



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Cosmologia Observacional Charla II

Carlos Alexandre Wuensche
Divisão de Astrofísica - INPE

III Curso Boliviano de Astrofísica y Cosmologia
La Paz, Setiembre 2005



Os fundamentos teóricos

- O modelo cosmológico padrão

- A base matemática

- O suporte das observações

- Além do modelo padrão

- Inflação

- A história térmica do Universo

- Formação de estruturas



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.



A. A. 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.

BIG BANG

What Powered the Big Bang?

Gravitational Waves can Escape from
Earliest Moments of the Big Bang

Big Bang plus
 10^{-43} Seconds

Inflation
(Big Bang plus 10^{-35} seconds?)

Big Bang plus
300,000 Years

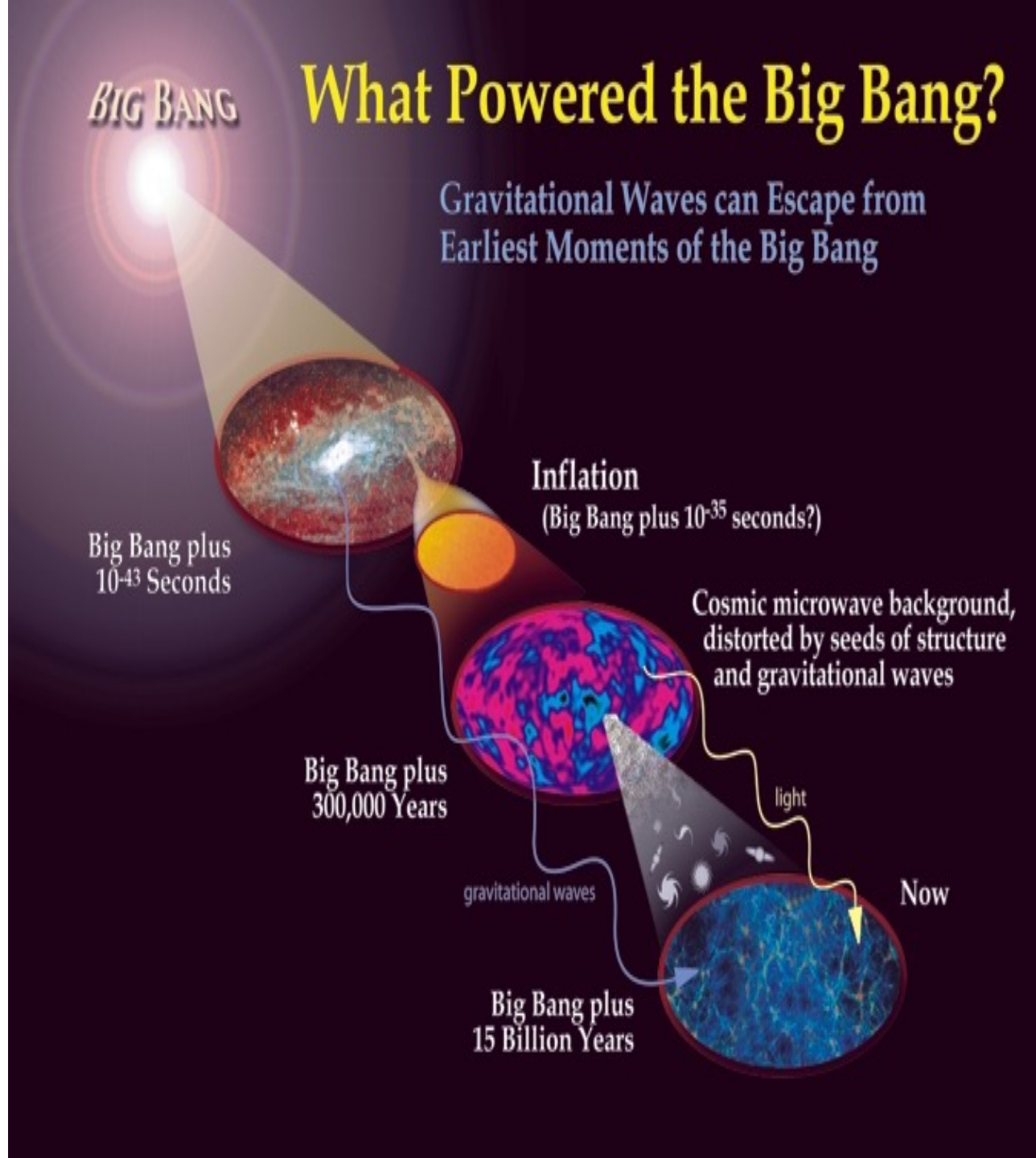
Cosmic microwave background,
distorted by seeds of structure
and gravitational waves

gravitational waves

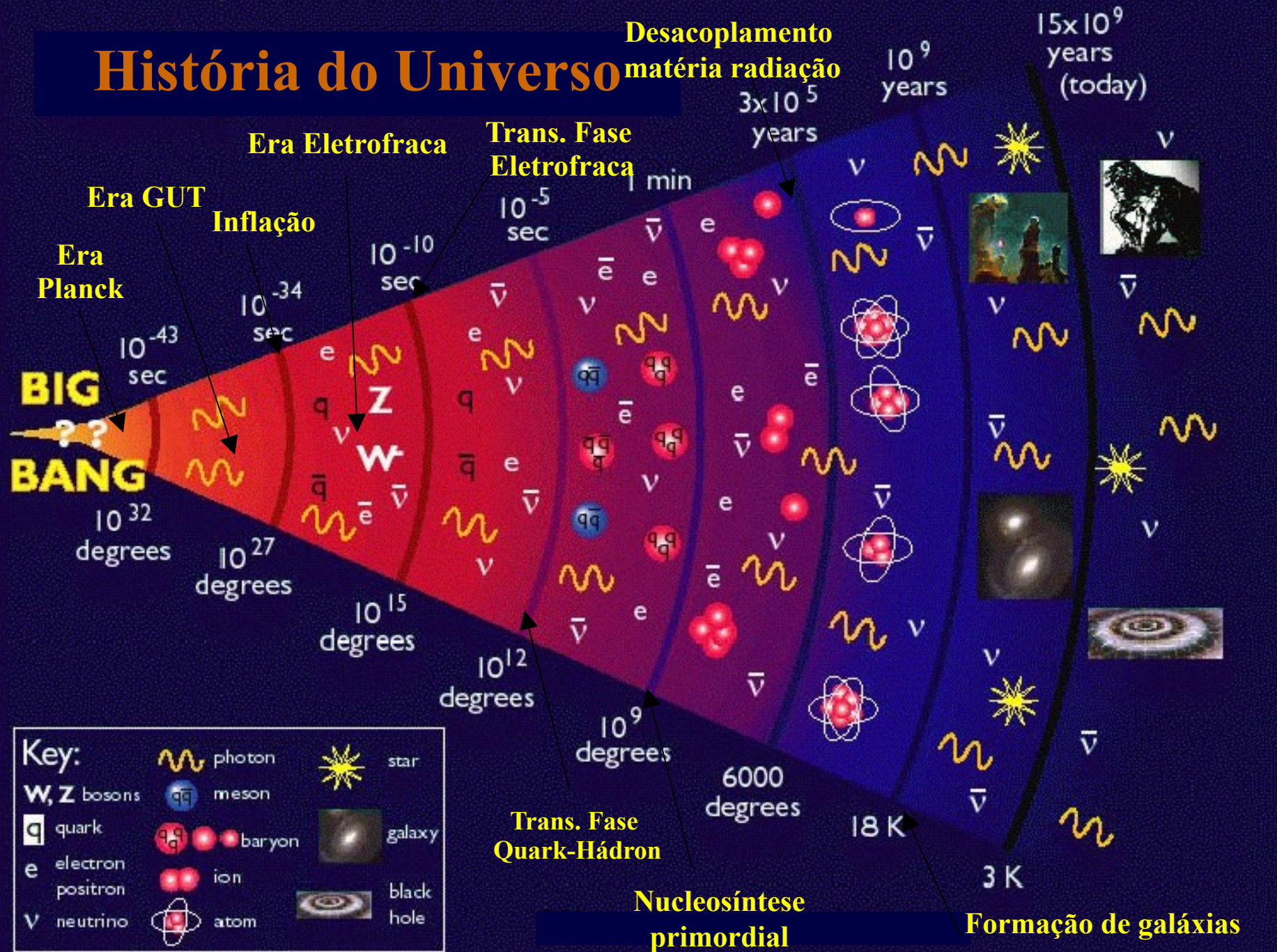
light

Big Bang plus
15 Billion Years

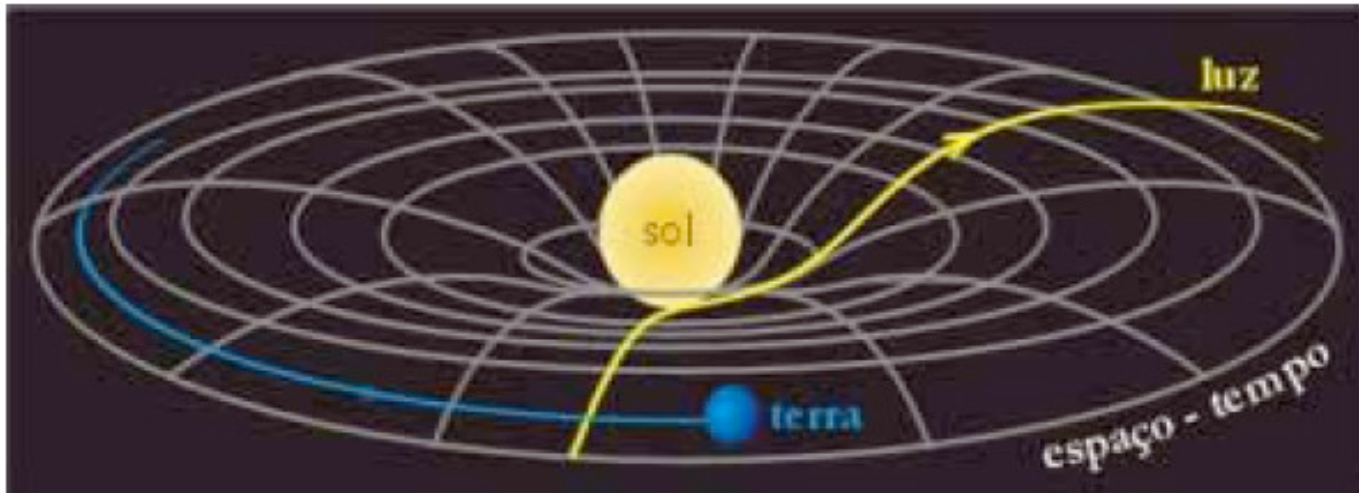
Now



História do Universo



As equações do MCP



Para a Relatividade Geral, objetos se movem livremente sobre a superfície do espaço-tempo, que tem sua geometria determinada pela massa do Universo.

espaço-tempo maximamente simétrico).

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

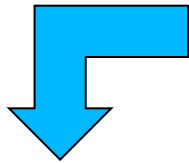
Fator de escala, define a expansão do Universo

Coordenadas esféricas, com o termo de curvatura k

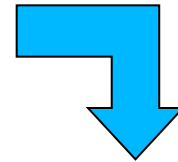


As equações do MCP

• Equações de Einstein-Friedmann



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



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

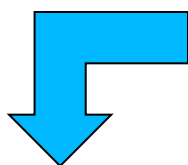
Termo de fontes, descreve os causadores da mudança dinâmica do Universo (equivalente à energia potencial gravitacional).

ρ - densidade de matéria
 κ - curvatura
 Λ - "constante cosmológica"
 G - constante gravitacional
 a - fator de escala

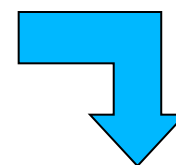


As equações do MCP

• Equações de Einstein-Friedmann



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



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)

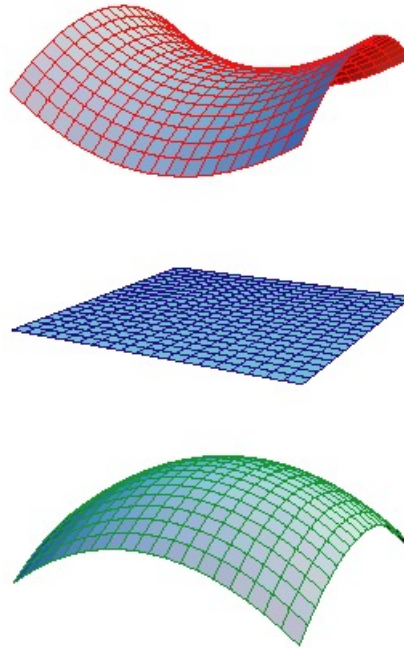
$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m - \rho_k$$

expansão

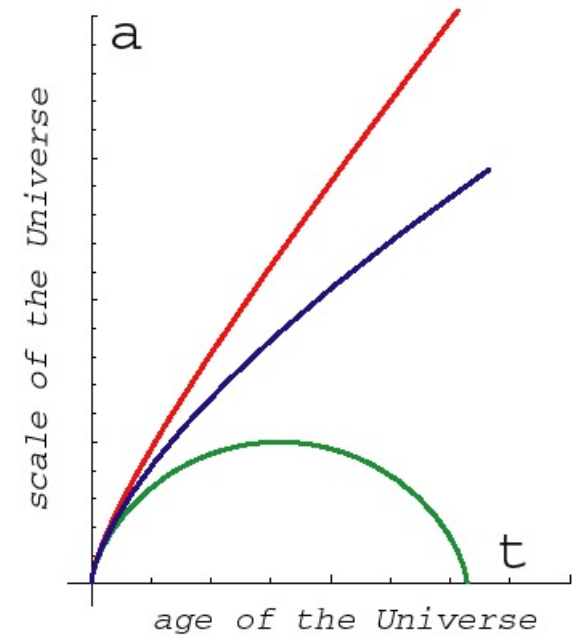
matéria

curvatura

Geometria



Cosmologia





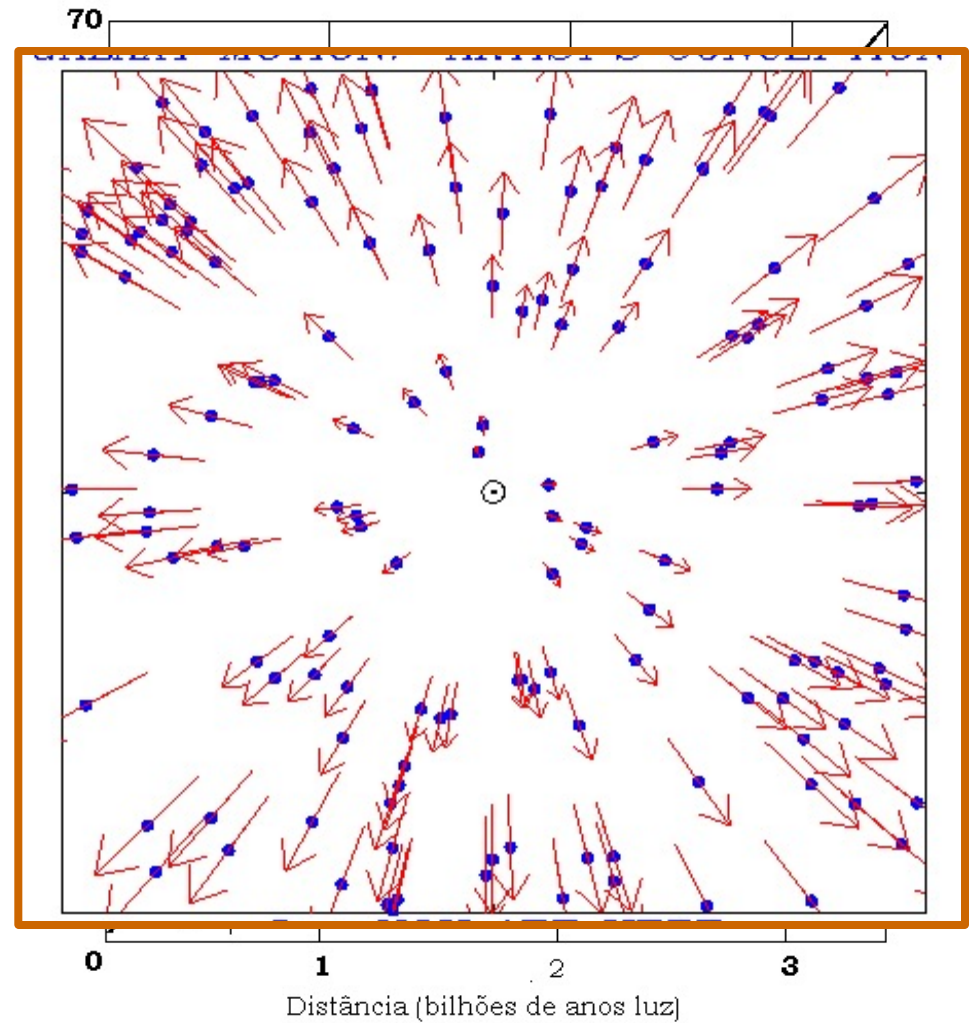
O suporte observacional do MCP

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

A expansão do Universo



Hubble



Hubble - 1929

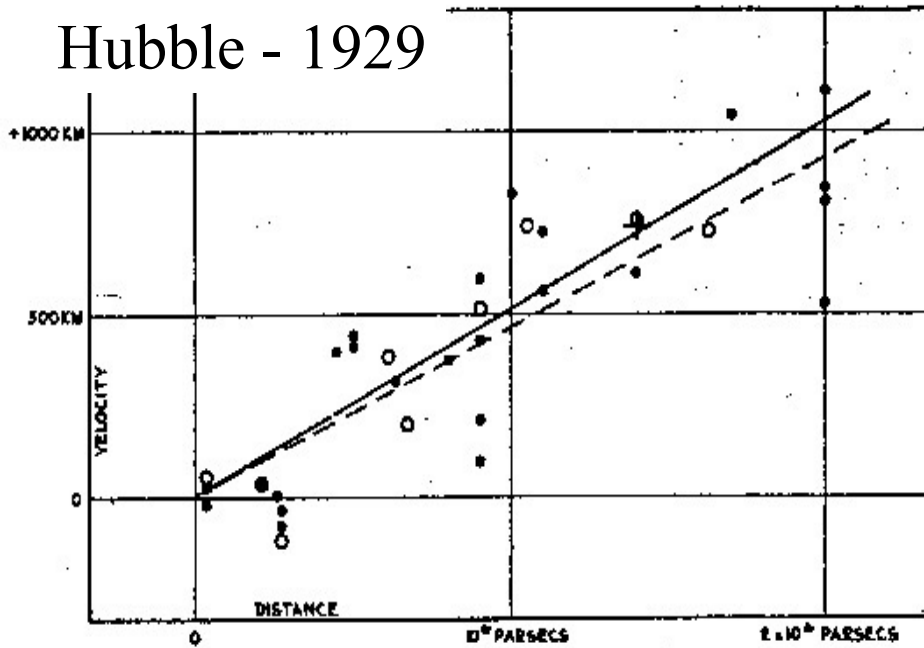
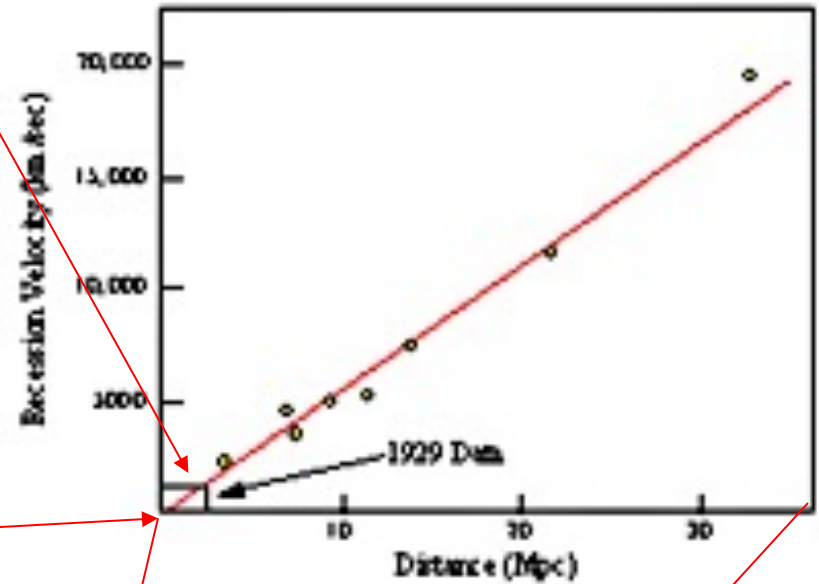
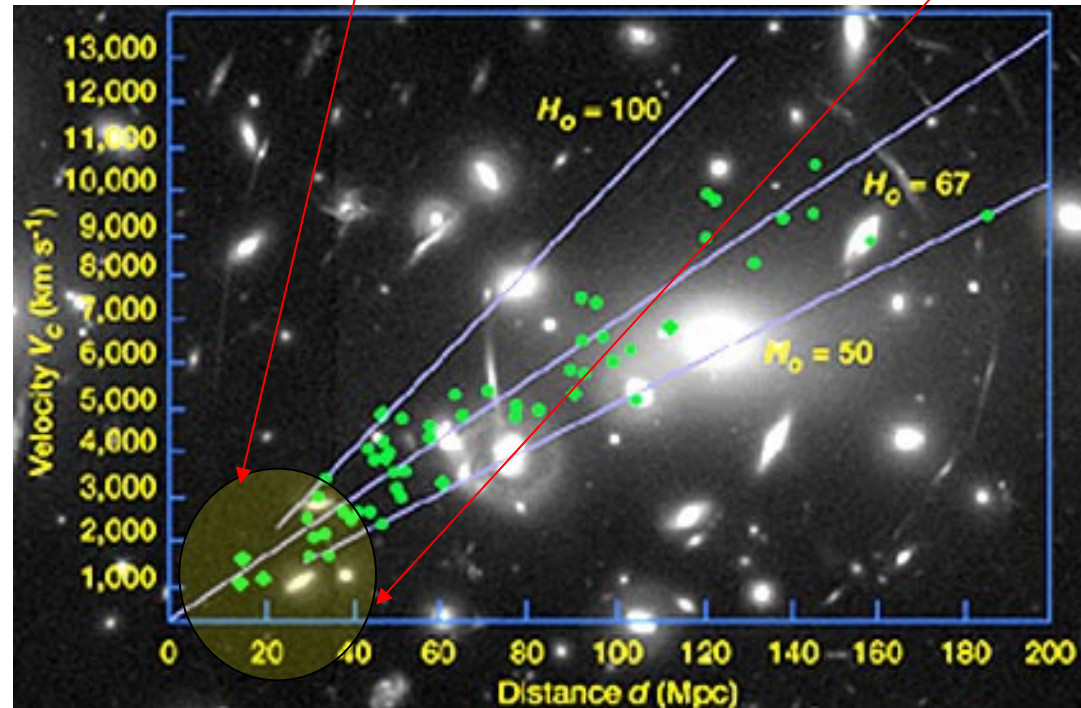


FIGURE 1

Hubble & Humason (1931)

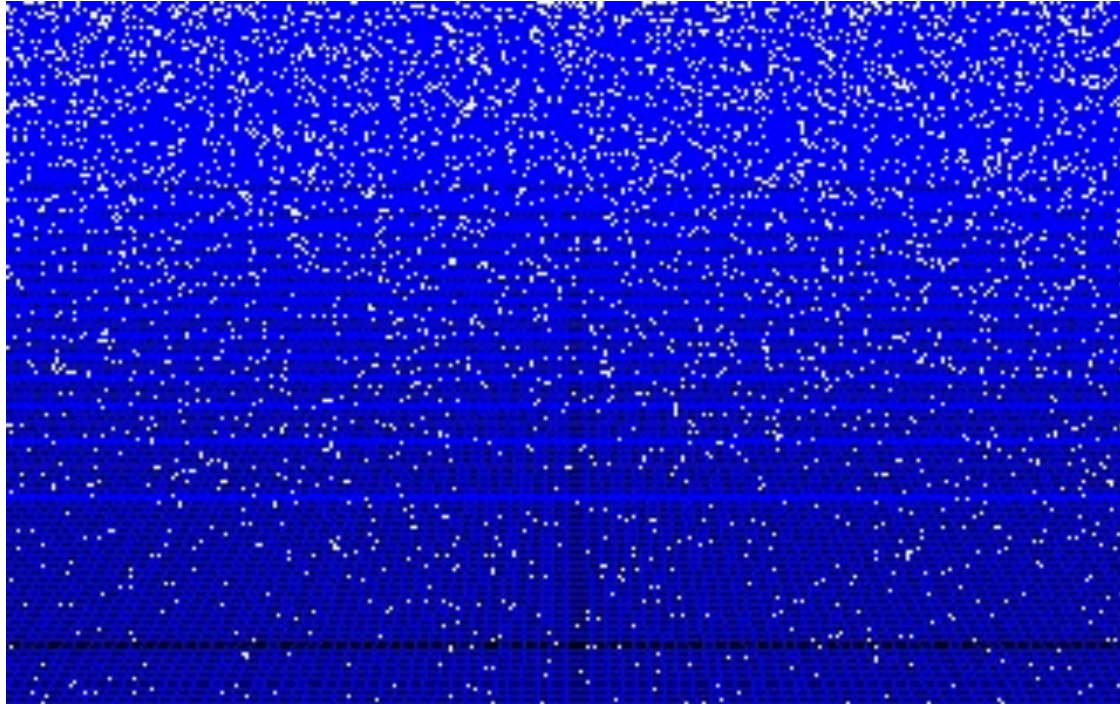


Cepheid Key Project - 2003

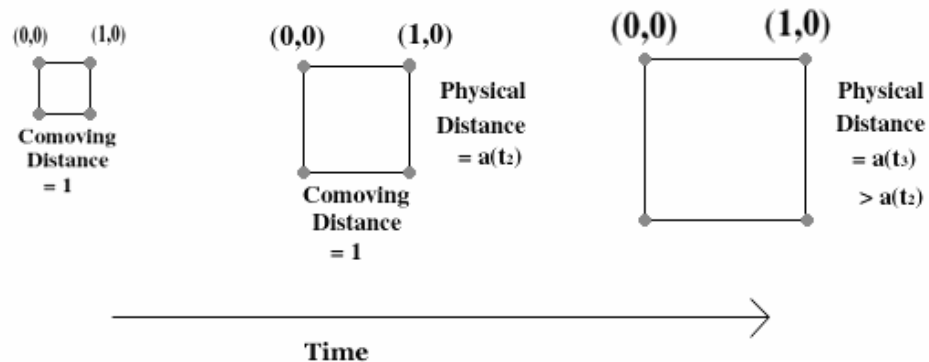




Expansão: fator de escala cresce com o tempo



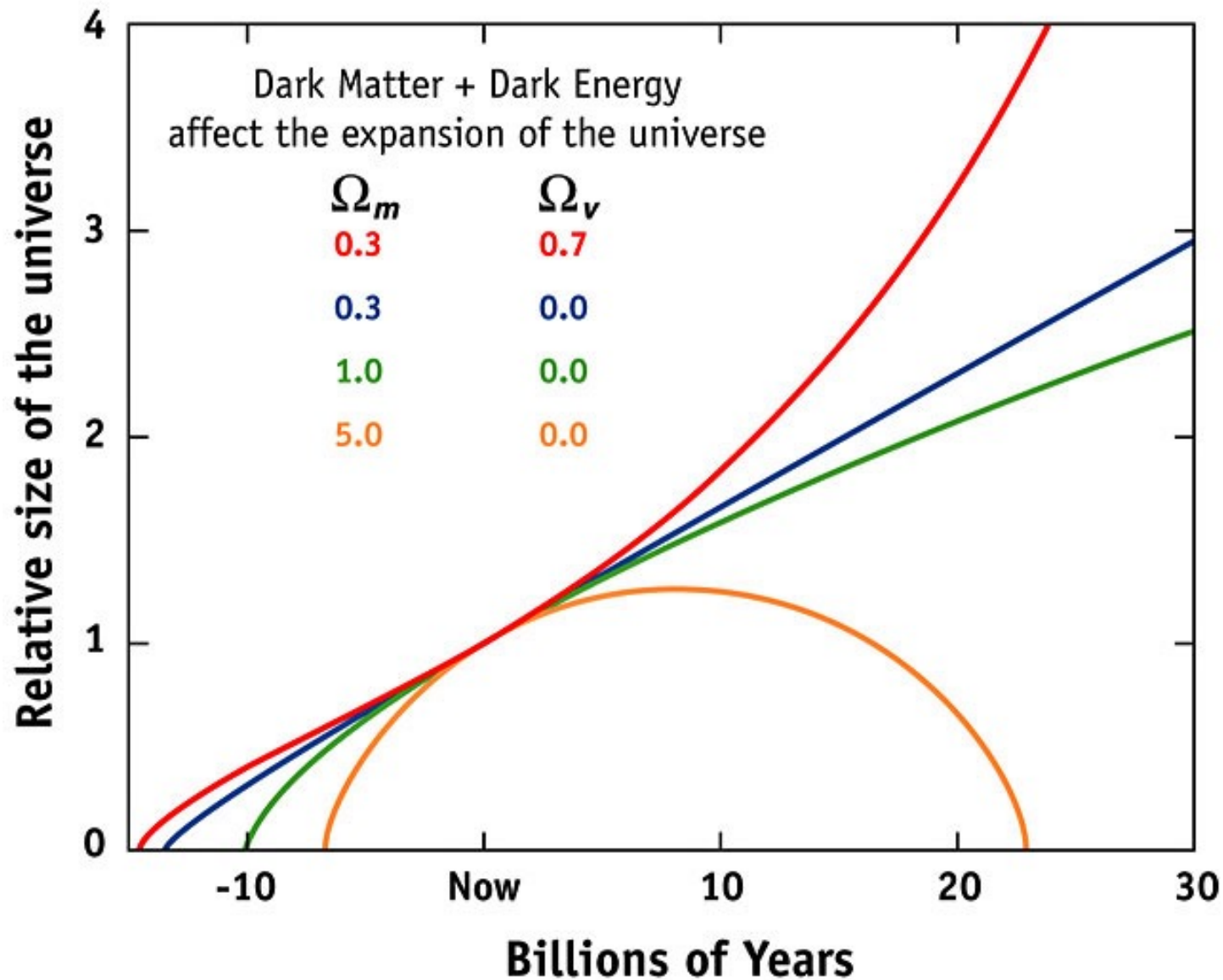
Lei de Hubble: $v \approx H_0 D$



Cortesia de Scott Dodelson (Univ. Chicago)



EXPANSION OF THE UNIVERSE

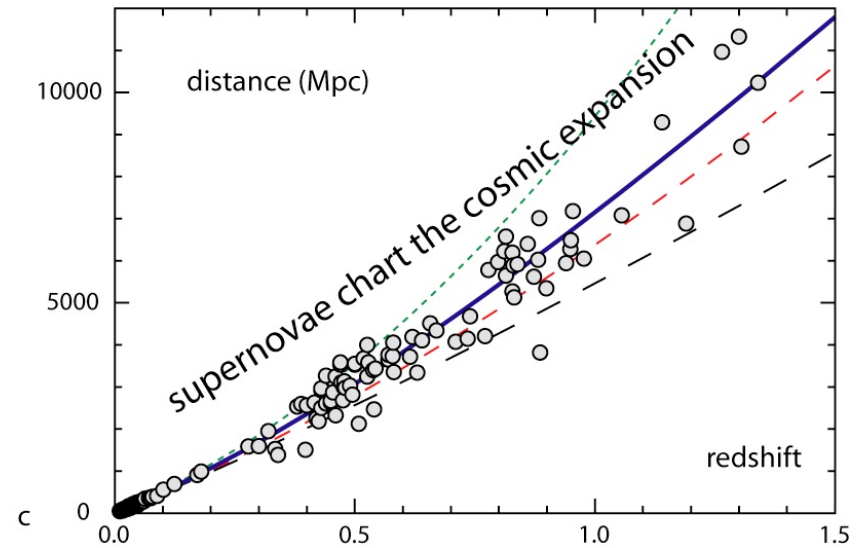
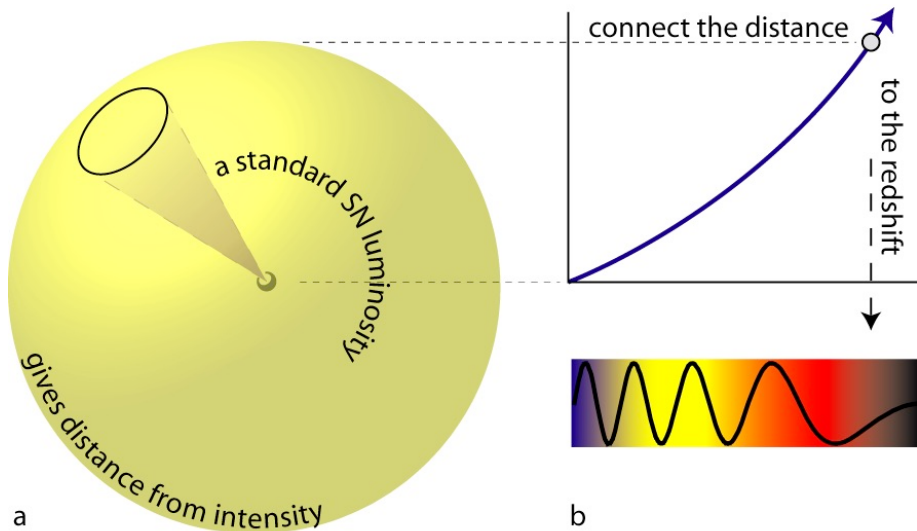




A aceleração da expansão

Observações de Supernovas tipo I indicam que nosso Universo está acelerando

Caldwell, Physics World, May 2005 - data: Riess et al, ApJ 607 (2004) 665



$$d_L = (1 + z) \sin \left(\sqrt{k} \int dz / H(z) \right) / \sqrt{k}$$

$$m = 5 \log_{10} H_0 d_L + \mathcal{M}$$

Cenário básico

Universo plano (RW)

Aceleração devida a Λ :

$$\Omega_\Lambda \approx 0.7$$



Revolução na Cosmologia

Relatividade Geral
(Einstein)

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

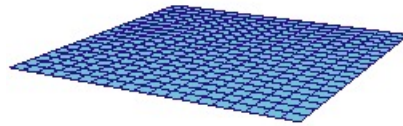
expansão

matéria

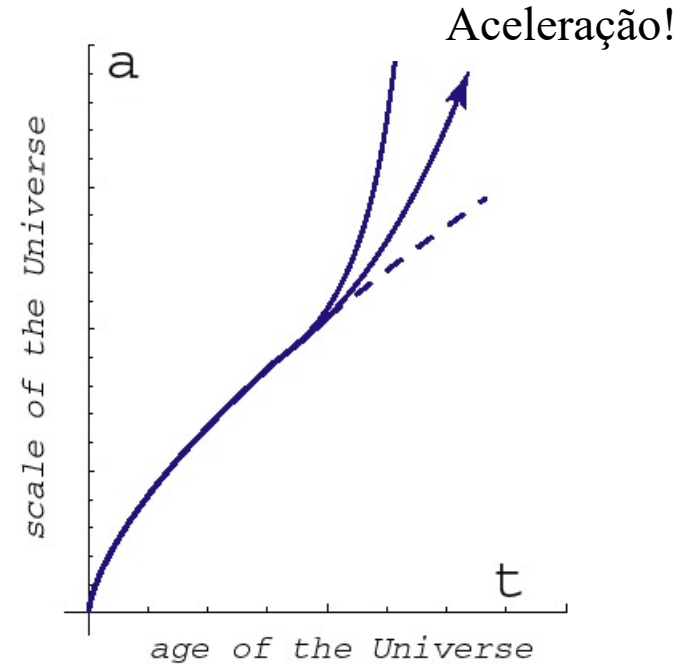
Energia escura:
Vácuo?
Quintessência?

Geometria

Plana



Cosmologia





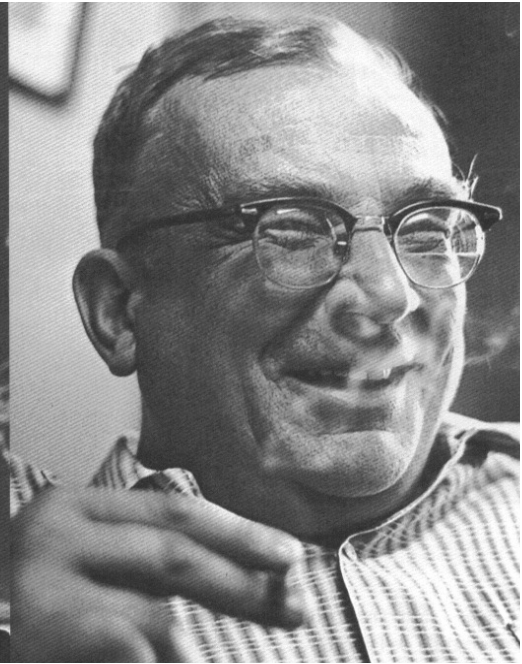
A formação de elementos leves



Alpher



Bethe



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.

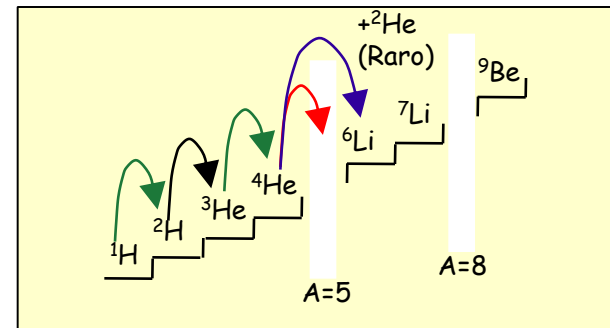
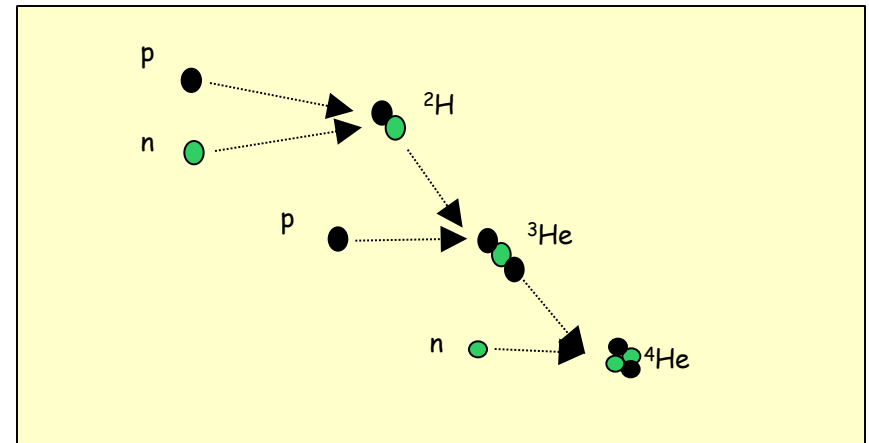


A formação de elementos leves

Nucleosíntese Primordial

Previsões da teoria:

- Forma, essencialmente, Hidrogênio & ^4He
- 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.



Previsões baseadas em física bem conhecida

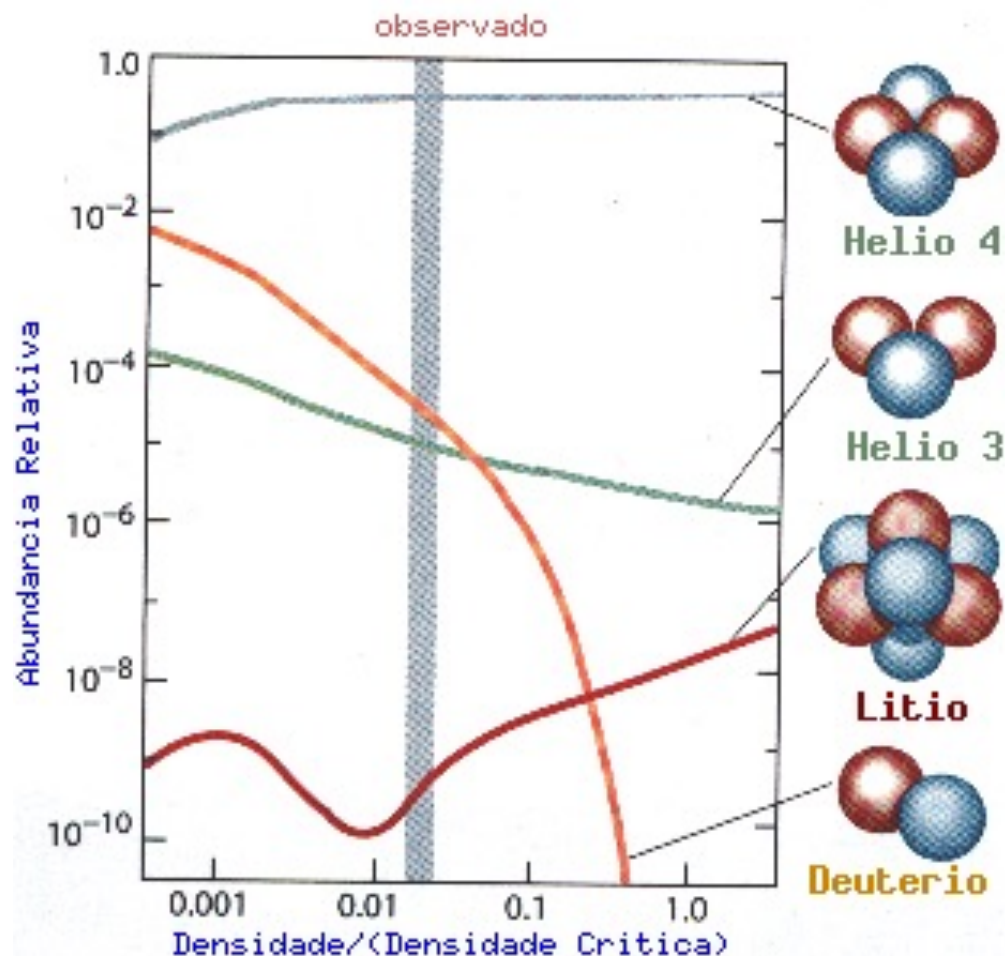


A formação de elementos leves

Nucleosíntese Primordial

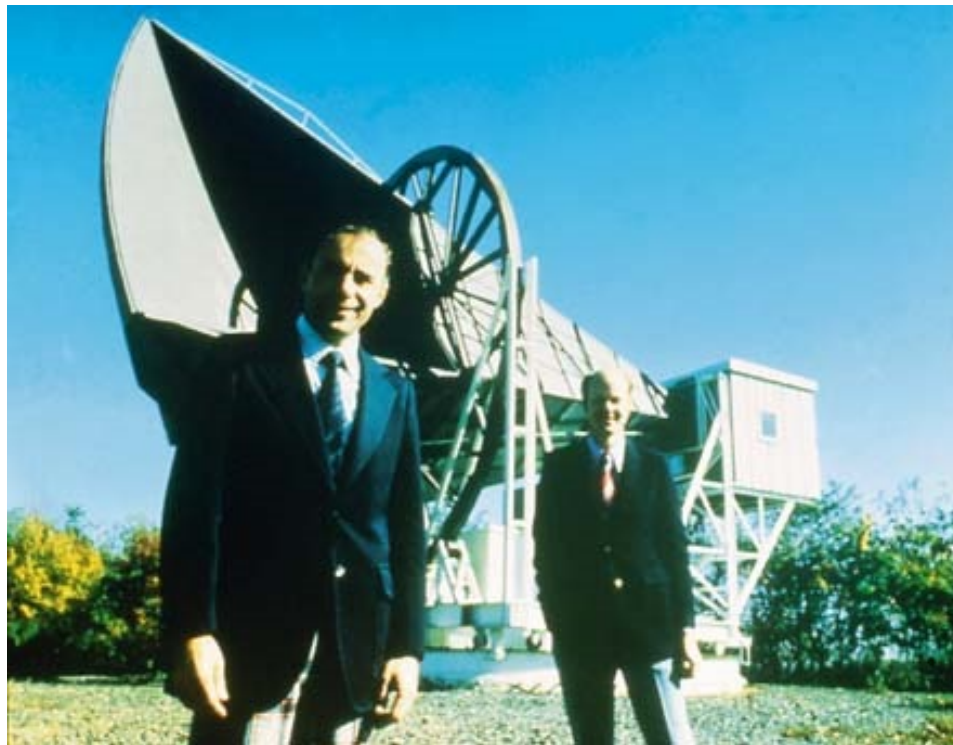
Observações em excelente acordo com as previsões teóricas.

Suporte ao modelo padrão da Cosmologia





A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCF)



A. Penzias e R. Wilson

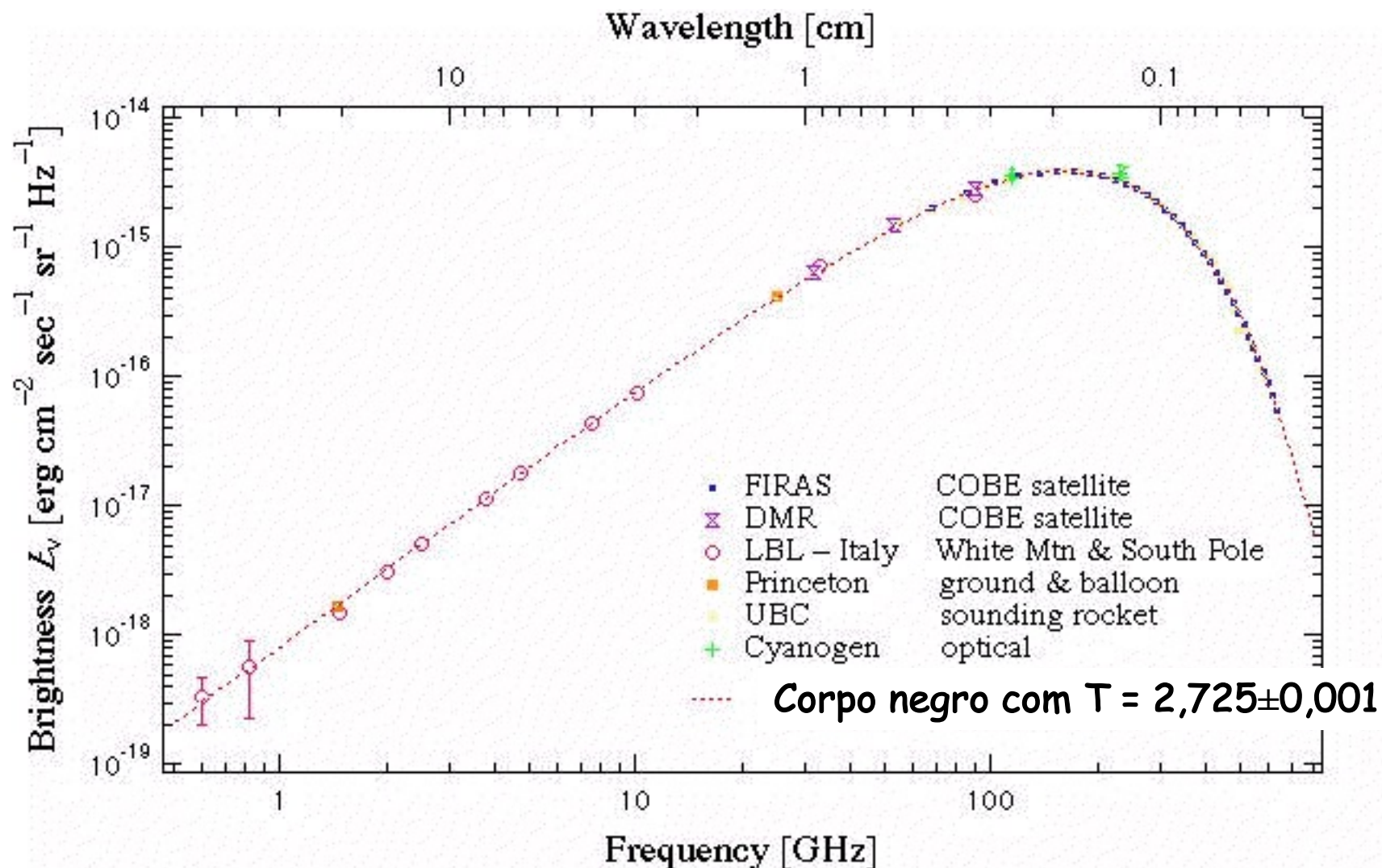


COBE (1989 - 1994)

Observamos seu espectro, distribuição angular e polarização.

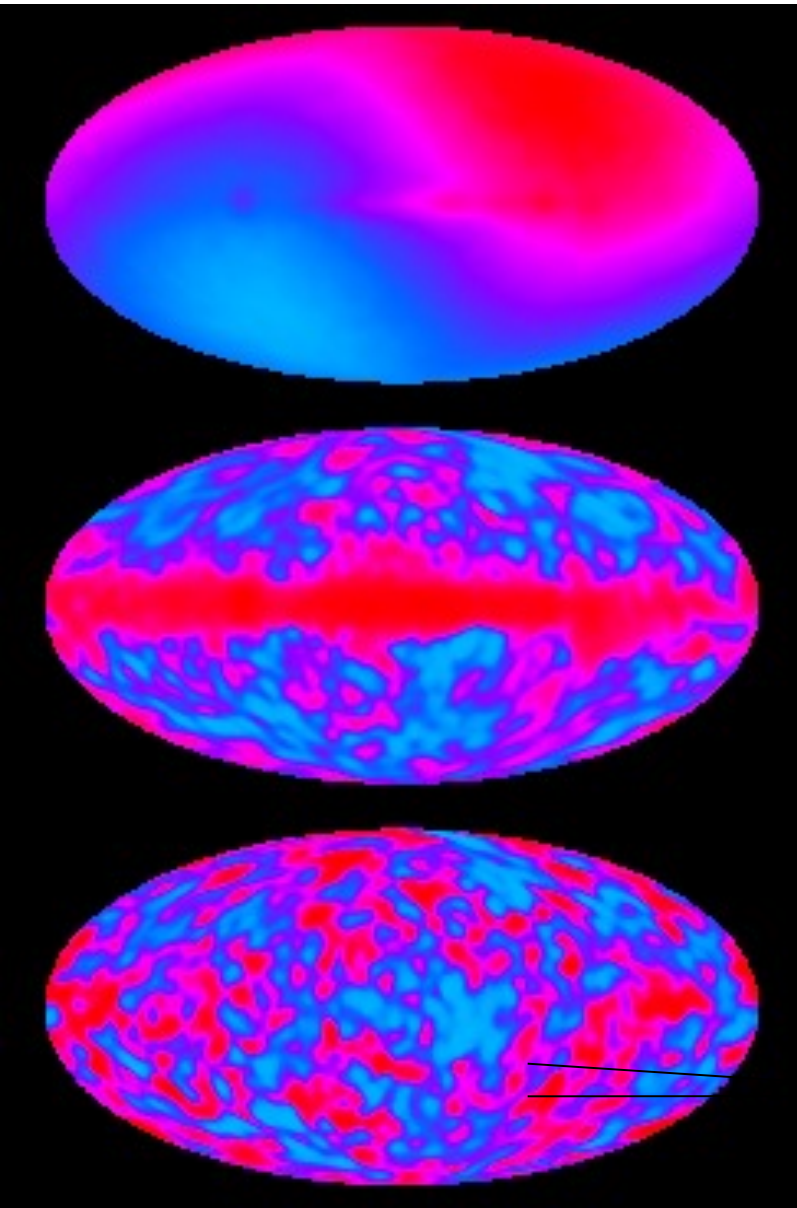


RCF - espectro de corpo negro





RCF - distribuição angular



- ✚ Mapa 1: dipolo + galáxias + flutuações
- ✚ Mapa 2: galáxia + flutuações
- ✚ Mapa 3: flutuações de temperatura de 1 parte em 10000...

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

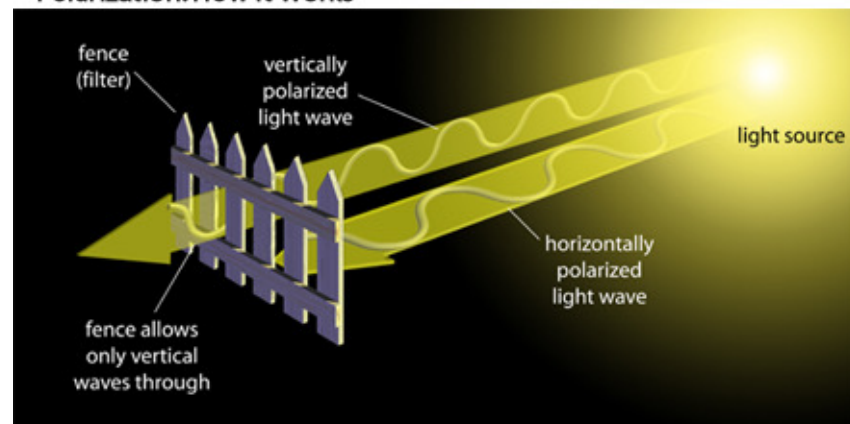
Escala angular: 7°

RCF - Polarização

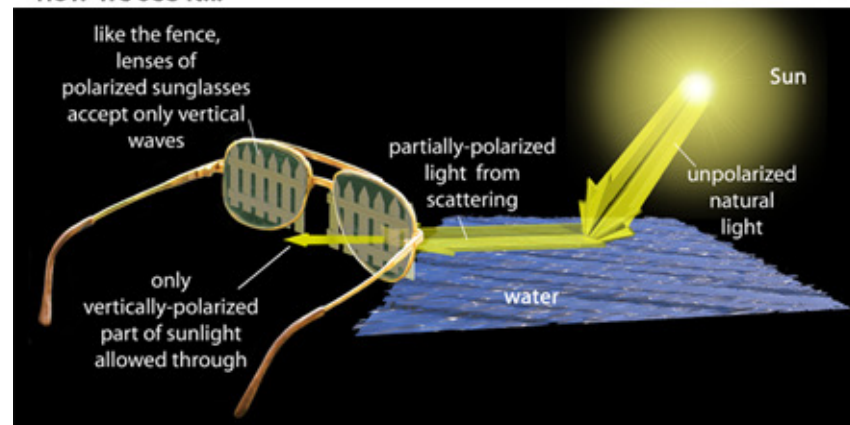
- ✚ Importante para definir a época de formação das primeiras estrelas
- ✚ O modo de polarização tensorial pode fornecer informações sobre o espectro de ondas gravitacionais primordiais

Source: http://map.gsfc.nasa.gov/m_or/m_or3.html

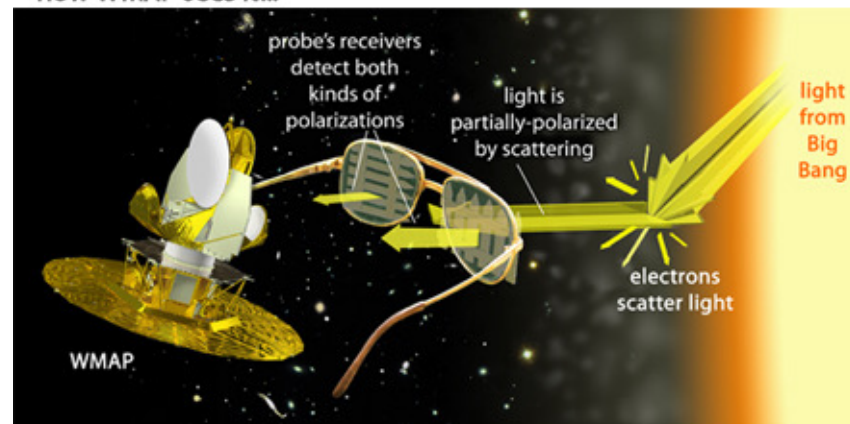
Polarization: How It Works



how we see it...

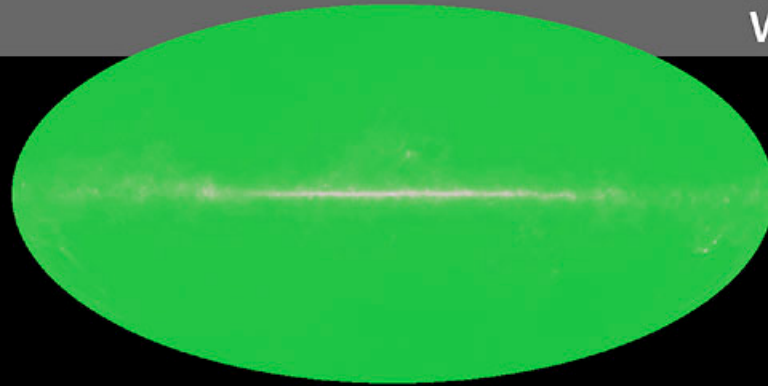
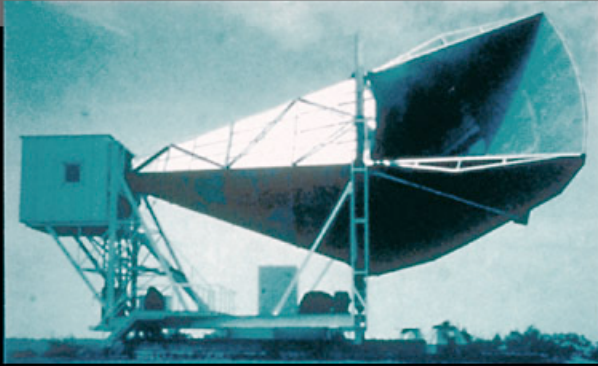


how WMAP sees it...



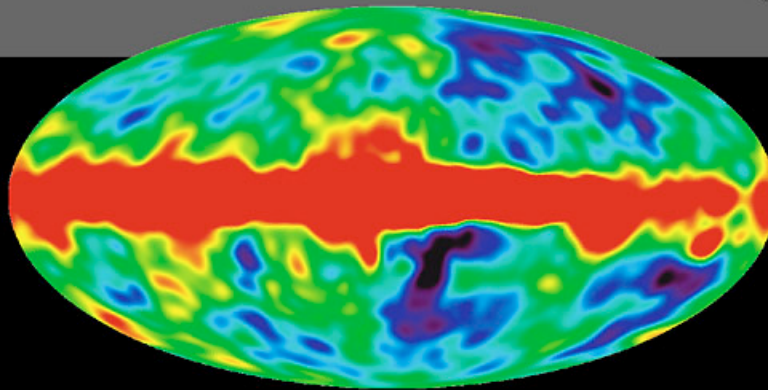
1965

Penzias and
Wilson



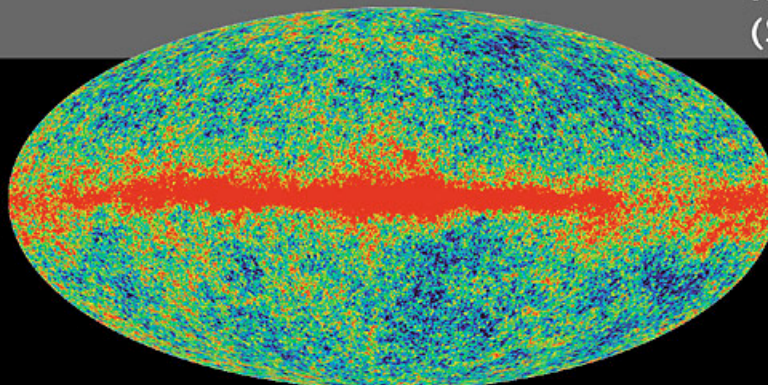
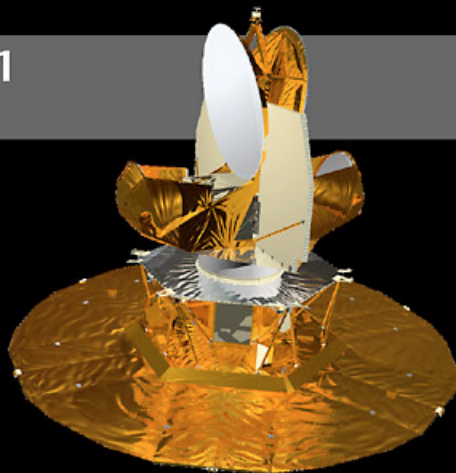
1992

COBE



2001

MAP
(Simulated)



Source: http://map.gsfc.nasa.gov/m_or/m_or3.html



Problemas no MCP

- ❖ O MCP não é capaz de explicar
- ❖ Planura (flatness)
- ❖ Horizonte
- ❖ Assimetria fóton-bárion ($n_{\text{fót}}/n_{\text{bar}} \sim 10^9$)
- ❖ Homogeneidade e isotropia
- ❖ Formação de estruturas



Além do MCP - Inflação

- ❖ Possivelmente causada por uma transição de fase (quebra de simetria nas escalas de GUT)
- ❖ Aumento do fator de escala ($a(t)$) por um fator de $\sim e^{100}$
- ❖ Permite explicar a natureza, espectro e amplitude das flutuações de densidade



Além do MCP - Inflação

❁ Inflação é capaz de explicar:

- ❑ Homogeneidade e isotropia

- ❑ Planura

- ❑ Horizonte

❁ Inflação não explica

- ❑ Assimetria fóton-bárion e assimetria matéria-antimatéria

- ❑ Existência de flutuações de densidade



Além do MCP - a história térmica

- ❖ Dinâmica do Universo dominada pela radiação até $t \sim 10^4$ anos

$$T(t) = 10^{10} \text{K} / \sqrt{t} = 1 \text{ MeV} / \sqrt{t}$$

- ❖ "Freeze-out": partículas cuja taxa de produção é menor do que a expansão do Universo desacoplam do campo de radiação
- ❖ Se a massa (em MeV) for menor do que a temperatura dada pela equação acima, a produção e aniquilação de pares é interrompida.



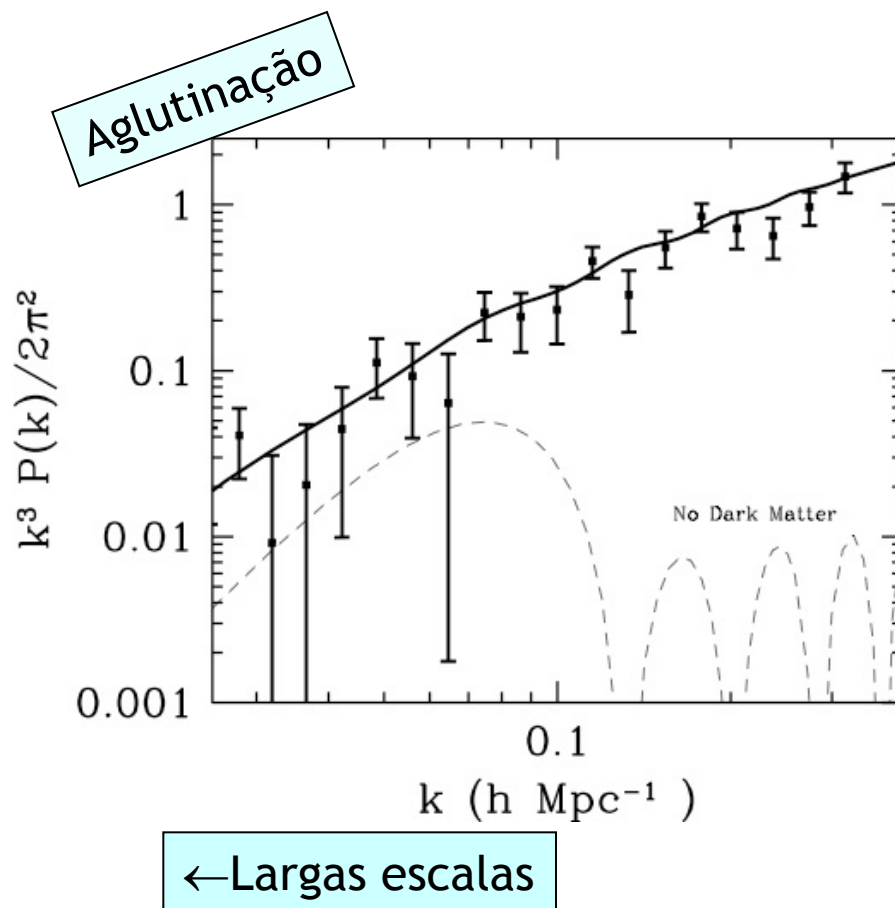
Além do MCP - a história térmica

- ❖ Bariogênese: a assimetria matéria-antimatéria pode ser explicada por violações de leis de conservação.
- ❖ A nucleossíntese primordial
 - ❑ Ocorreu nos 3 primeiros minutos (10^{-3} s a 180 s)
 - ❑ Produção de He^4 , He^3 , De, Li
- ❖ Recombinação: formação dos átomos neutros (H, He)
 - ❑ Ocorreu quando o Universo tinha ~ 380.000 anos.
 - ❑ Dinâmica do Universo já dominada pela matéria



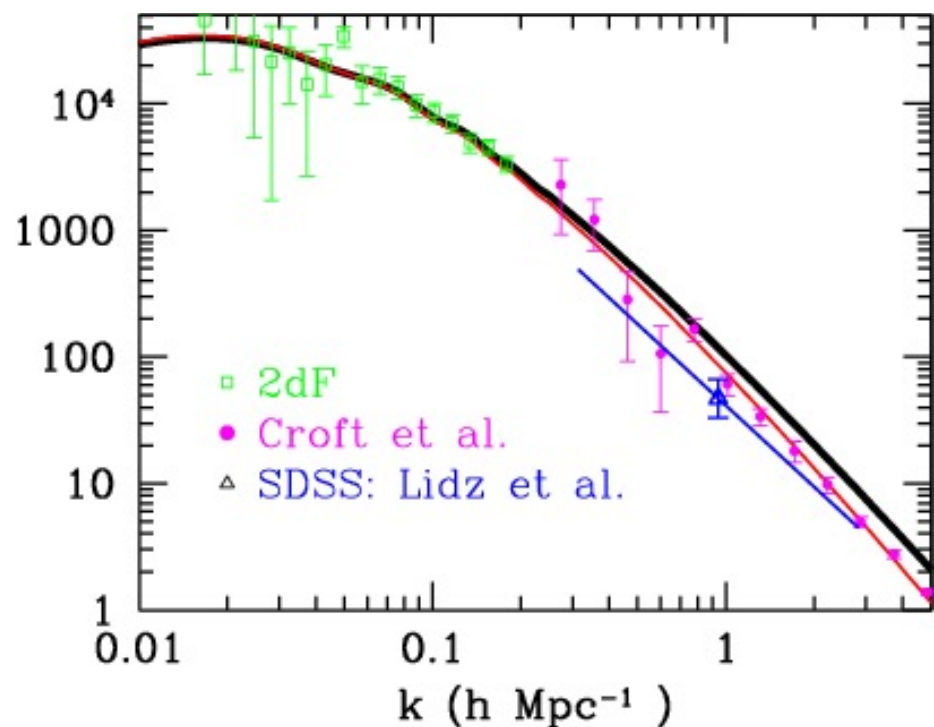
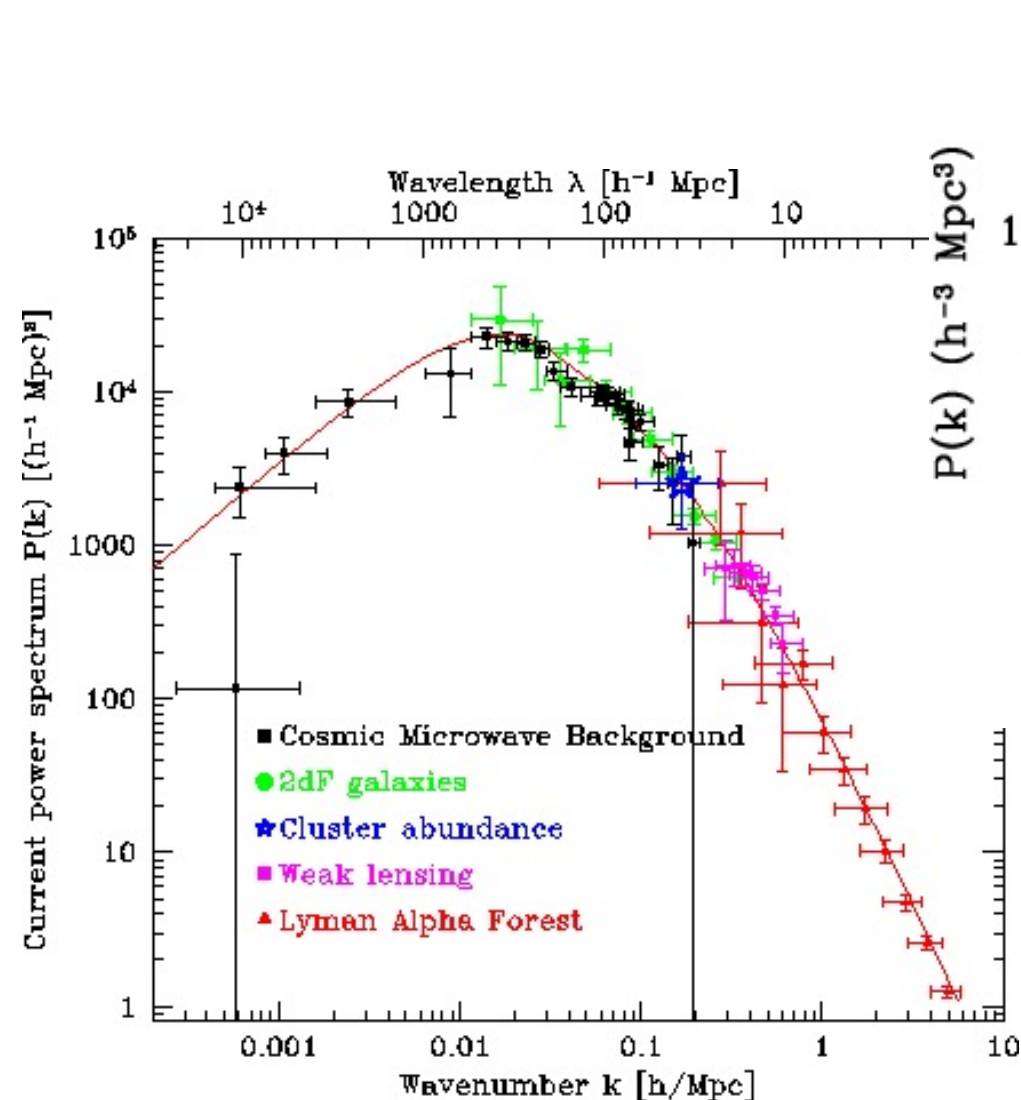
Além do MCP - formação de estruturas

- Causada por flutuações de densidade amplificadas pela interação gravitacional
- Princípio básico: colapso se a massa é maior do que M_{Jeans}
- Presença de matéria escura é fundamental.





Além do MCP - form. estruturas



Dodelson, 2005
Tegmark et al. 2002



Cosmologia: Século XIX x Século XX

➤ Final do séc. XIX:

- *Teoria*: Física Clássica; Universo "restrito" à Galáxia.
- *Observação*: telescópios ópticos e chapas fotográficas

➤ Final do séc. XX:

- *Teoria*: Relatividade Geral + "microfísica"; Universo observável ~ 3000 Mpc
- *Observações*: de rádio ($\lambda \sim 100$ cm) a raios cósmicos ($E > 10^{12}$ eV) realizadas no solo, com grandes telescópios, **e no espaço, com balões, foguetes e satélites**