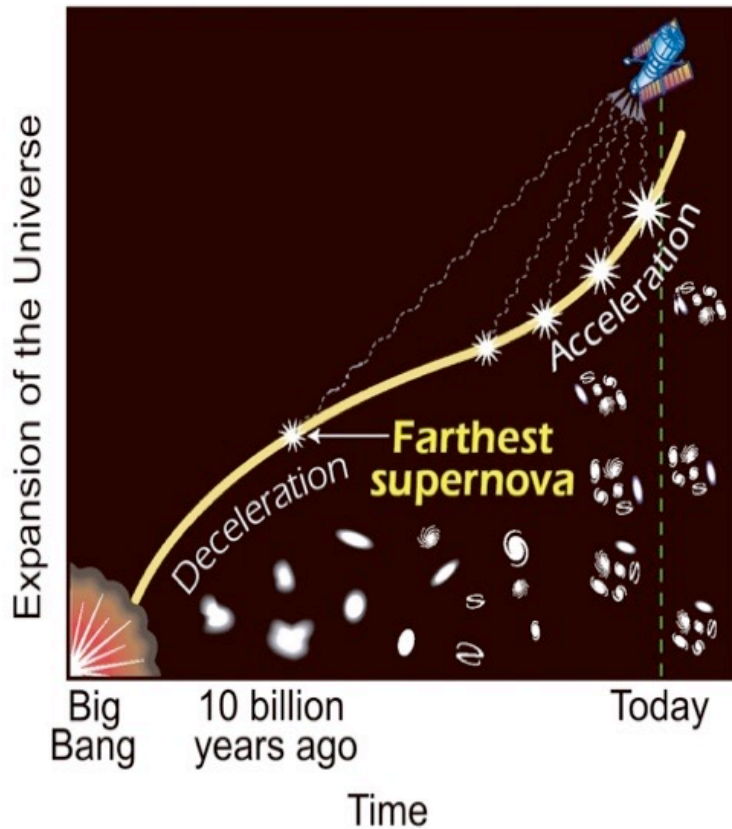
□
Mg Si S Ar

□
Fe

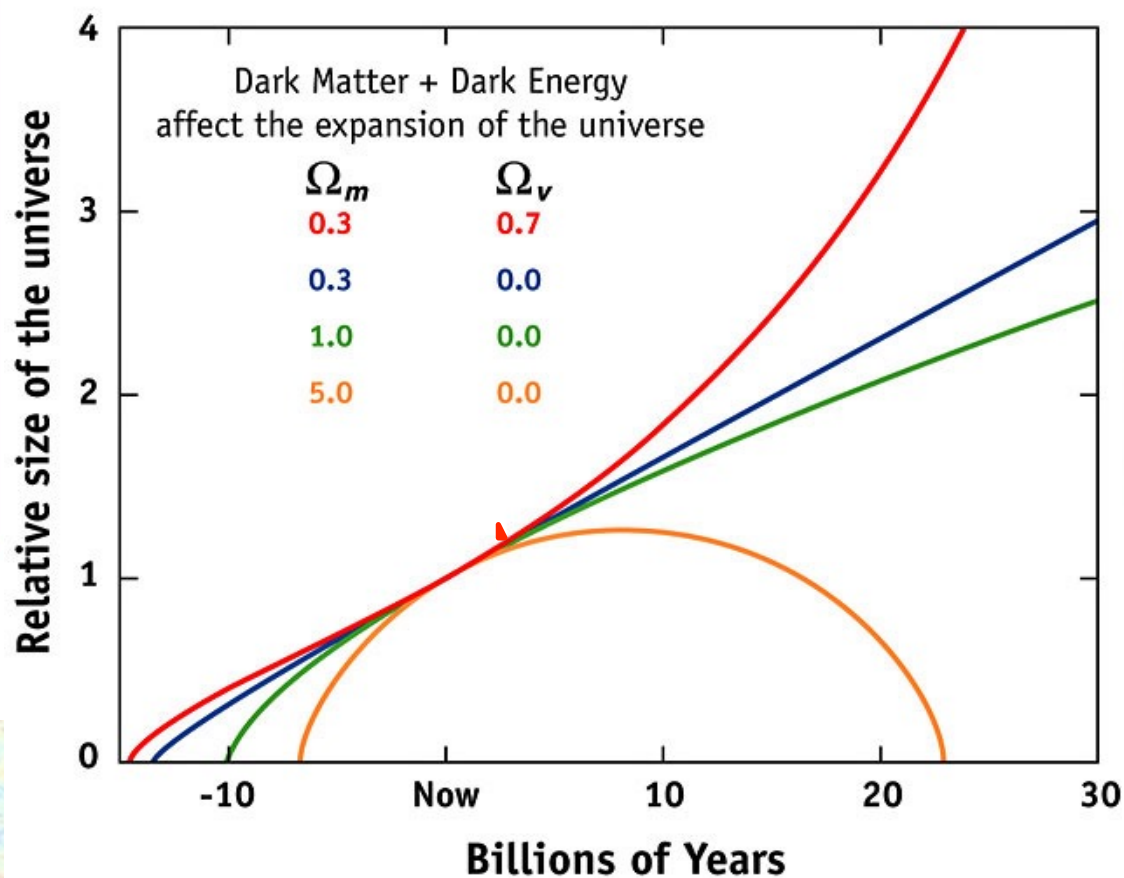
Courtesy Ben Mc Call

A ACELERAÇÃO DA EXPANSÃO





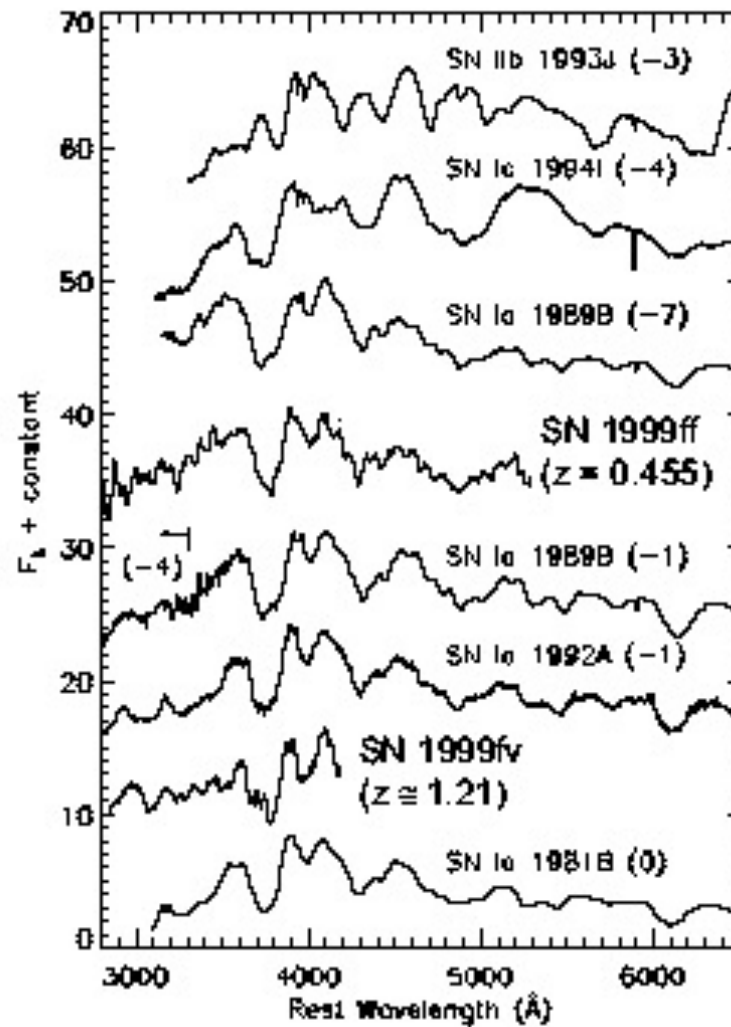
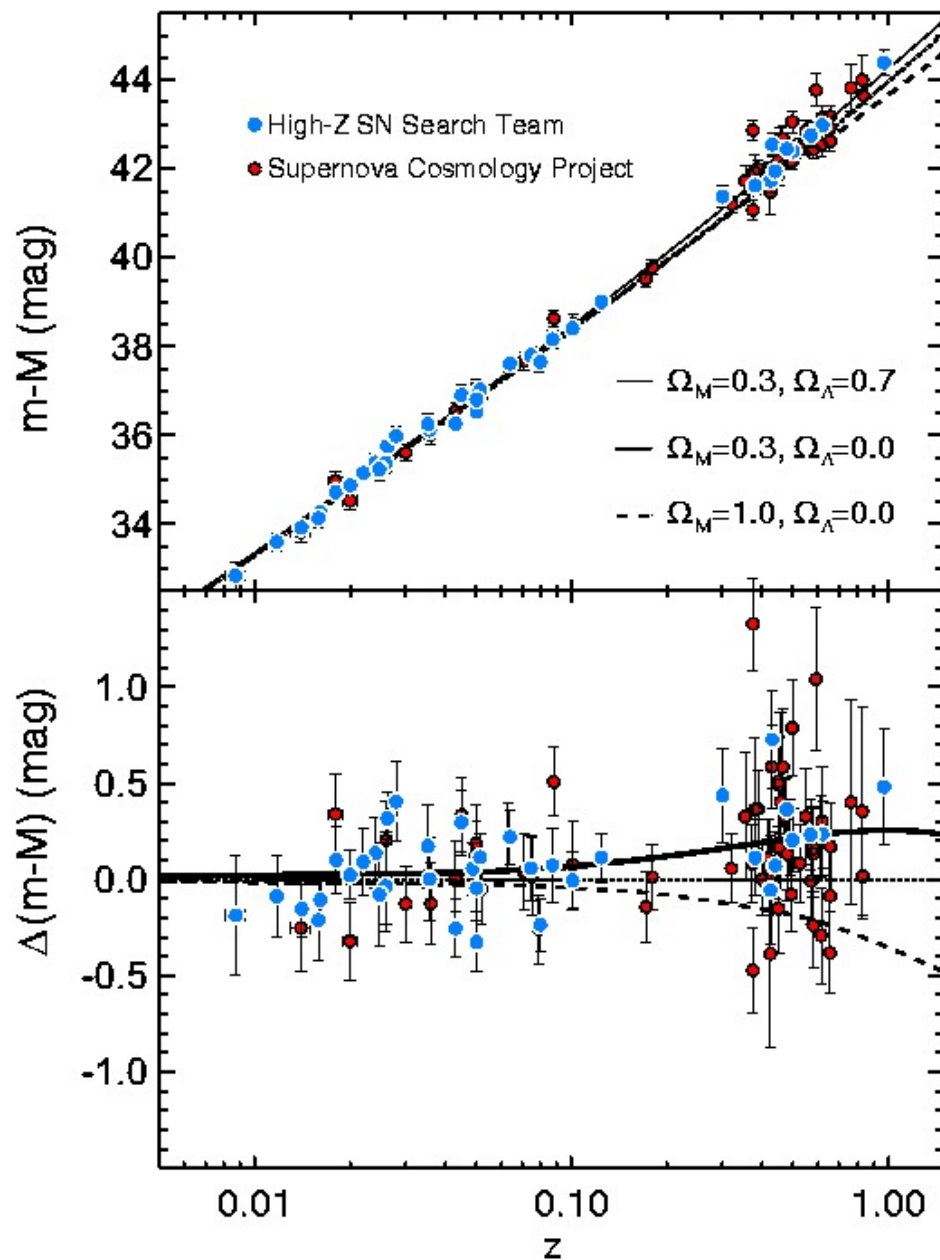
EXPANSION OF THE UNIVERSE

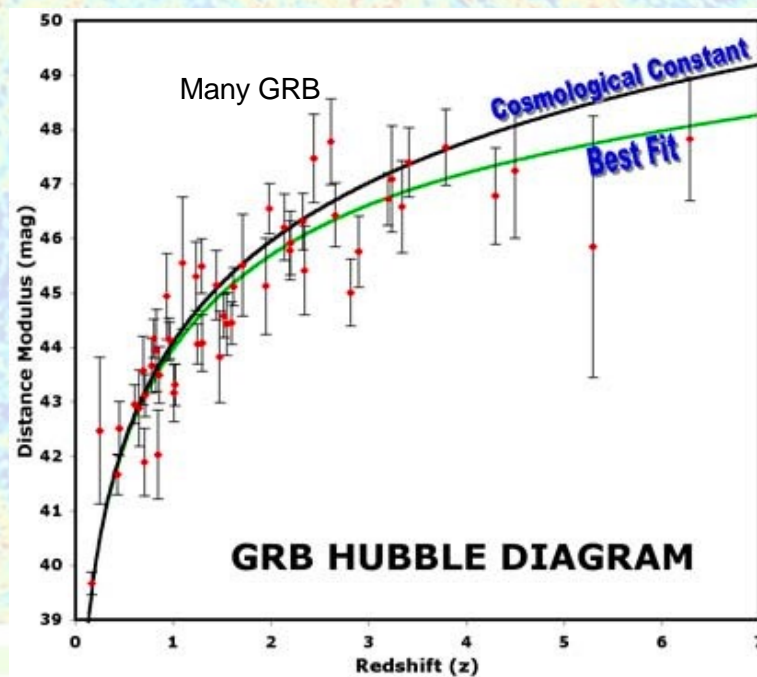
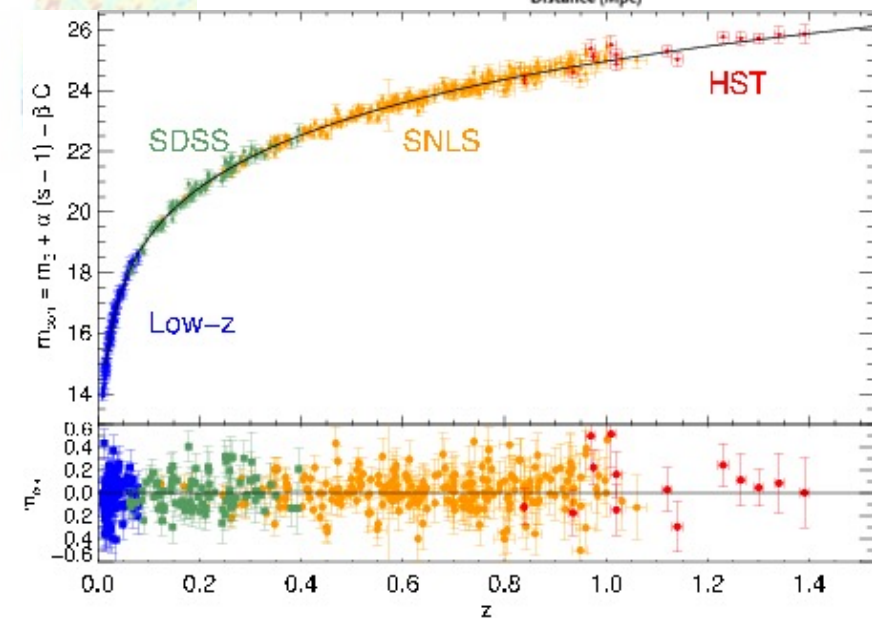
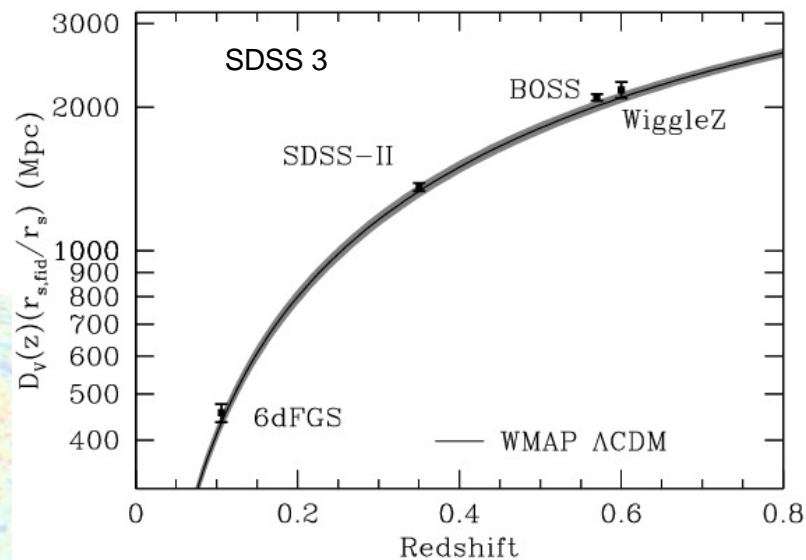
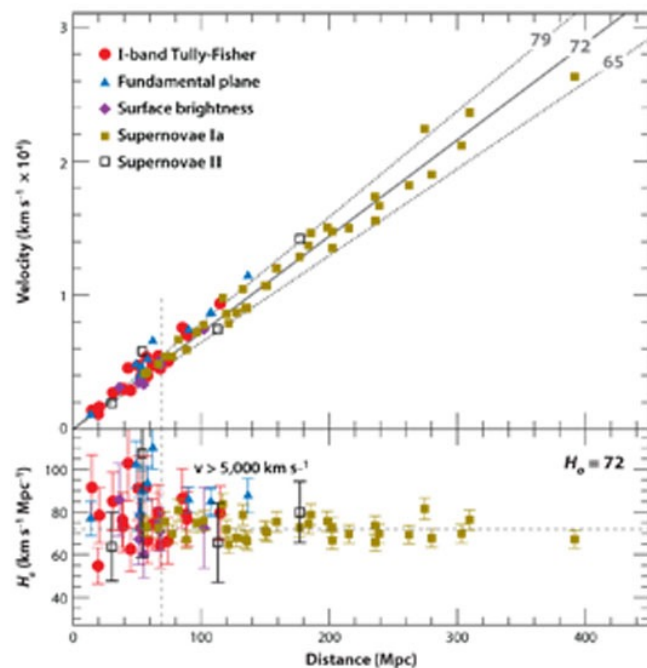


Fonte: <http://map.gsfc.nasa.gov/>

-200 μ K

200 μ K





A Cosmologia do séc. XXI

Einstein's GR

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

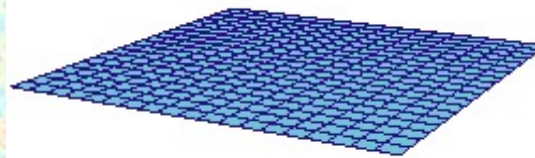
expansion

matter

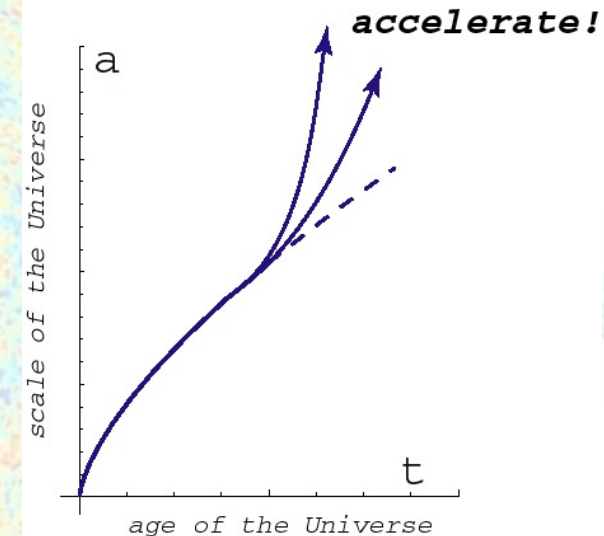
**Dark Energy:
Vacuum?
Quintessence?**

Geometry

flat!



Cosmology



Fonte: Robert Caldwell (Dartmouth College)



Resumindo: o Modelo Cosmológico Padrão (MCP) é:

- ☑ Um universo descrito pelas eqs. de Einstein-Friedmann-Lemaître
- ☑ 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

