

OS PILARES DA COSMOLOGIA

- Expansão do Universo
- Nucleossíntese Primordial
- Radiação de Fundo Cósmica

400000

$$H_0 = 100 \text{ } h \text{ km}/(s \text{ Mpc})$$

$h = 0.72 \pm .03 \pm .07$ Freedman et al. (Hubble Key Project)

$h = 0.57 \pm .02$ Sandage, Tammann, et al.

Velocity (km/sec)

20000

10000

0

Riess et al astro-ph/9410054

Hubble's
data

0

100

200

300

500

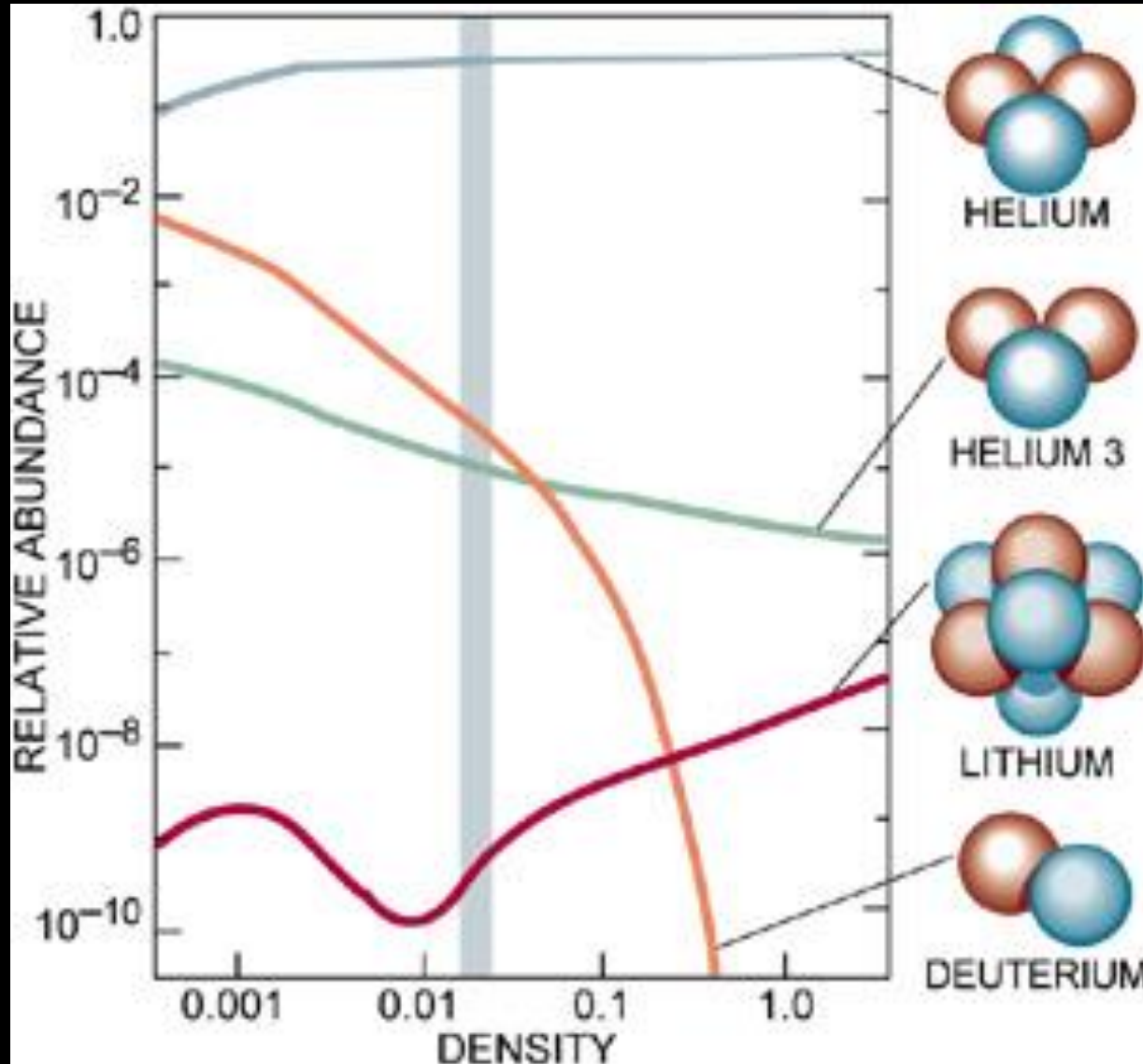
600

700

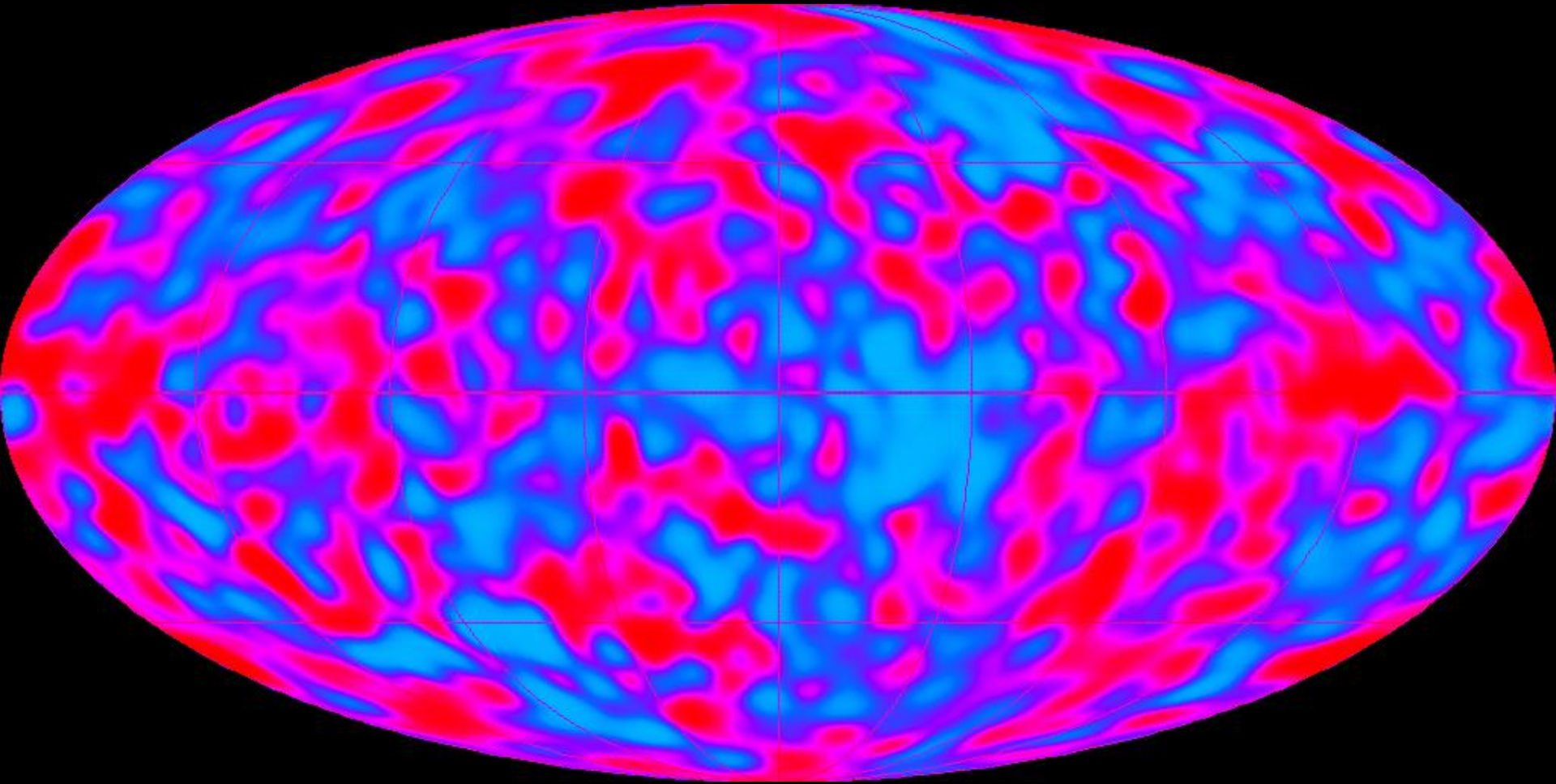
Distance (Mpc)

Kolb

NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL



RADIAÇÃO DE FUNDO CÓSMICA



A expansão do Universo e a lei de Hubble.



Percival Lowell

- 1901, Vesto M. Slipher é contratado para trabalhar no Observatório Lowell.
- durante mais de 10 anos ele analisou o espectro da luz vinda de estrelas e nebulosas.

A expansão do Universo e a lei de Hubble.



V. M. Slipher

- Em 1912 Slipher percebeu que as linhas espectrais de Andrômeda estavam deslocadas para o azul (região de menor comprimento de onda).

Efeito Doppler



Christian Doppler

• 1842 - Efeito Doppler

$$z = \frac{\text{desvio para o vermelho}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{\text{velocidade da fonte}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{ref fonte}}}{\lambda_{\text{ref fonte}}}$$

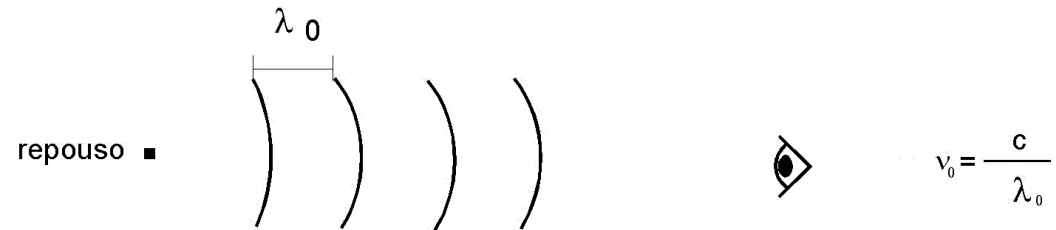
$C = 300\,000 \text{ km/seg}$ Válido para v muito menor que c

Portanto a interpretação do resultado de Slipher é que Andrômeda está se aproximando de nós.

Efeito Doppler

Fonte emissora desloca-se em relação ao observador.

Fonte em repouso,
emitindo luz a um
comprimento de onda λ_0 .



Fonte aproxima-se do
observador: $\Rightarrow$ comprimento
de onda observado será
menor ($\lambda_1 < \lambda_0$).

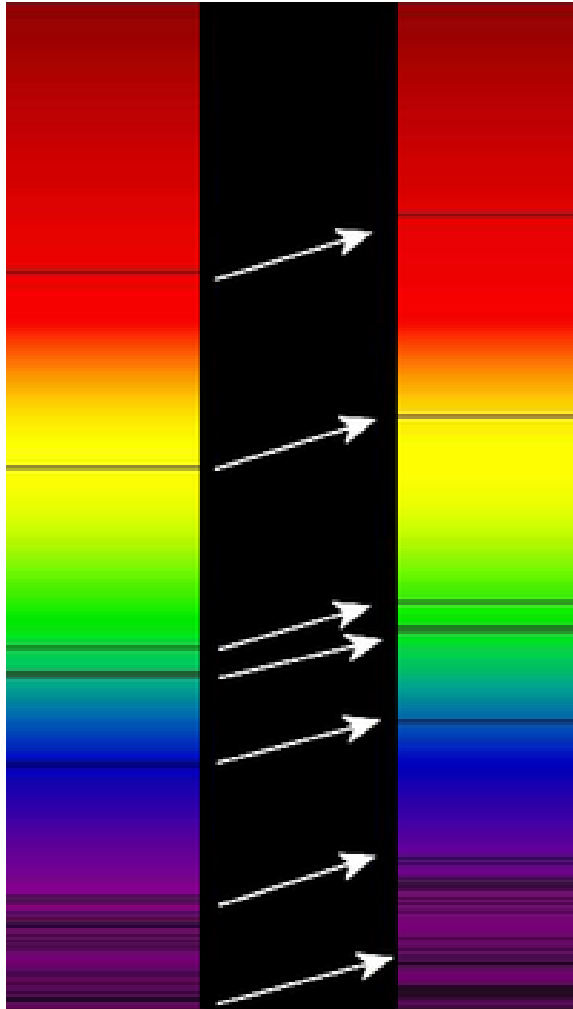


Fonte afasta-se:
comprimento de onda
observado será maior
($\lambda_2 > \lambda_0$).



Para velocidades não-relativísticas (fonte com $v \ll c$)

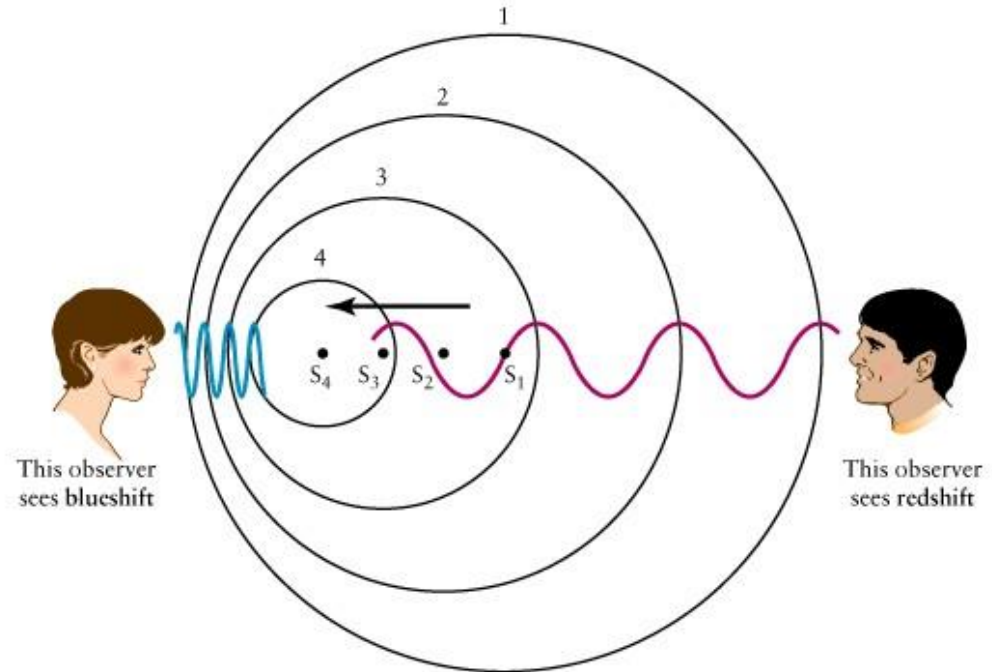
repouso afastamento



$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left(\frac{v}{c} \right)$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

redshift (desvio para o vermelho*)
* “vermelho”=longos comprimentos de onda



A expansão do Universo e a lei de Hubble.



V. M. Slipher

- A velocidade de Andrômeda estimada por Slipher foi de, aproximadamente, 300km/seg.
- Em 1915 ele já tinha 40 medidas de espectro de nebulosas com 15 velocidades estimadas, número que sobe para 25 em 1917.
- Contrariamente ao que fora observado em Andrômeda a grande maioria apresentava velocidades positivas. Por exemplo, das 41 nebulosas com desvio para o vermelho medido em 1923, apenas 5 (incluindo Andrômeda) aproximavam-se de nós.
- Isto é muito estranho. O esperado é que houvesse tanto galáxias se aproximando (blueshift) como se afastando (redshift)

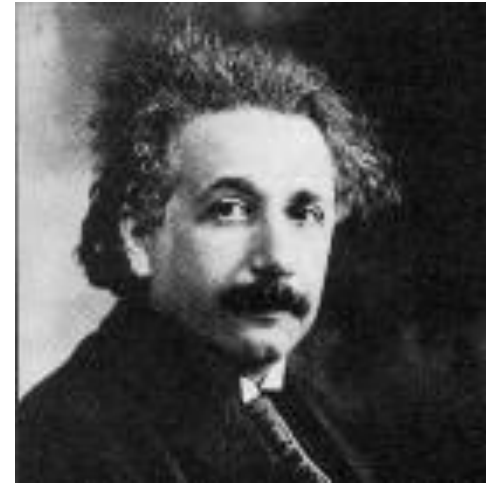
Teoria

Einstein (1910-1955)

Teoria da Relatividade Geral

Gravidade é vista como um efeito geométrico.

O espaço se curva na presença da massa-energia ! (não existe o conceito de força....!)



Desenvolve descrição matemática da natureza considerando este efeito.

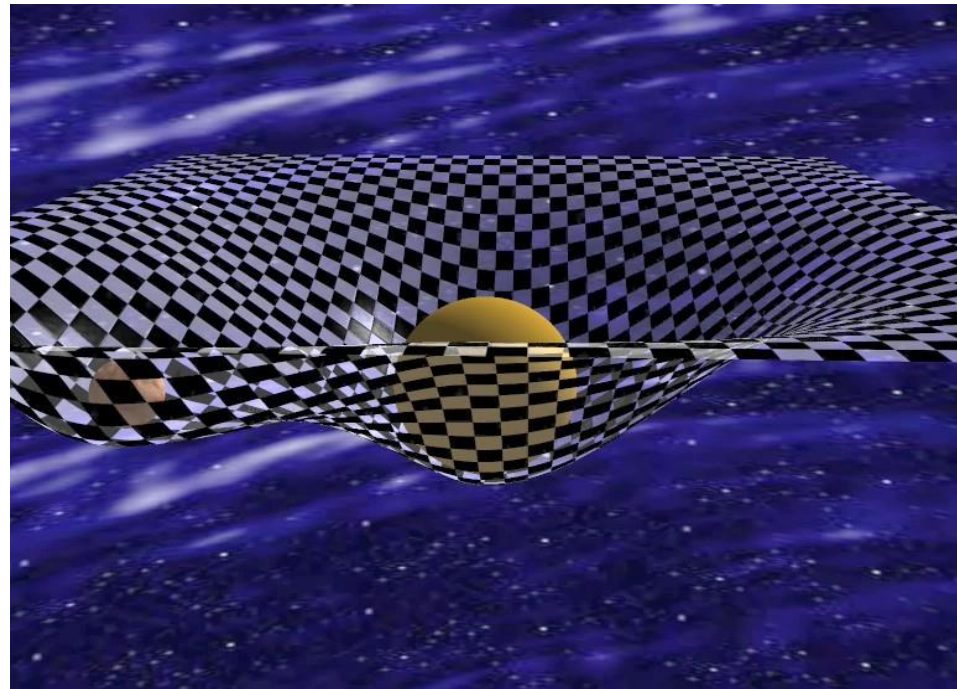
$$G_{\mu\nu} = \alpha T_{\mu\nu}$$

representa curvatura
do espaço-tempo

representa a matéria

Usando este formalismo matemático para descrever

a
gravidade,
desenvolve
a **Equação de
Campo**,
que
descreve a



Equação de Campo de Einstein

...são a base da formulação matemática da Relatividade Geral

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R + \lambda g^{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

Geometria do espaço-tempo = Matéria-Energia

“ $g_{\mu\nu}$ ” um [tensor simétrico 4 x 4](#), que tem 10 componentes independentes. Dada a liberdade de escolha das quatro coordenadas do espaço-tempo, as equações independentes se reduzem, em número, a 6.

Tensores são entidades geométricas introduzidas na matemática e na física para generalizar a noção de escalares, vetores e matrizes.

Equações de Campo e Hipóteses para os Modelos

As **diferentes soluções** das equações de campo levam a **diferentes modelos** (descrições) matemáticos da evolução do Universo.

Algumas hipóteses fundamentais consideradas nos modelos:

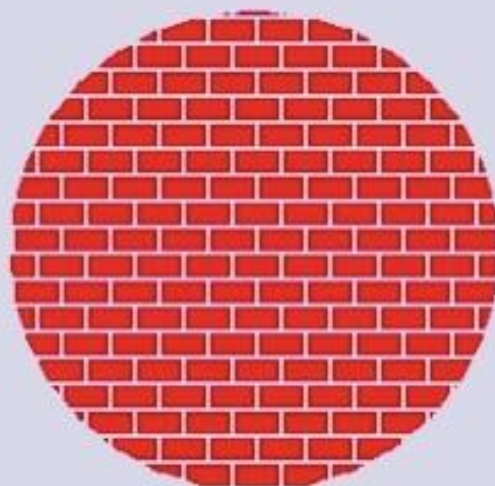
1- **Universo é homogêneo**, ou seja, parece o mesmo para um viajante cósmico (todos os lugares devem ser iguais) e não existe localização privilegiada. Esta hipótese deve ser considerada para escalas suficientemente grandes, ou seja, maiores do que as escalas de dimensão de aglomerados de galáxias.

2 – **Universo é isotrópico**, ou seja, para um observador imóvel, em qualquer direção ele parece o mesmo em todas as direções.

1 + 2 → Estas 2 afirmações são conhecidas como **Princípio Cosmológico**

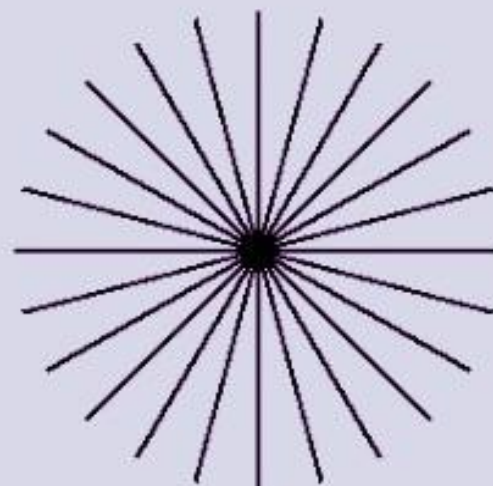
O Princípio Cosmológico

O Universo é *homogêneo* e *isotrópico*



(a)

www.astro.ucla.edu

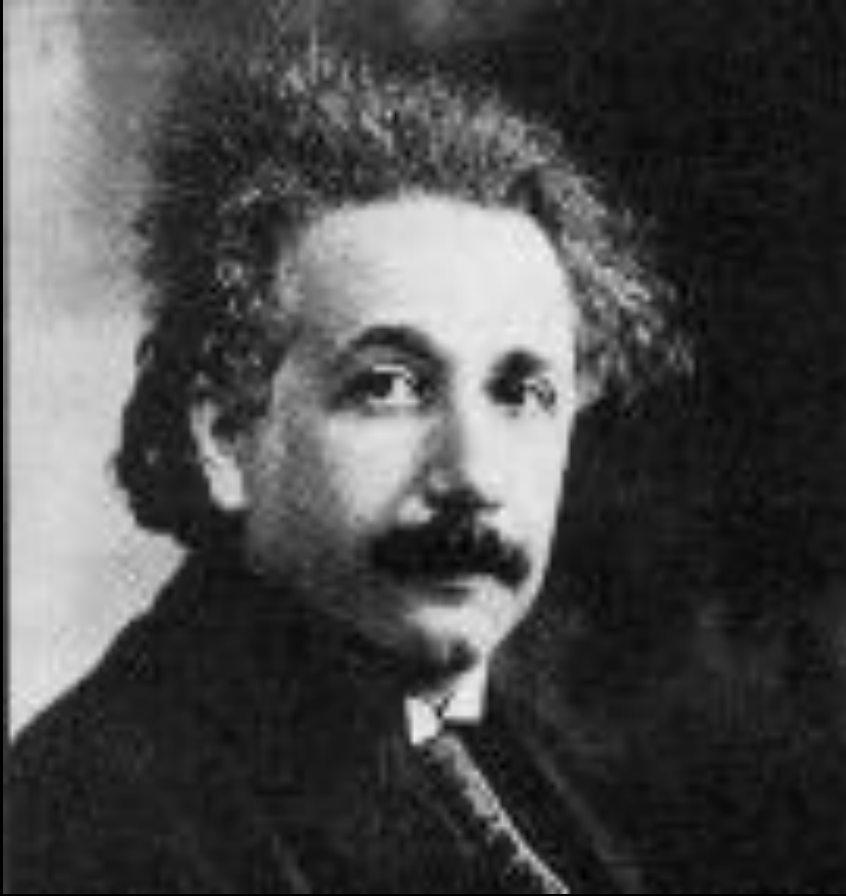


(b)

(a) *Homogêneo*: todos os pontos têm a mesma composição e propriedades.

(b) *Isotrópico*: todos os observadores têm a mesma impressão do Universo, qualquer que seja a direção na qual eles estão olhando.

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



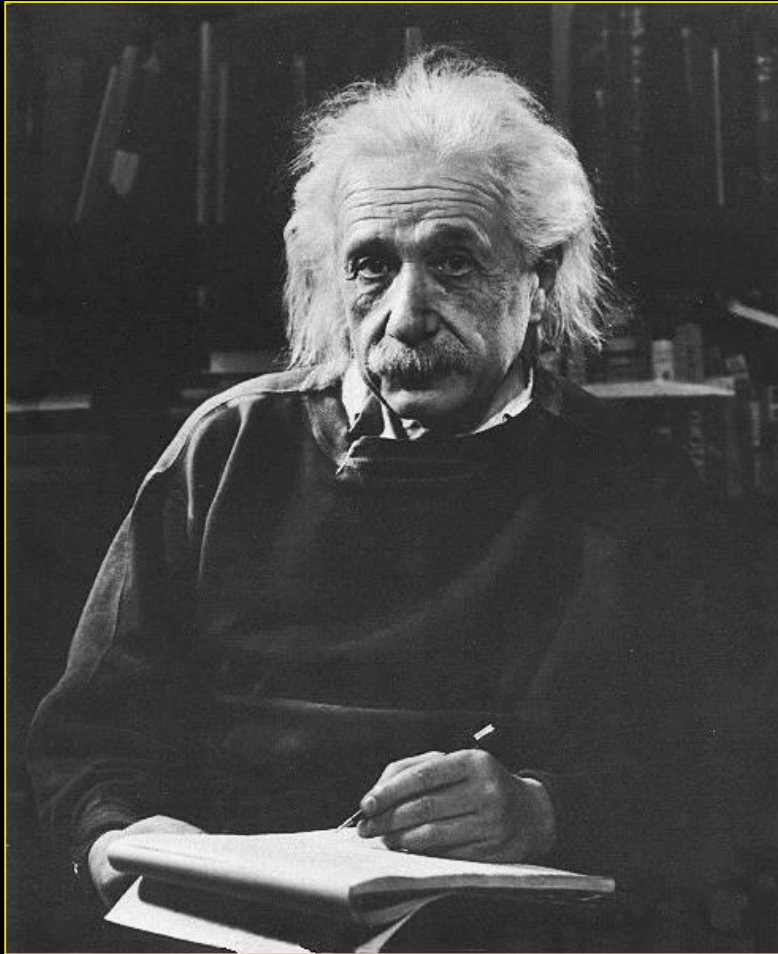
Albert Einstein

- 1917 - primeiro modelo cosmológico relativista - **modelo de Einstein.**
- características principais: homogêneo, isotrópico, curvatura positiva e **estático.**
- constante cosmológica (Λ)

“The most important fact that we draw from experience is that the relative velocities of the stars are very small as compared with the velocity of light”.

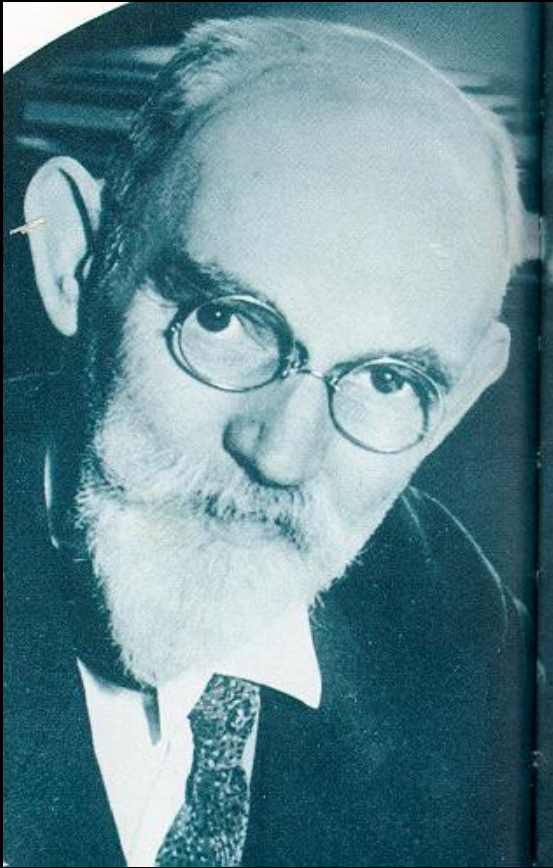
A. Einstein

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



- Einstein considerava que seu modelo possuía as seguintes virtudes:
- Era possível construir um modelo consistente para o universo usando a relatividade geral.
- Relacionava Λ com densidade média da matéria; Estava em acordo com o princípio de Mach que relaciona a inércia (propriedade local) com a distribuição de matéria no cosmos.
- Einstein acreditava ser esse o único modelo admitido pela relatividade geral que era estático e que estava em acordo com o princípio de Mach.

Modelo de de Sitter



Willem de Sitter

- Em 1917 de Sitter (holandês) obtem novas soluções da Relatividade Geral com constante cosmológica, estacionárias, mas vazias !
- **Efeito de Sitter:** a velocidade de afastamento de objetos aleatoriamente espalhados em um Universo de de Sitter aumenta com a distância.

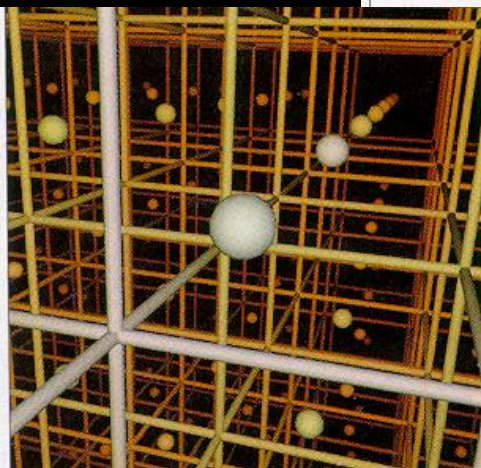
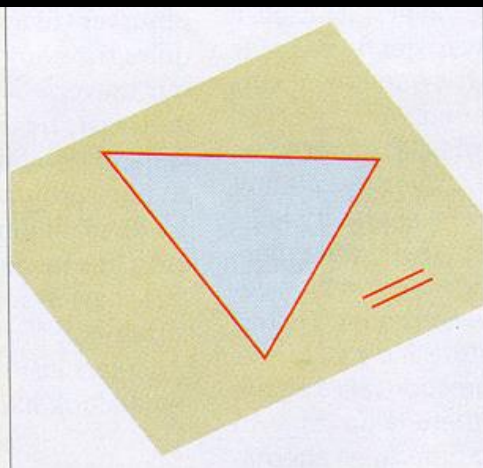
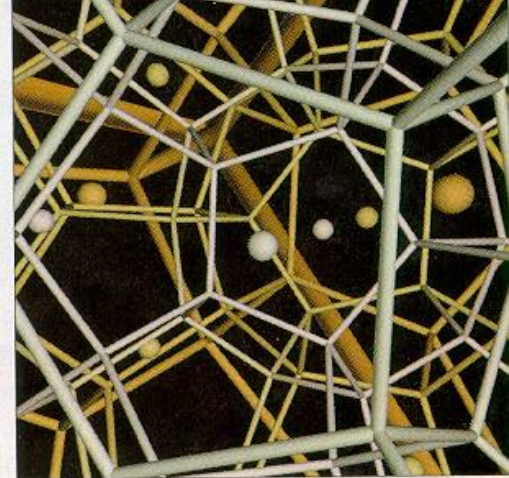
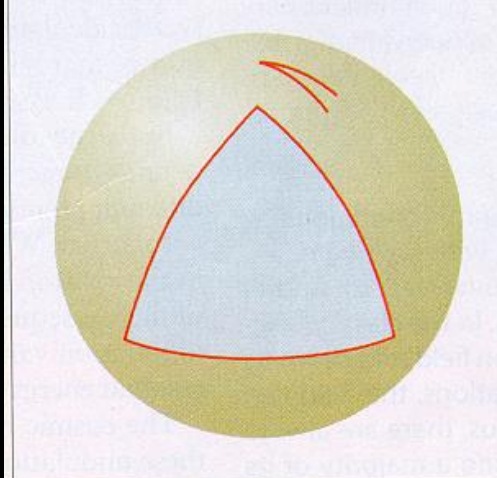
Modelo de Friedmann-Lemaître



G. Lemaître

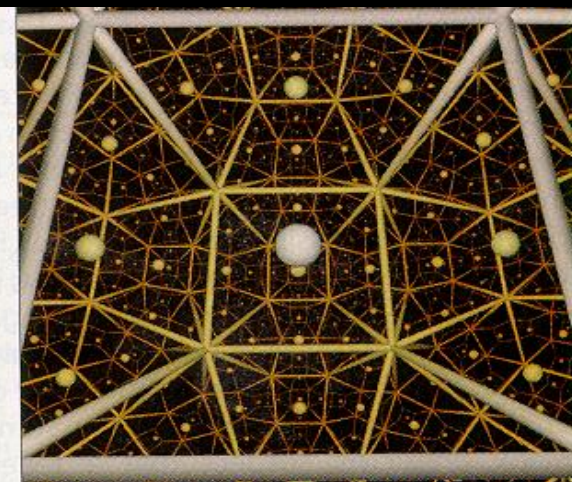
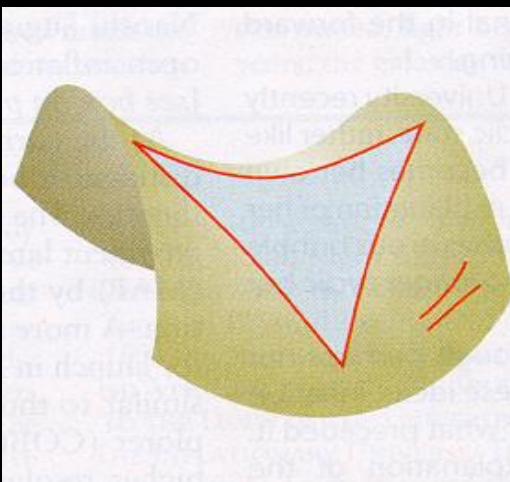
- 1922 - Aleksander Aleksandrovich Friedmann (russo) obtém soluções expansionistas, sem Λ e com matéria das equações de Einstein.
- O modelo de Friedmann é chamado hoje o modelo padrão da cosmologia.
- Características principais: homogeneidade, isotropia (em relação a qualquer ponto) e expansão.

Curvatura espacial positiva



Curvatura espacial nula

Curvatura espacial negativa



A lei de Hubble.

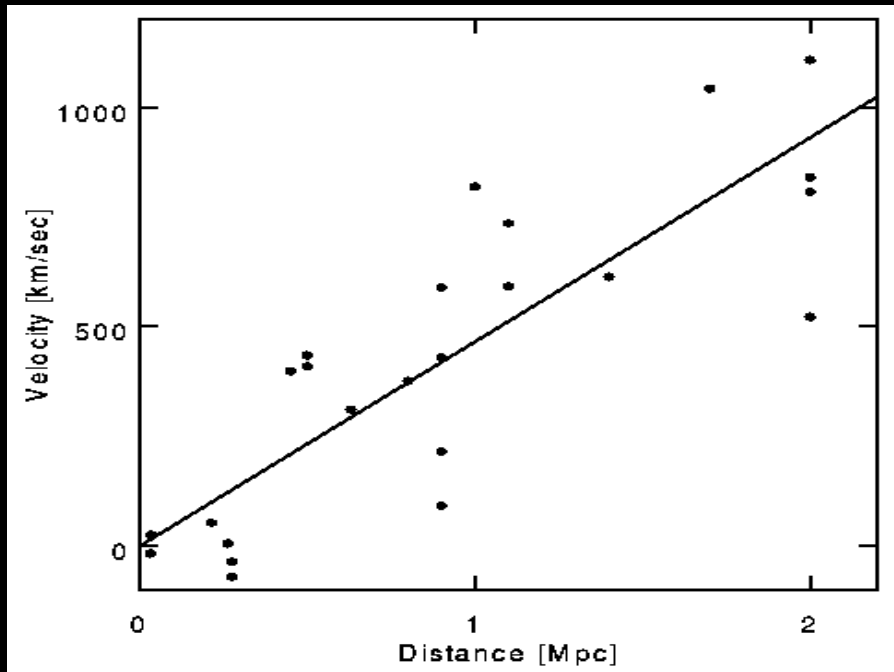


Milton Humason e Hubble

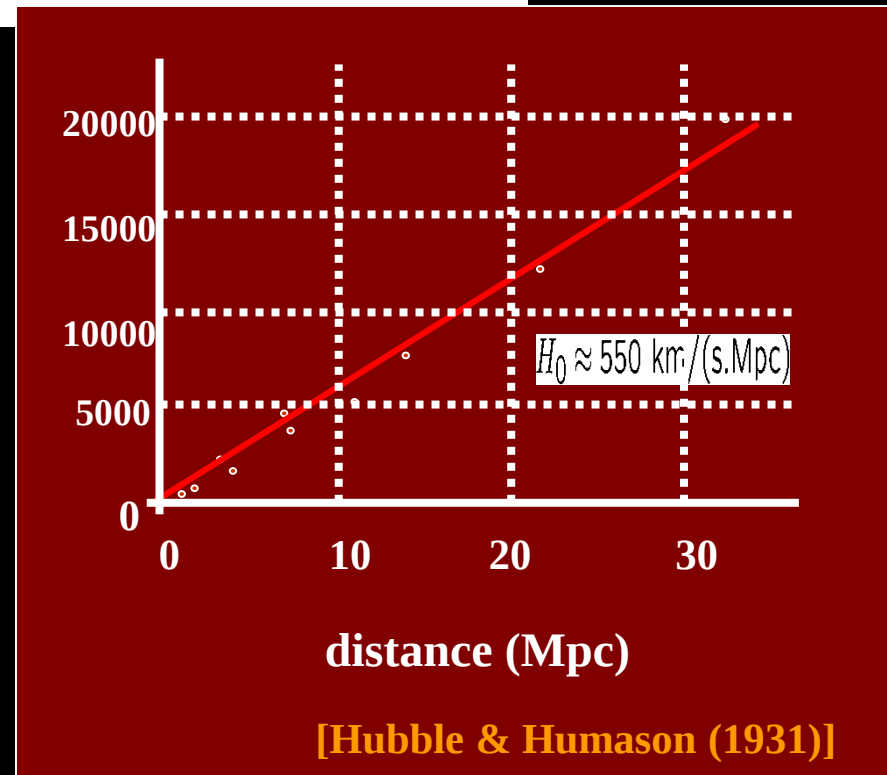
- Em 1929 e nos anos subsequentes Hubble sistematicamente estende suas medidas de distância, e usando desvios para o vermelho medidos por Humason, coloca sobre uma base firme a validade da relação que viria a se chamar ***Lei de Hubble***

A lei de Hubble.

desvio de recessão = $H \times \text{distância}$
 $c z = v$ (km/sec)



[Hubble (1929)]



[Hubble & Humason (1931)]

400000

$$H_0 = 100 \text{ } h \text{ km}/(s \text{ Mpc})$$

$h = 0.72 \pm .03 \pm .07$ Freedman et al. (Hubble Key Project)

$h = 0.57 \pm .02$ Sandage, Tammann, et al.

Velocity (km/sec)

20000

10000

0

Riess et al astro-ph/9410054

Hubble's
data

0

100

200

300

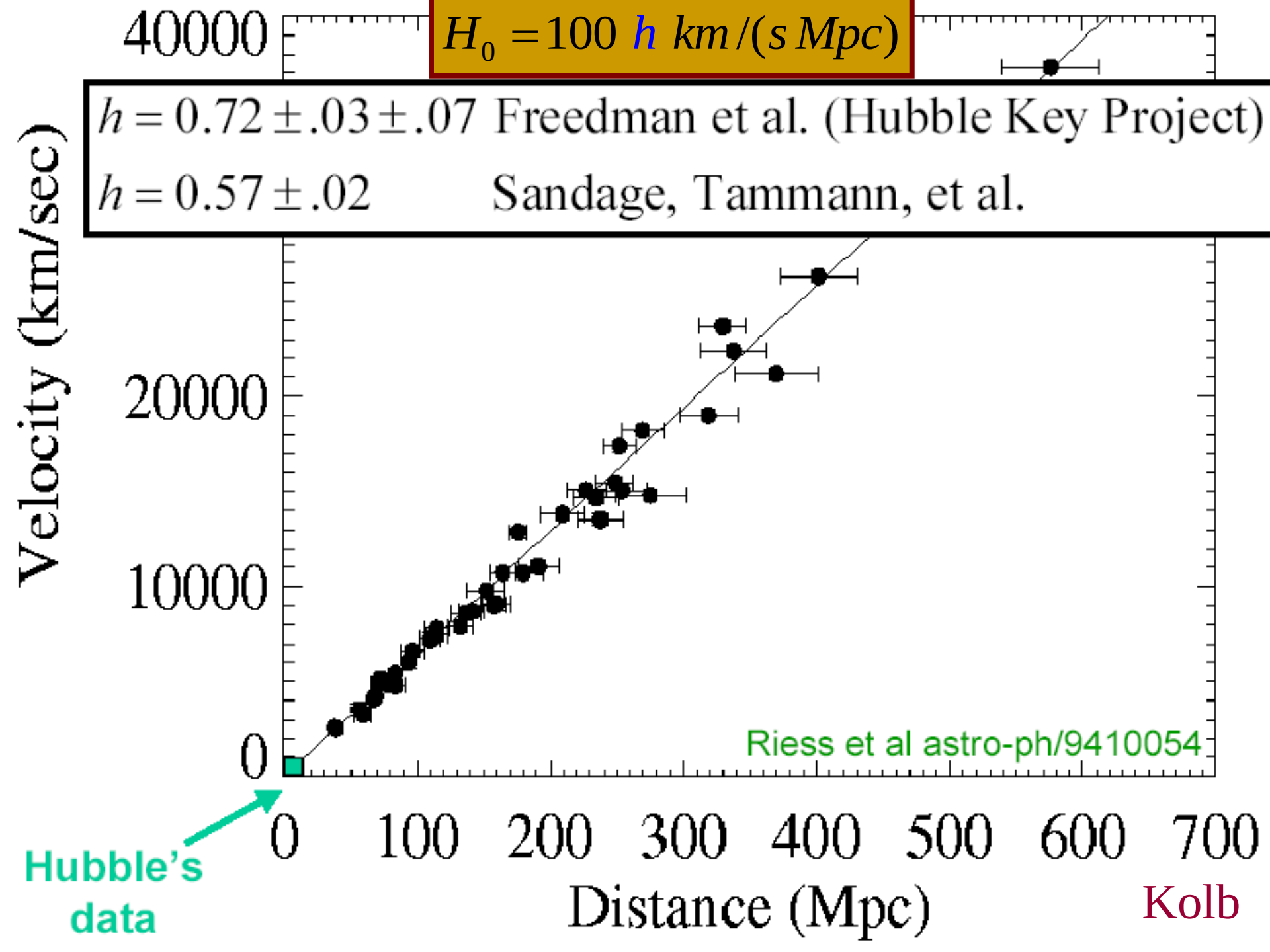
500

600

700

Distance (Mpc)

Kolb

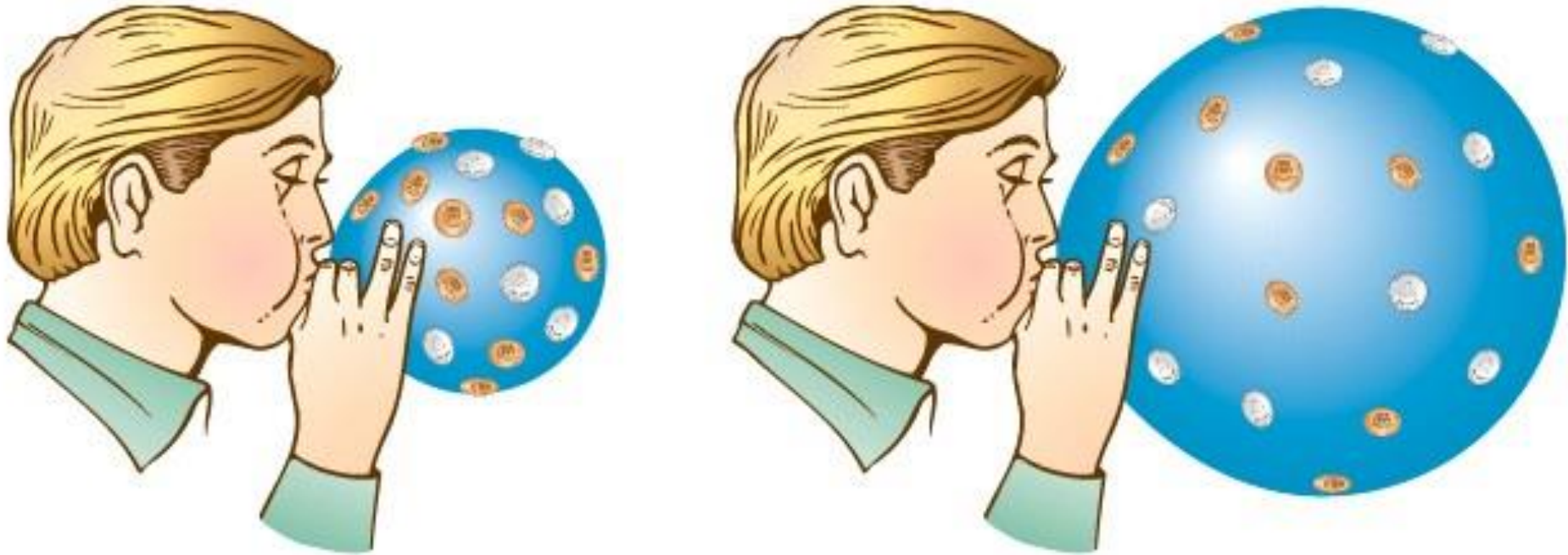


A lei de Hubble



Onde está o centro do Big Bang?

A lei de Hubble



Não há centro do Universo

**Para onde estão as
galáxias se
expandindo?**

As galáxias estão se expandindo para o espaço vazio?

Não



Sim

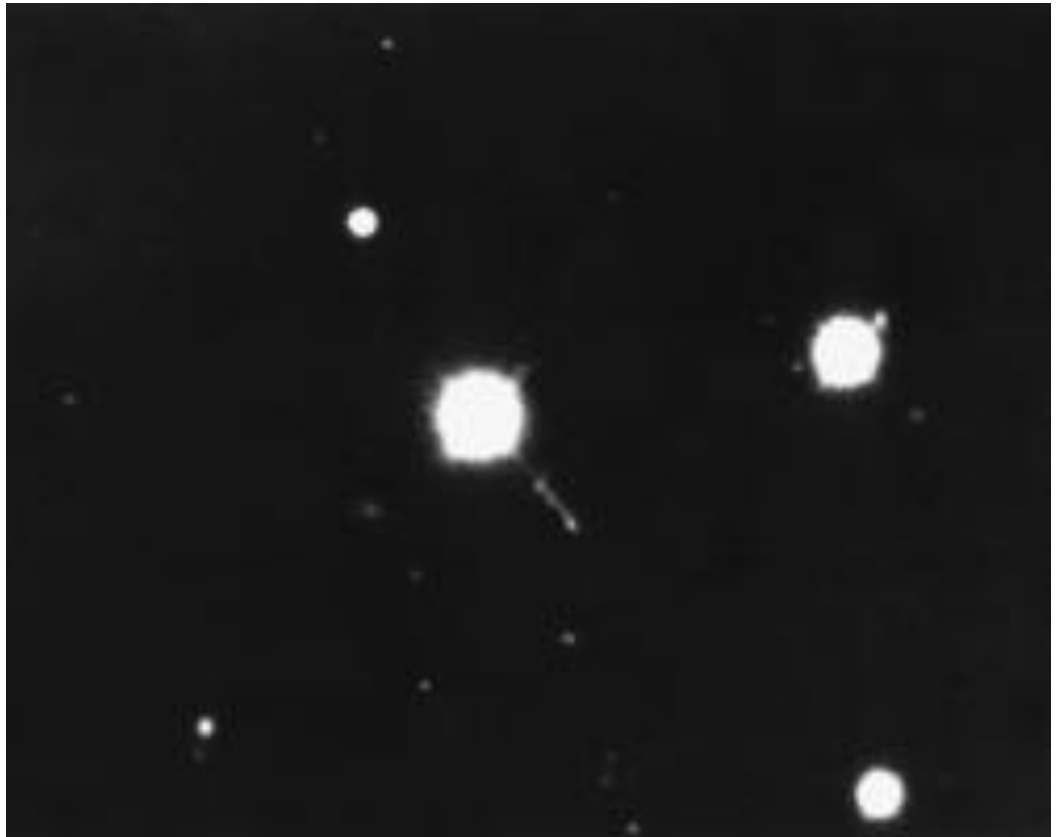
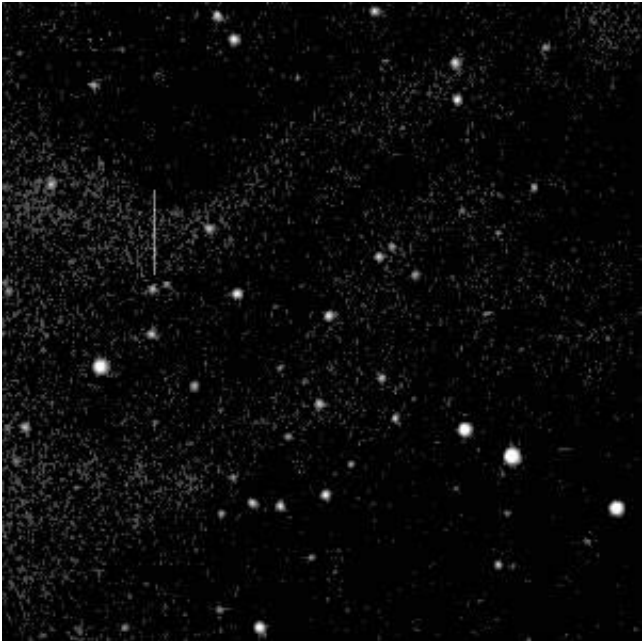




News 1963!

3C273 estoura o tamanho do Universo

Distância: cerca de
2 bilhões de anos-luz



O que quer dizer “distância” para as distâncias das galáxias?

- As diversas definições de distância não coincidem em relatividade geral
- Desse modo é preferível usar o redshift
- Por exemplo, distância usada na lei de Hubble é a *distância luminosidade*

$$f = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$

Definições de Distância

- Distância radar
- Distância paralaxe
- Distância movimento próprio
- Distância luminosidade
- Distância diâmetro angular

Em Relatividade Geral, os valores dados pelas várias definições de distância não coincidem!!

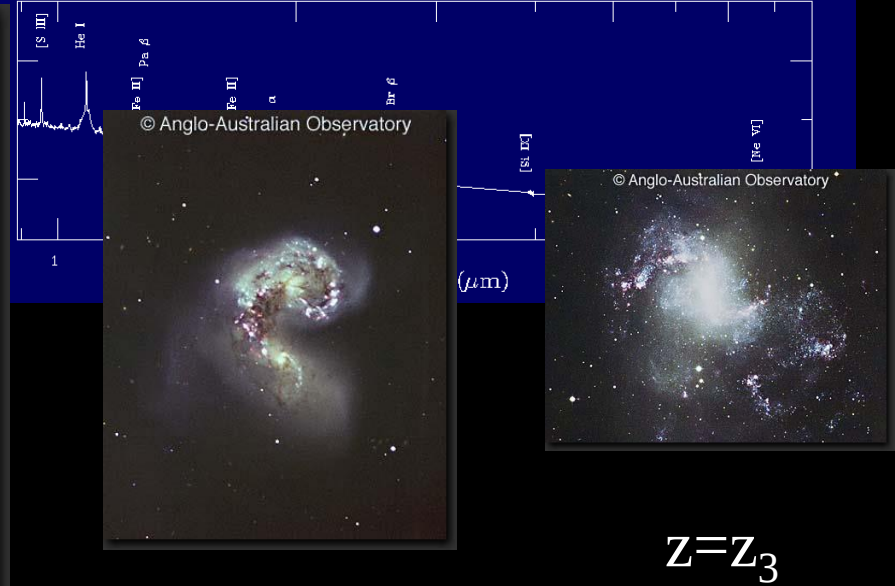
Mais Distante = Maior Redshift



$z=0$



$z=z_1$



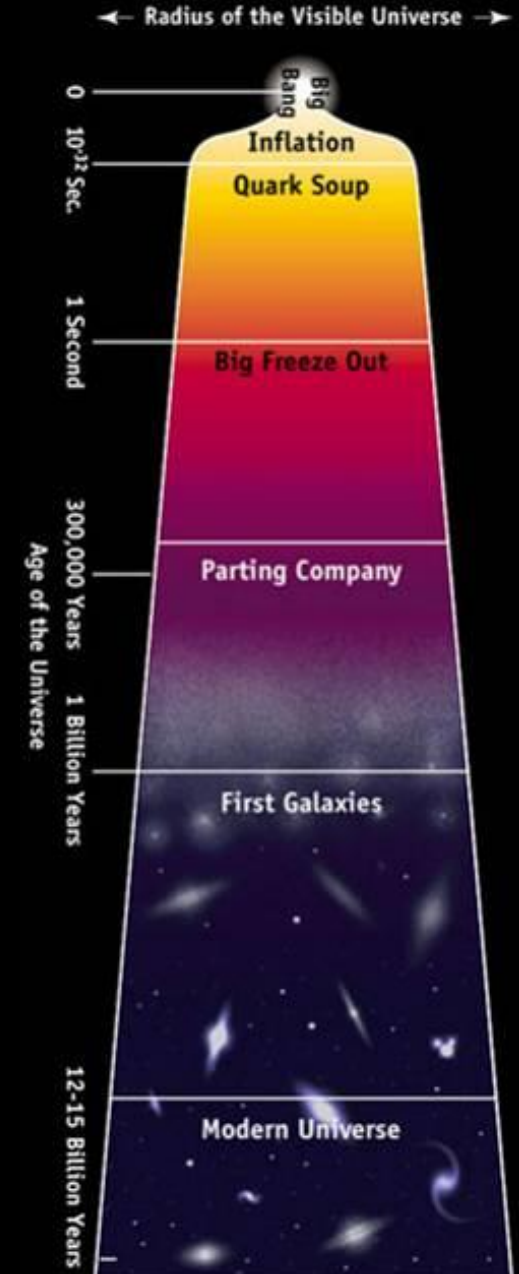
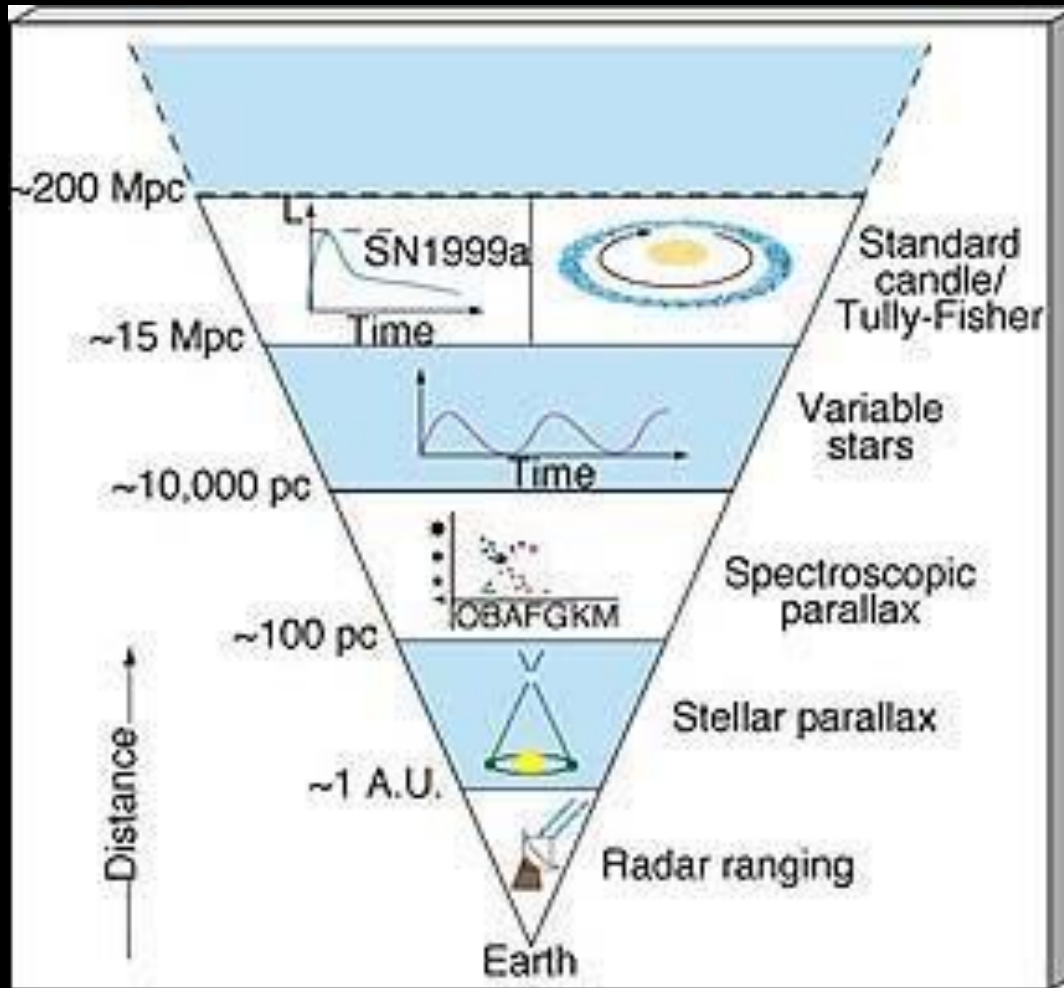
$z=z_2$

$z=z_3$

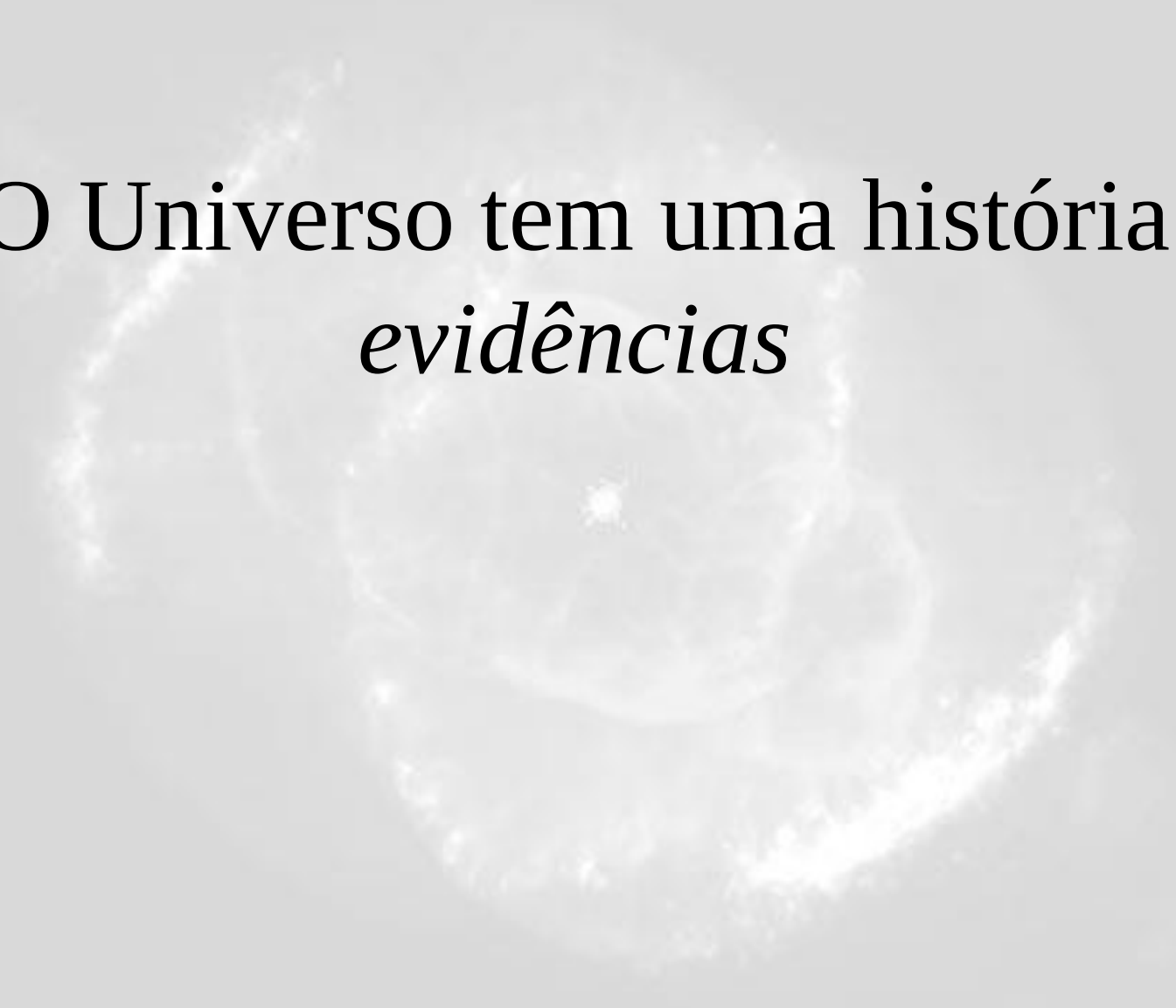
A Máquina do Tempo

- Em uma observação astronômica, sempre estamos olhando o passado
- Quando observamos Andrômeda (M31), vemos algo que ocorreu 2 milhões de anos atrás
- Porém, compare isso com a Idade do Universo
 - 13-15 bilhões de anos.
- No caso de quasares, porém estamos olhando para um passado com mais de 2 bilhões de anos
 - Cosmologia e evolução de galáxias

Cosmology “Double Helix” – Space and Time





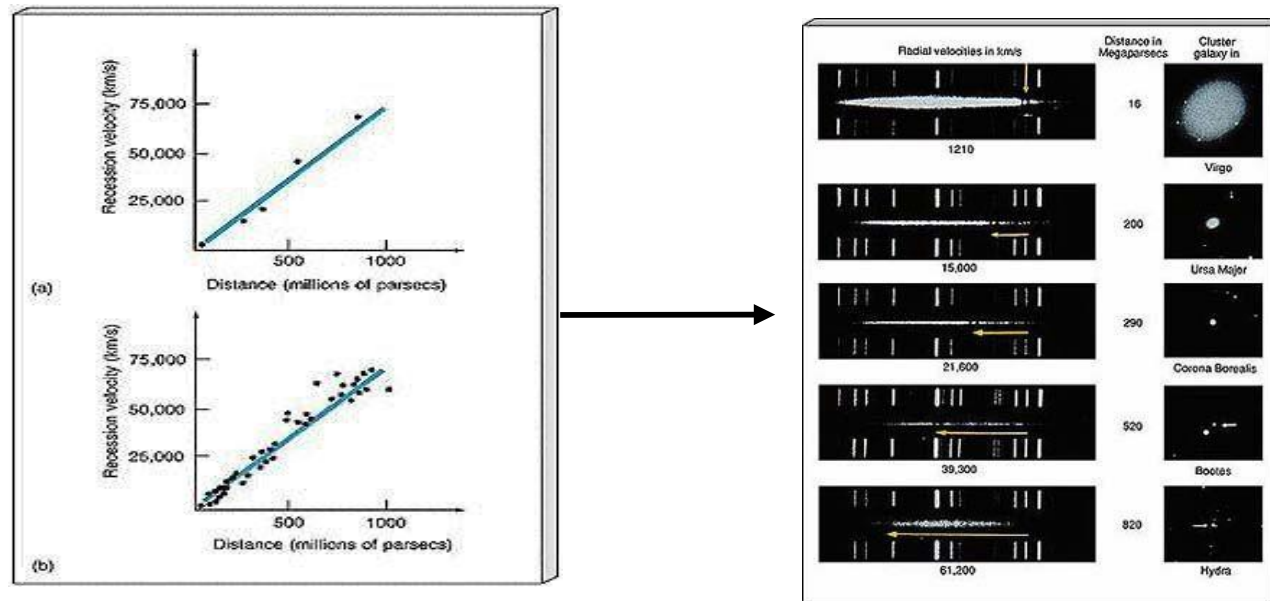


O Universo tem uma história
evidências

1ª evidência observacional

A descoberta da **expansão do Universo** forneceu a 1ª evidência real, observacional, de que o **Universo muda com o tempo e que pode ter havido um começo...**

O gráfico abaixo (esq.) mostra que a velocidade com que as galáxias estão se afastando da Via-Láctea é proporcional a sua distância. O desvio espectral observado na comparação dos espectros observado e de laboratório (fig. dir.) é, portanto, consequência da expansão do Universo.

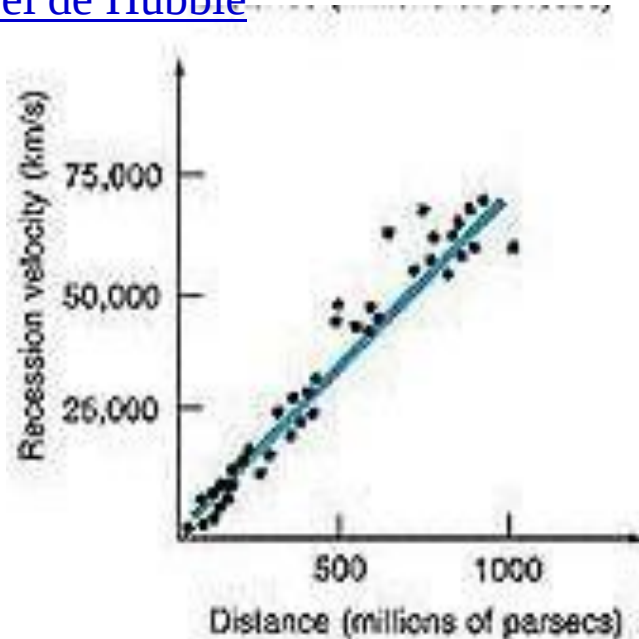


Deslocamento de linhas espectrais e Lei de Hubble

Consequências da Lei de Hubble

Aos pontos que representam as galáxias pode-se ajustar uma reta, uma equação matemática, que expressa o comportamento da velocidade de afastamento das galáxias ser diretamente proporcional a distância (grafico abaixo). Tal expressão analítica é conhecida como Lei de Hubble. Esta Lei representa, portanto, uma medida de como esta expansão ocorre e a inclinação da reta corresponde ao valor de H_0

Lei de Hubble



$$V_r(\text{Km/s}) = H_0 \cdot D(\text{Mpc})$$

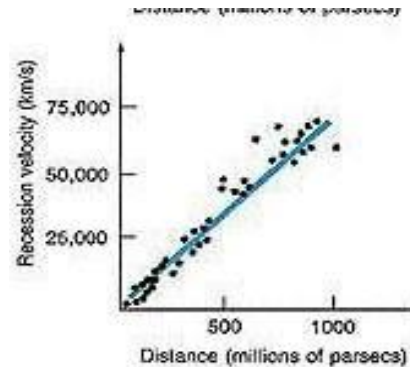
Constante de Hubble (71 km/s/Mpc)

A análise dimensional das unidades desta equação, mostra que H_0^{-1} tem unidade de tempo....e que Mpc pode ser expresso em termos de km, como a seguir

$$H_0 = \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{Km}} = \frac{1}{\text{s}} = \frac{1}{T_0} \quad \text{Tempo de Hubble}$$

$$T_0 = \frac{1}{H_0} = H_0^{-1} = 13,7 \text{ bilhões de anos}$$

A constatação de desvios espectrais (redshift) em galáxias nos induz a considerar que o **Universo está em expansão**. A interpretação imediata desta constatação é de que o Universo está se modificando e, portanto, **evoluindo**.

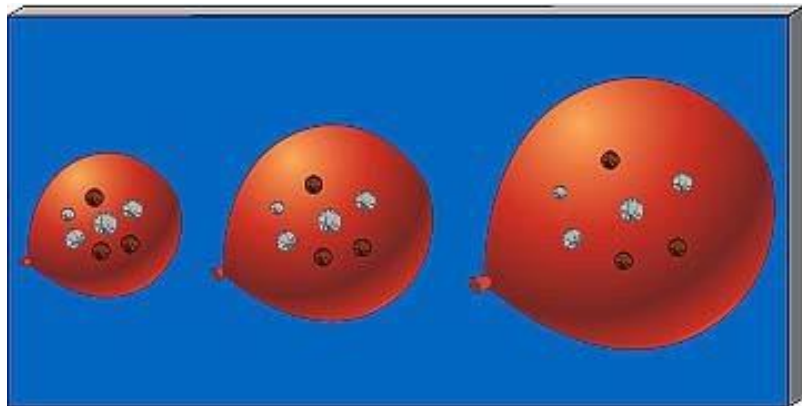


Se considerarmos que o movimento de recessão das galáxias esteve constante durante todo o tempo (13,7 bilhões de anos) e que com a expansão a distância entre as galáxias foi gradativamente aumentando, podemos deduzir que houve uma época no passado em que as galáxias estavam cada vez mais próximas, e houve um momento em que elas **estavam todas juntas**.

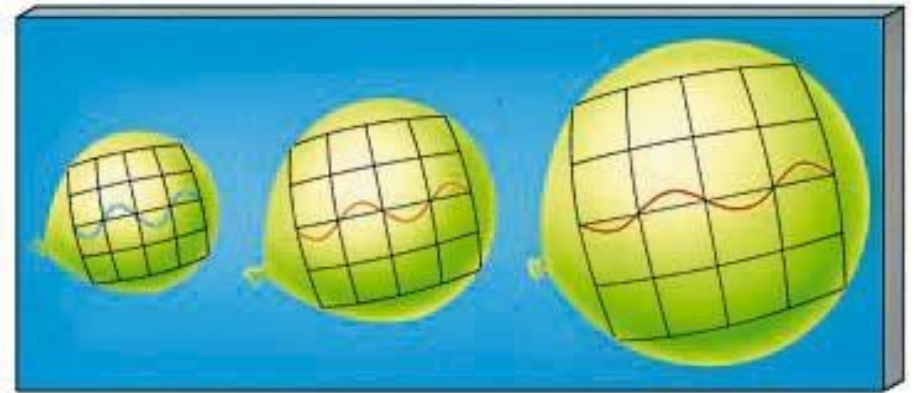
Este seria então o **momento** onde tudo que existe hoje no Universo estaria concentrado. Um “ponto” que teria densidade e temperatura infinitas, a partir do qual começa a expandir...este evento inicial seria considerado então o Big-Bang e **representaria o início da criação da matéria e energia, da criação e expansão do espaço-tempo, da criação das 4 forças da natureza (força fraca, forte, eletromagnética e da gravidade).**

Uma das consequências da expansão do Universo → **Efeito Doppler**

Galáxias “fixas” em um sistema de coordenadas

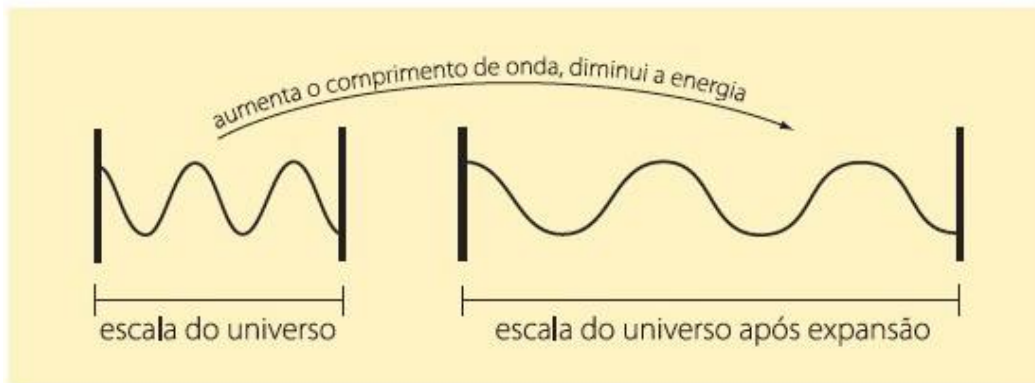


Deslocamento p/ vermelho-**redshift** – **z**, se deve à expansão do Universo que modifica sistematicamente o comprimento de onda da radiação enquanto esta se movimenta pelo espaço



Redshift Cosmológico

Este fenômeno dá origem ao desvio para o vermelho cosmológico.



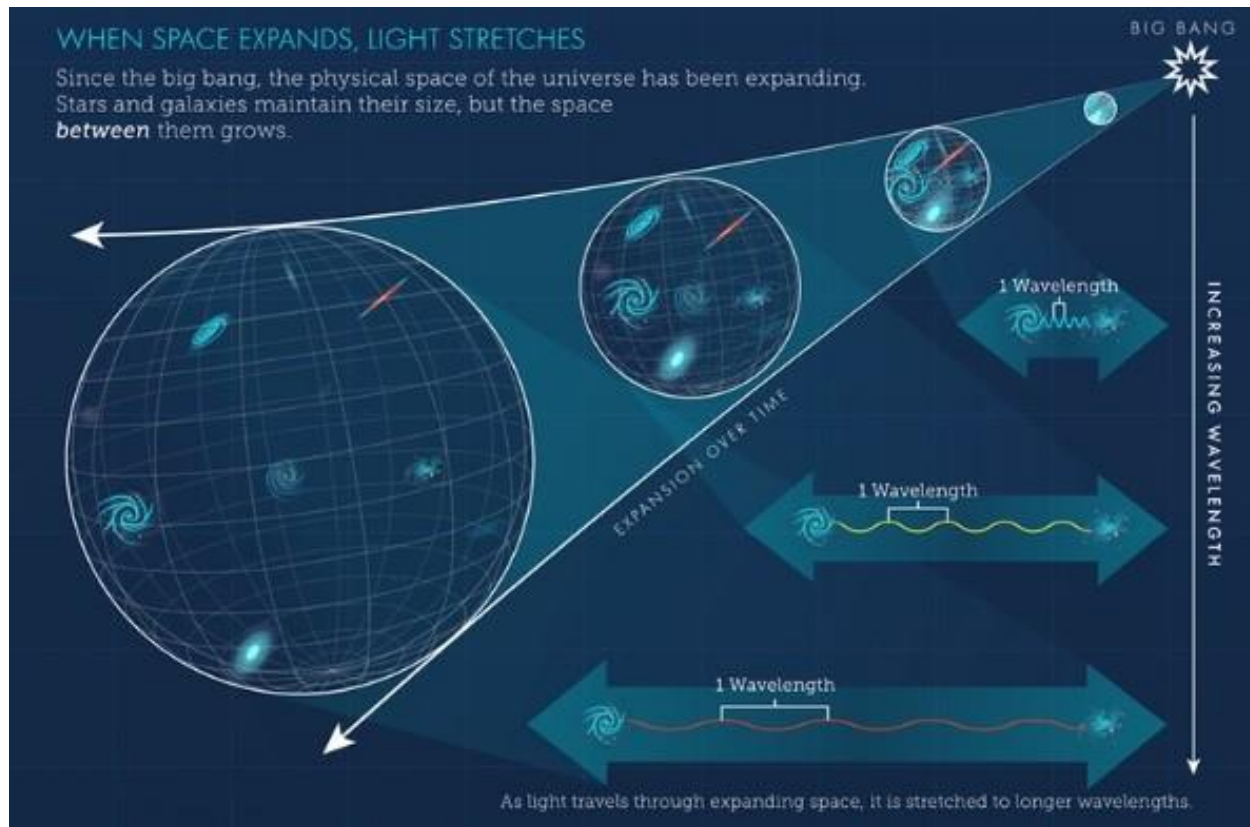
O comprimento de onda da radiação eletromagnética aumenta proporcionalmente a expansão do Universo.

Efeito Doppler cosmológico

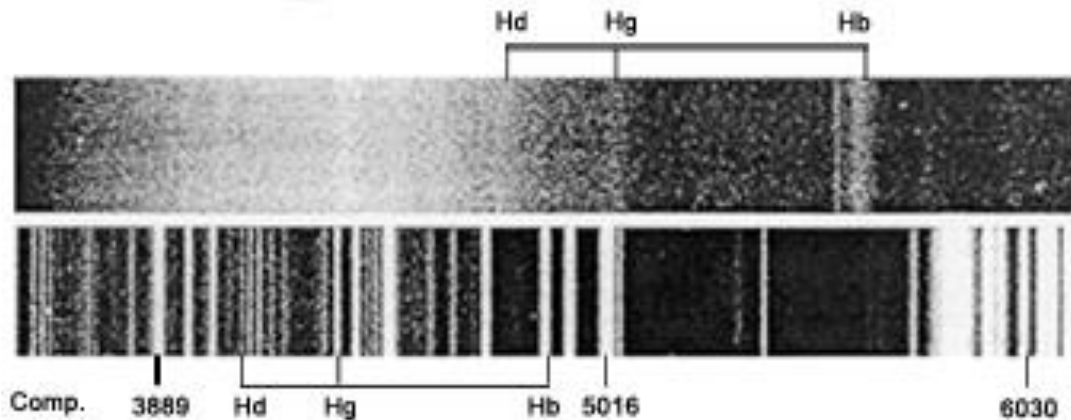
Pelas equações cosmológicas da *Teoria da Relatividade Geral*, as frentes de onda da luz acompanham a expansão do Universo, e o redshift dá o fator de expansão do Universo desde o tempo de emissão da luz t_e até o tempo atual t_0

$$\frac{R(t_0)}{R(t_e)} = (1 + z)$$

$z = 1 \Rightarrow$ o Universo se expandiu um fator $(1+z) = 2$ desde a emissão da luz



Exemplo: o fabulosamente rápido (e distante) quasar 3C273



Maarten Schmidt
(Palomar, 1963)

$z=0.158$ p/ 3C273

$\Rightarrow 47\,400$ km/s

desde a emissão da

Luz, o Universo se
expandiu por 15,3%

$$z = \frac{\text{desvio para o vermelho}}{\text{para o}} = \frac{\text{velocidade da fonte}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{ref fonte}}}{\lambda_{\text{ref fonte}}}$$

$$z = v/c$$

$$c = 300\,000 \text{ km/seg}$$

Válido para v muito menor que c

2a Evidência: O Paradoxo de Olbers: Porque o céu é escuro a noite?

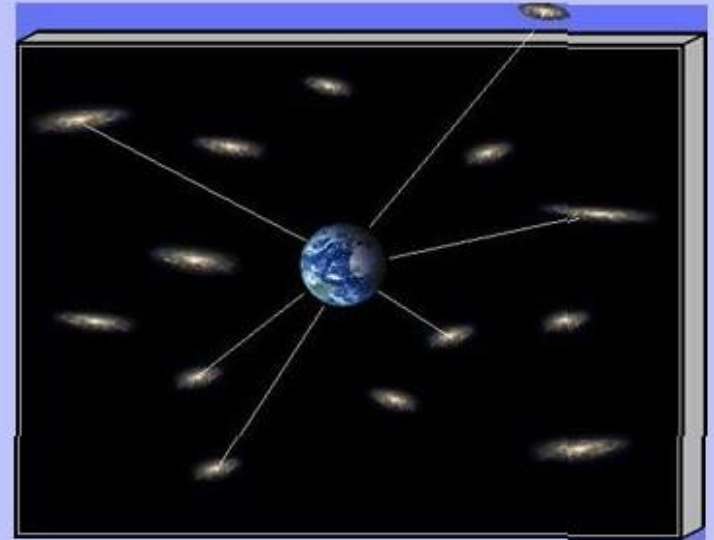
...é um indicativo de que o Universo teve um começo



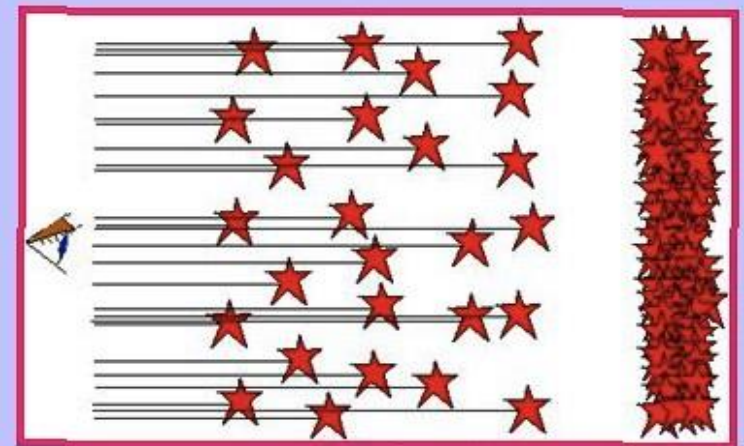
Qual é o paradoxo?

Sendo o Universo homogêneo e isotrópico, infinito em extensão e invariável no tempo, o céu noturno não deveria ser imensamente brilhante?

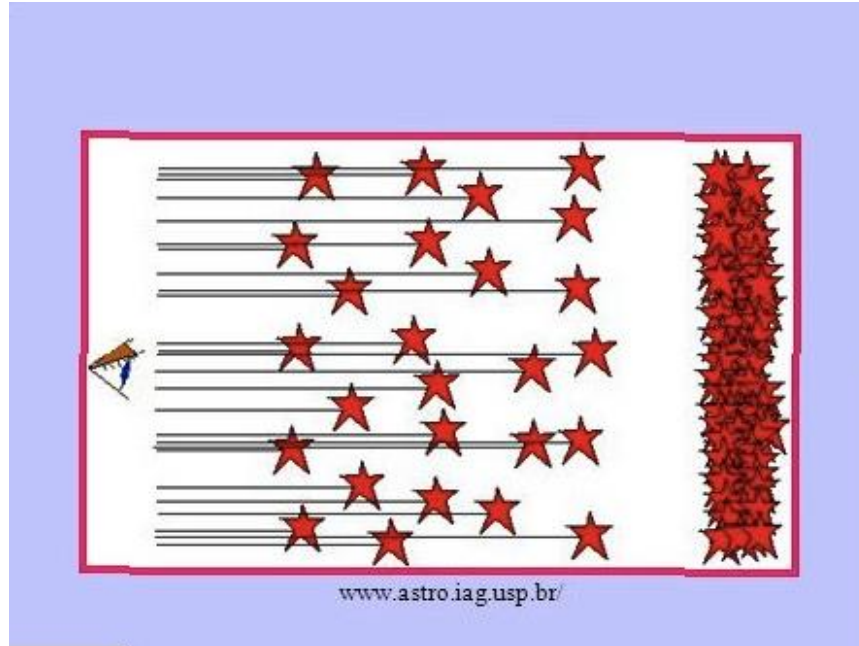
O céu deveria ser tão brilhante quanto a superfície do Sol, pois a linha de visada interceptaria uma estrela em qualquer direção que se olhasse!



physics.uoregon.edu



www.astro.iag.usp.br/



O volume de uma esfera com centro nele aumentara com o quadrado do raio dessa esfera ($dV = 4\pi R^2 dr$).

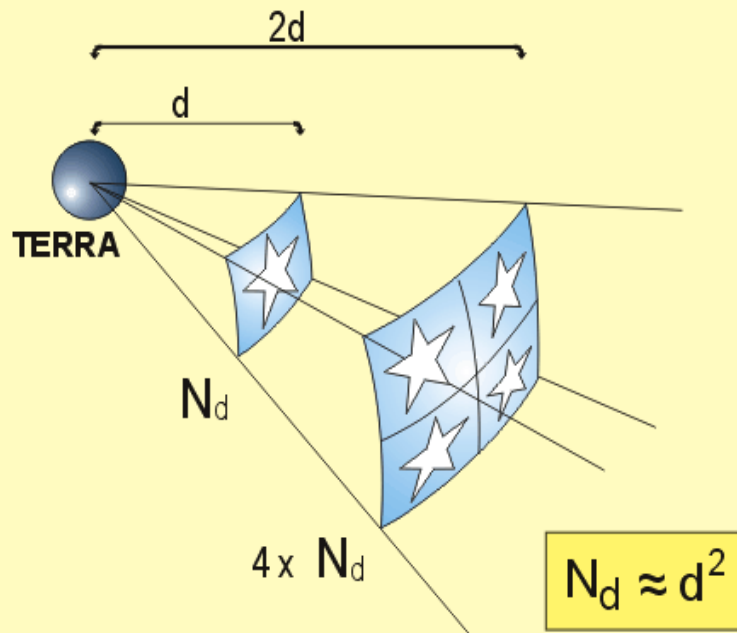
Portanto, a medida que se olha mais longe, vê-se um número de estrelas que cresce com o quadrado da distância. Como resultado, sua linha de visada sempre interceptará uma estrela, seja lá qual for a direção em que ele olhe.

Porque ?

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

**Se o Universo é infinito e eterno (e com uma densidade de estrelas ±uniforme),
então todas as linhas de visão deveriam terminar na superfície de uma estrela.**

Num Universo homogêneo em larga escala, a quantidade de estrelas (N_d) a uma distância d é proporcional ao quadrado dessa distância.



Formalmente:

Cada camada contribui com n° estrelas $\sim r^2$

A luz diminui de intensidade com $\sim 1/r^2$

Contribuição de luz de cada camada = constante

O Céu deveria ser cheio de luz

Consequência:

Universe não existiu sempre, ou ...

Universo tem um tamanho finito, ou ...

Ambos!

Possíveis explicações para o Paradoxo

1. A poeira interestelar absorve a luz das estrelas;

Foi a solução proposta por Olbers, mas tem um problema... Com o passar do tempo, a medida que fosse absorvendo radiação, a poeira entraria em equilíbrio térmico com as estrelas e passaria a brilhar tanto quanto elas. ...Não ajuda, portanto, na solução.

2. A expansão do universo degrada a energia, de forma que a luz de objetos muito distantes chega muito desviada para o vermelho e, portanto, muito fraca.

O desvio para o vermelho ajuda na solução, pois o desvio é proporcional ao “raio do Universo observável”, mas os cálculos mostram que a degradação da energia pela expansão do Universo não é suficiente para resolver o paradoxo.

3. Estrelas são finitas... mesmo assim existem em número suficiente para fazer todo o céu brilhar

4. O Universo não existiu por todo o sempre. É a hipótese que parece correta!....Pq?

Sabemos que a luz tem uma velocidade finita, o que significa que ela leva um tempo para ir de um lugar a outro, e portanto, quanto maior a distância que olhamos, mais remoto o passado que vemos.

Possíveis explicações para o Paradoxo

Se o Universo tem idade finita, já que não é eterno pois temos evidência de que surgiu a 13,7 bilhões de anos atrás, e além disto a luz tem uma velocidade finita (300.000 km/s), a luz das estrelas mais distantes **ainda não teve tempo de chegar até nós.**

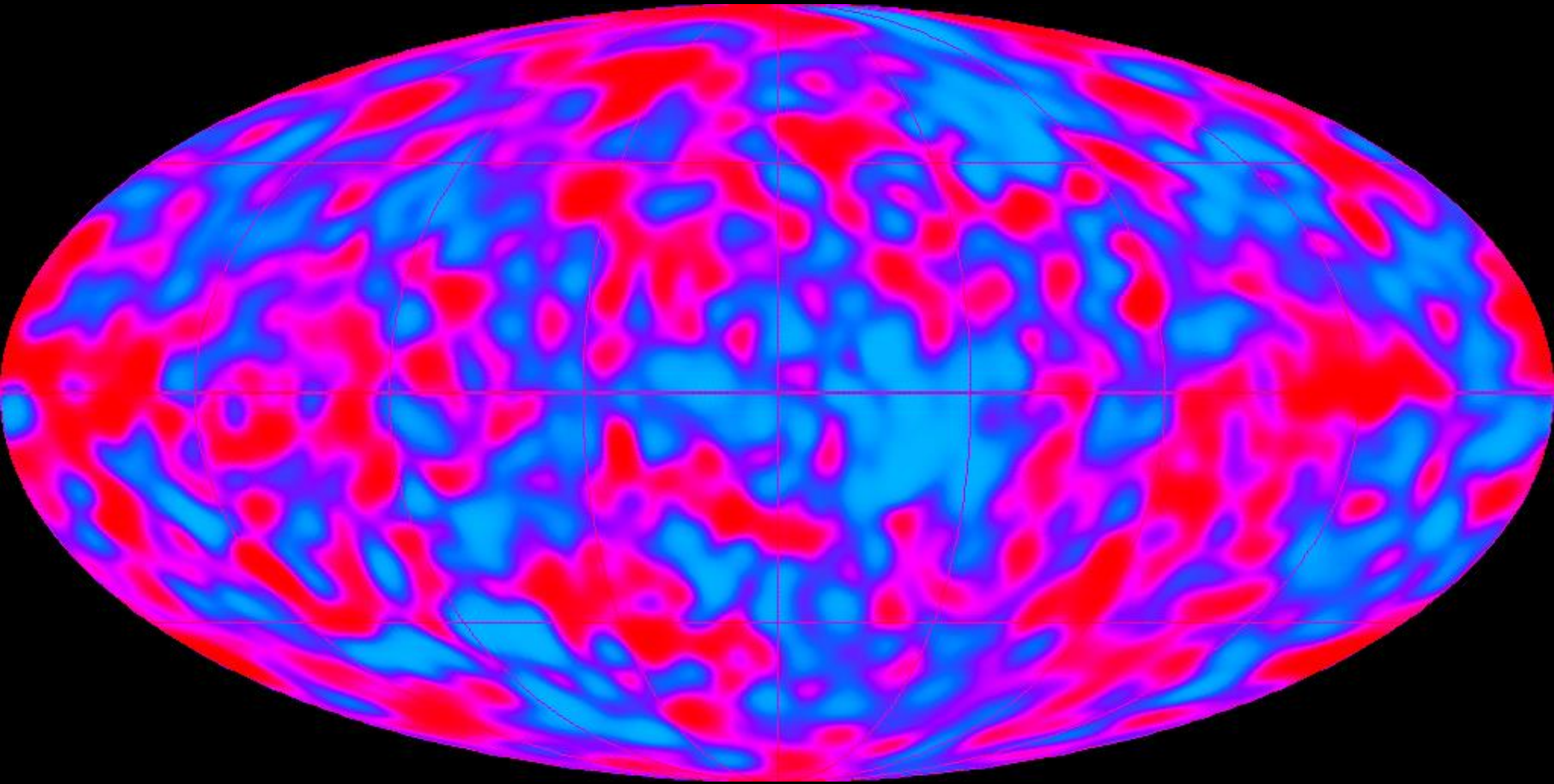
Assim, a idade do Universo limita a distância que podemos ver....e o Universo que enxergamos é limitado no espaço, por ser finito no tempo.

A velocidade finita da luz, aliada à idade finita do Universo, limita a porção do Universo que podemos ver, pois nós não podemos ver mais longe do que a distância que a luz pode percorrer no tempo igual à idade do universo.

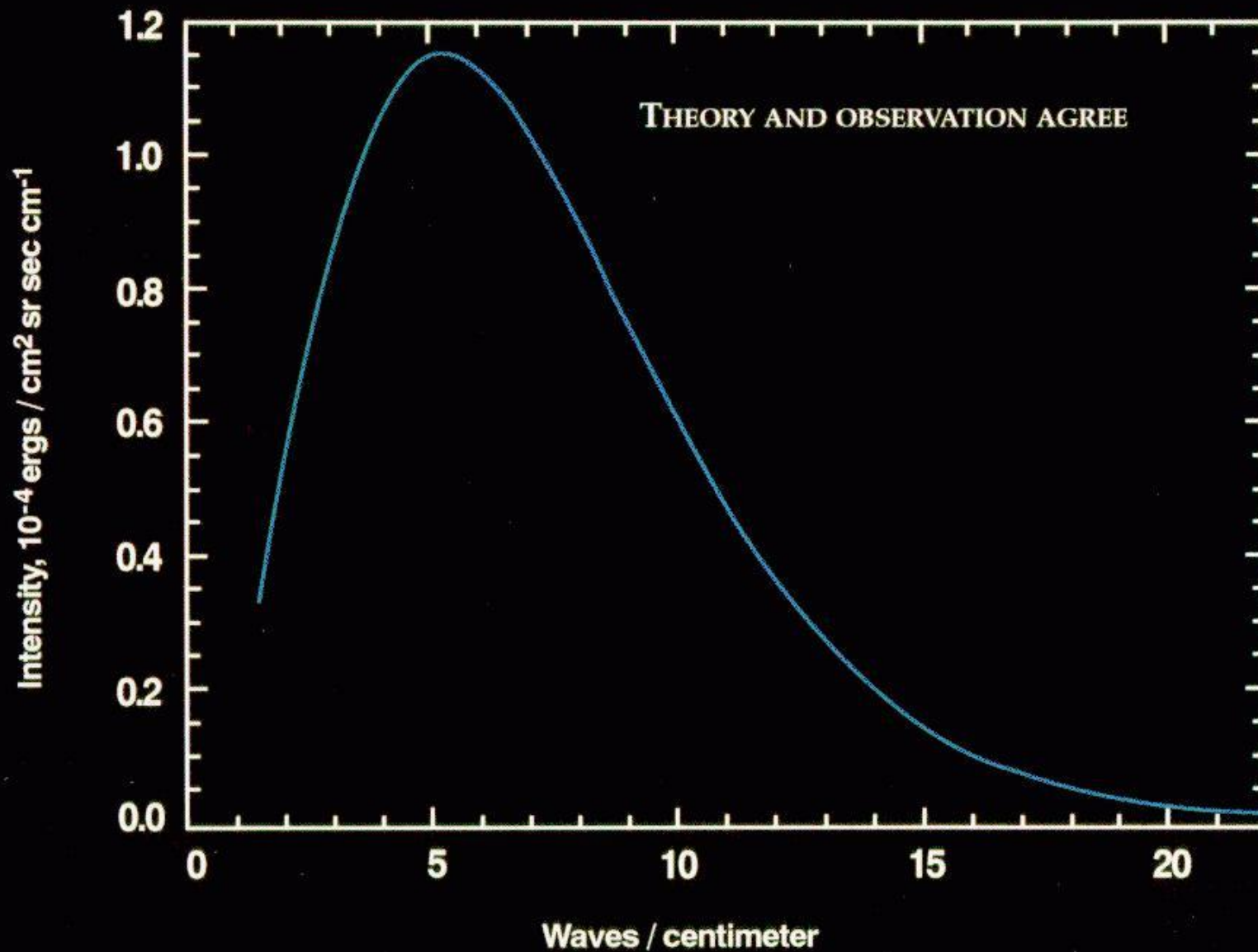
Se o Universo tem 13,7 bilhões de anos de idade então a luz de galáxias mais distantes do que 13,7 bilhões de anos-luz não teve tempo de nos alcançar.então....

A escuridão da noite seria um indício de que o Universo teve um início - não é eterno, nem infinito...

3a Evidência: Radiação de Fundo Cósmica

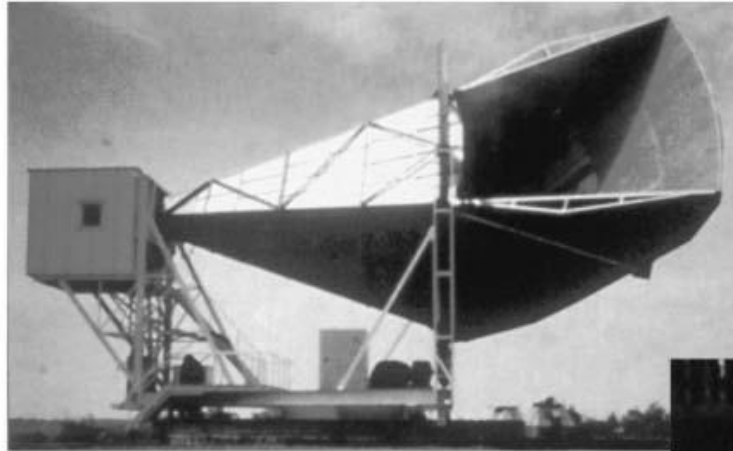


COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE



T=2,725 K

Descoberta da Radiação de Fundo Cósmica

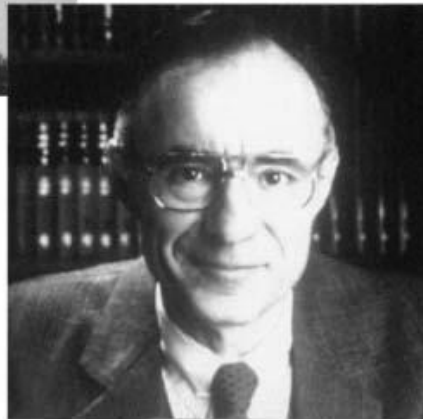


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

Descoberta:
1964/1965

Prêmio Nobel:
1978



The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"

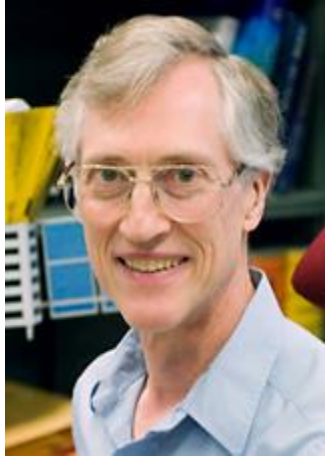


Photo: NASA

John C. Mather

1/2 of the prize

USA

NASA Goddard
Space Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946



Photo: Berkeley

George F. Smoot

1/2 of the prize

USA

University of
California
Berkeley, CA, USA

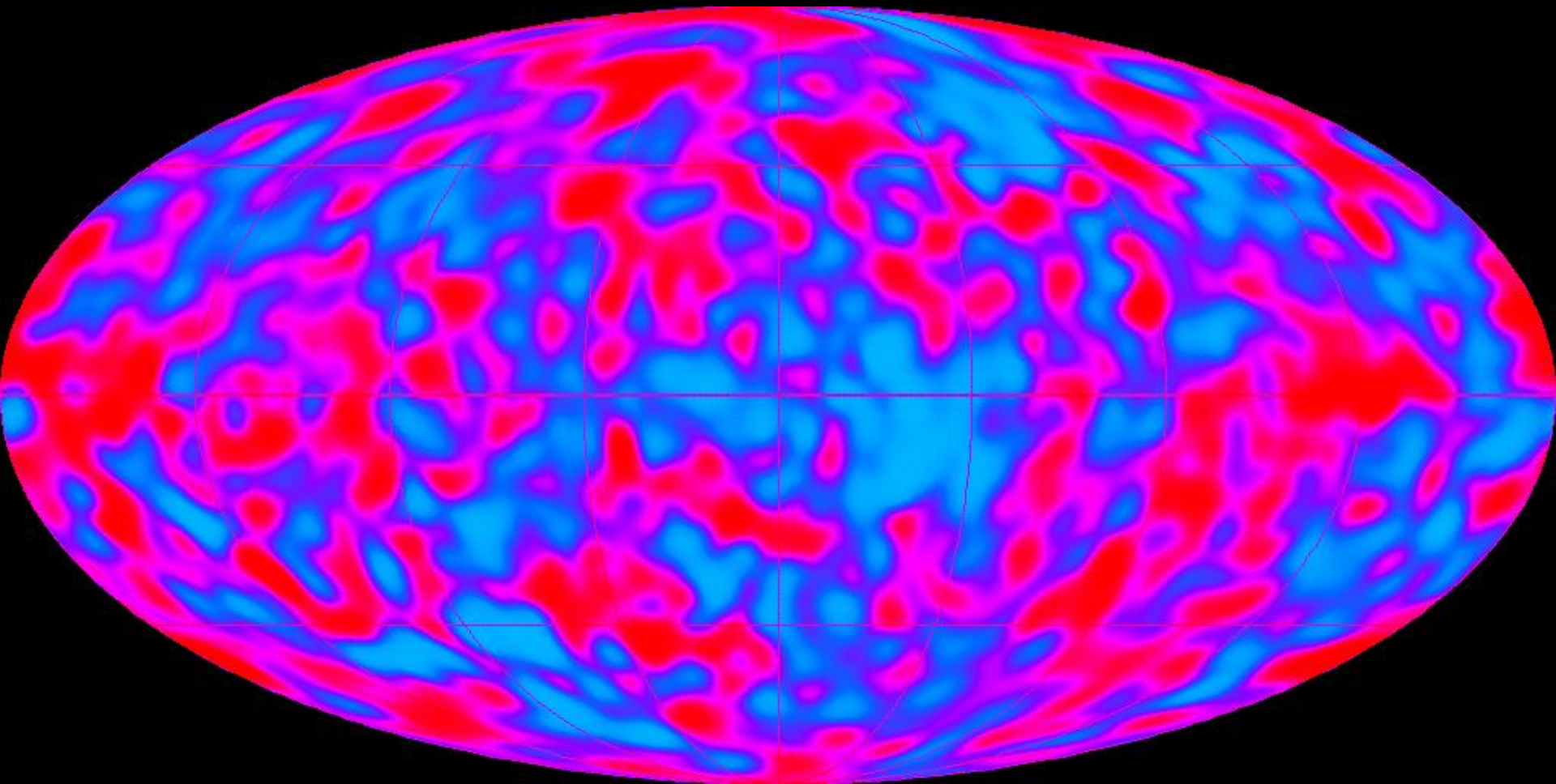
b. 1945

Satélite COBE

Lançamento: 1992



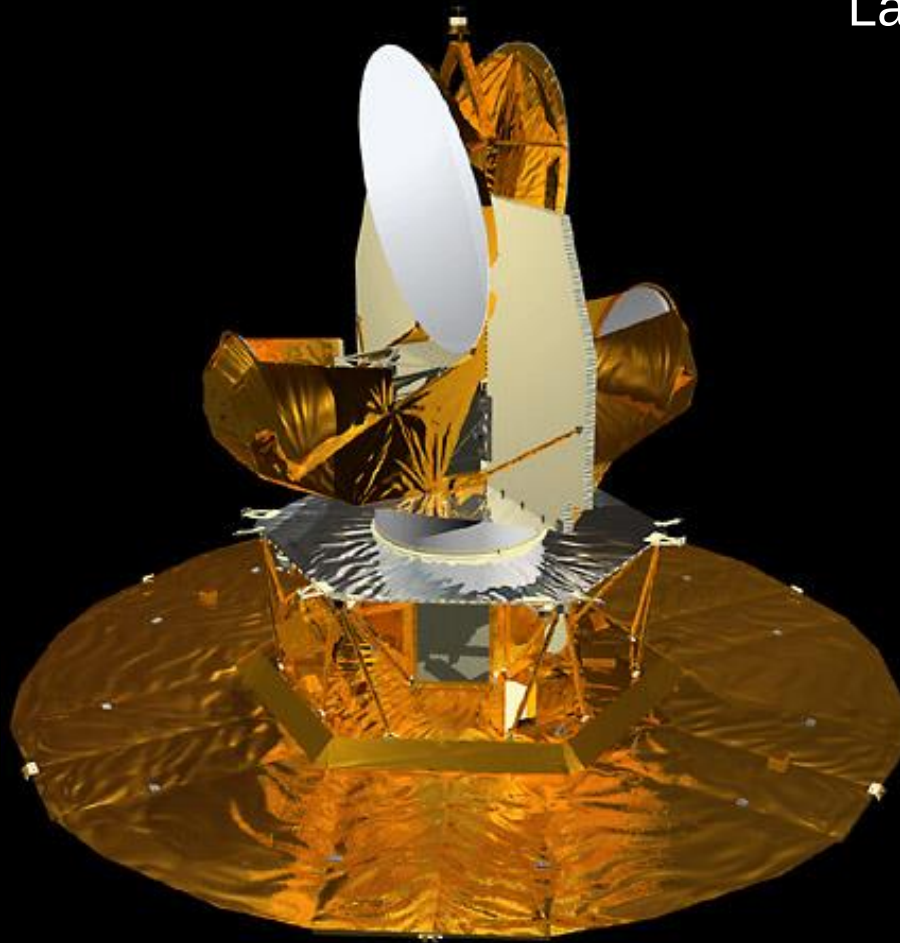
Resultados do COBE



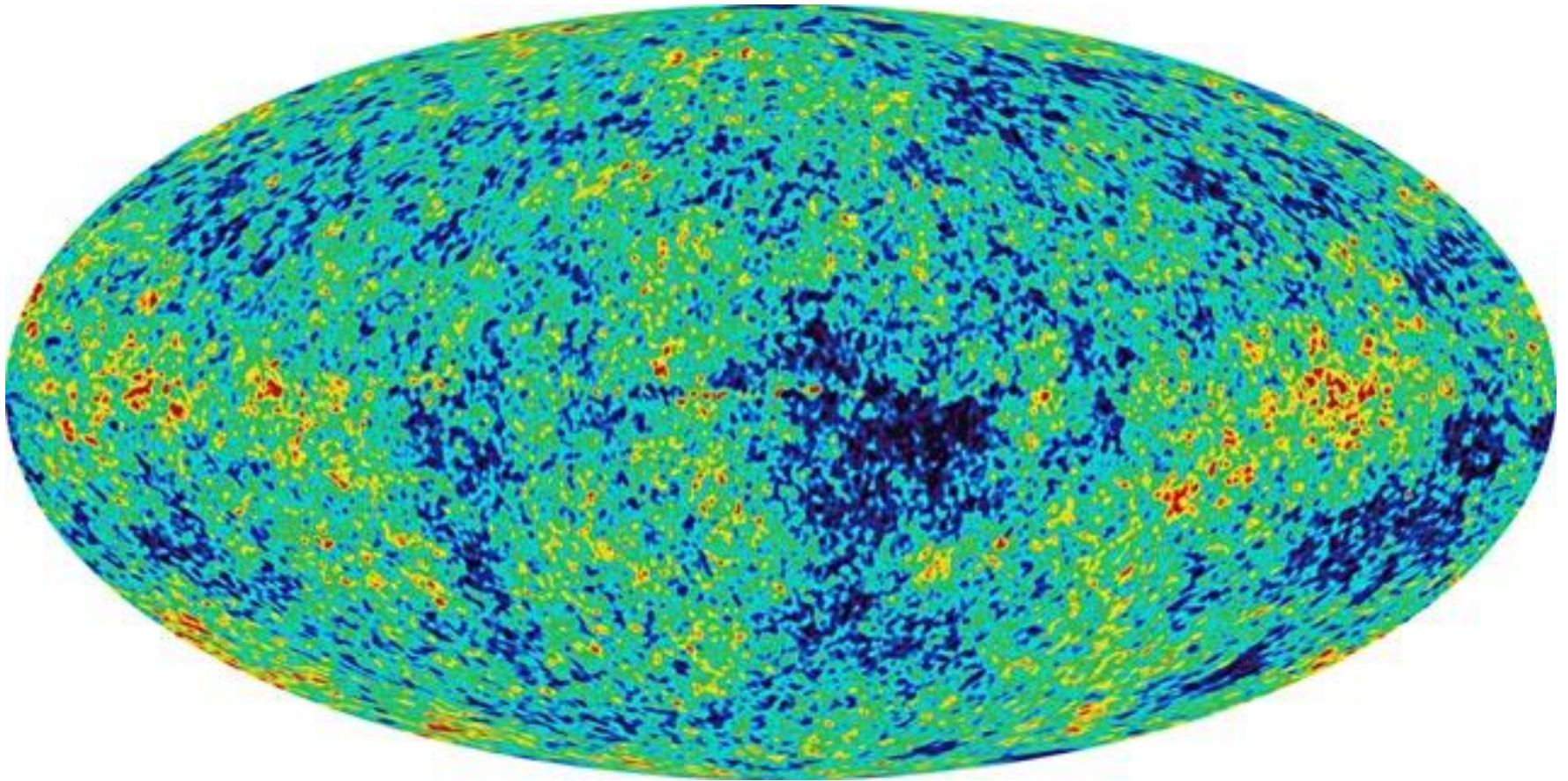
1996 (quatro anos)

Satélite WMAP

Lançamento: 2002

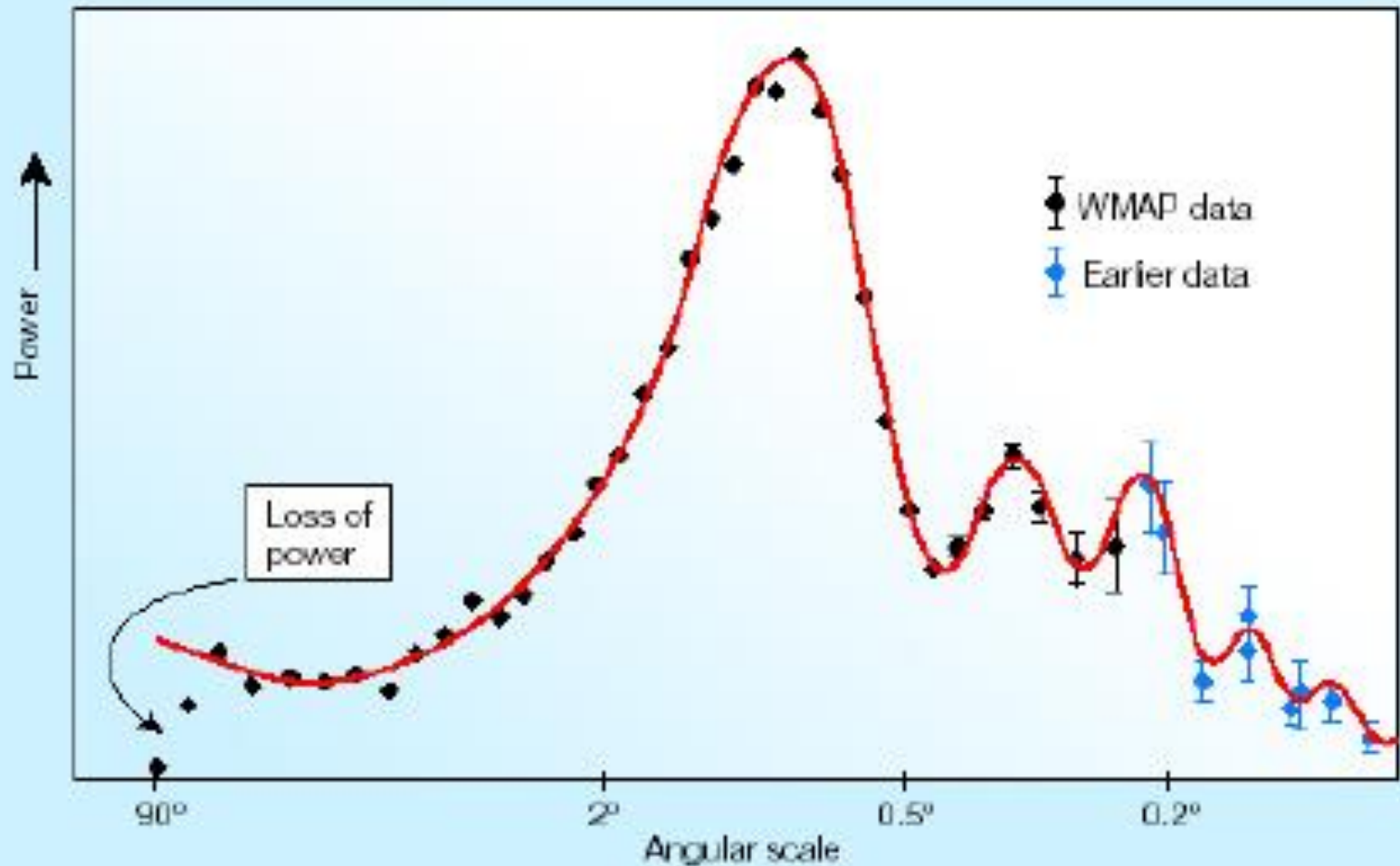


Resultados do WMAP

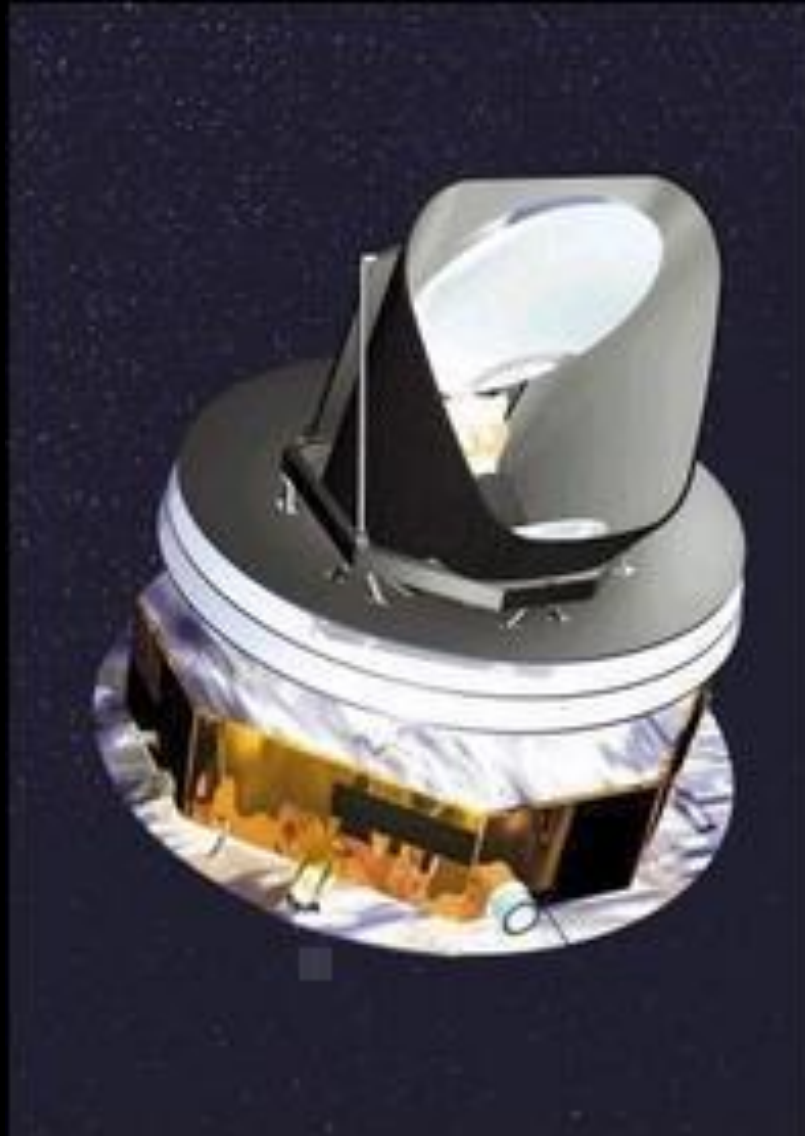


2003 (1 ano)

WMAP Anisotropy MAP



Satélite Planck



Lançamento: 2009

Resultados esperados do Planck

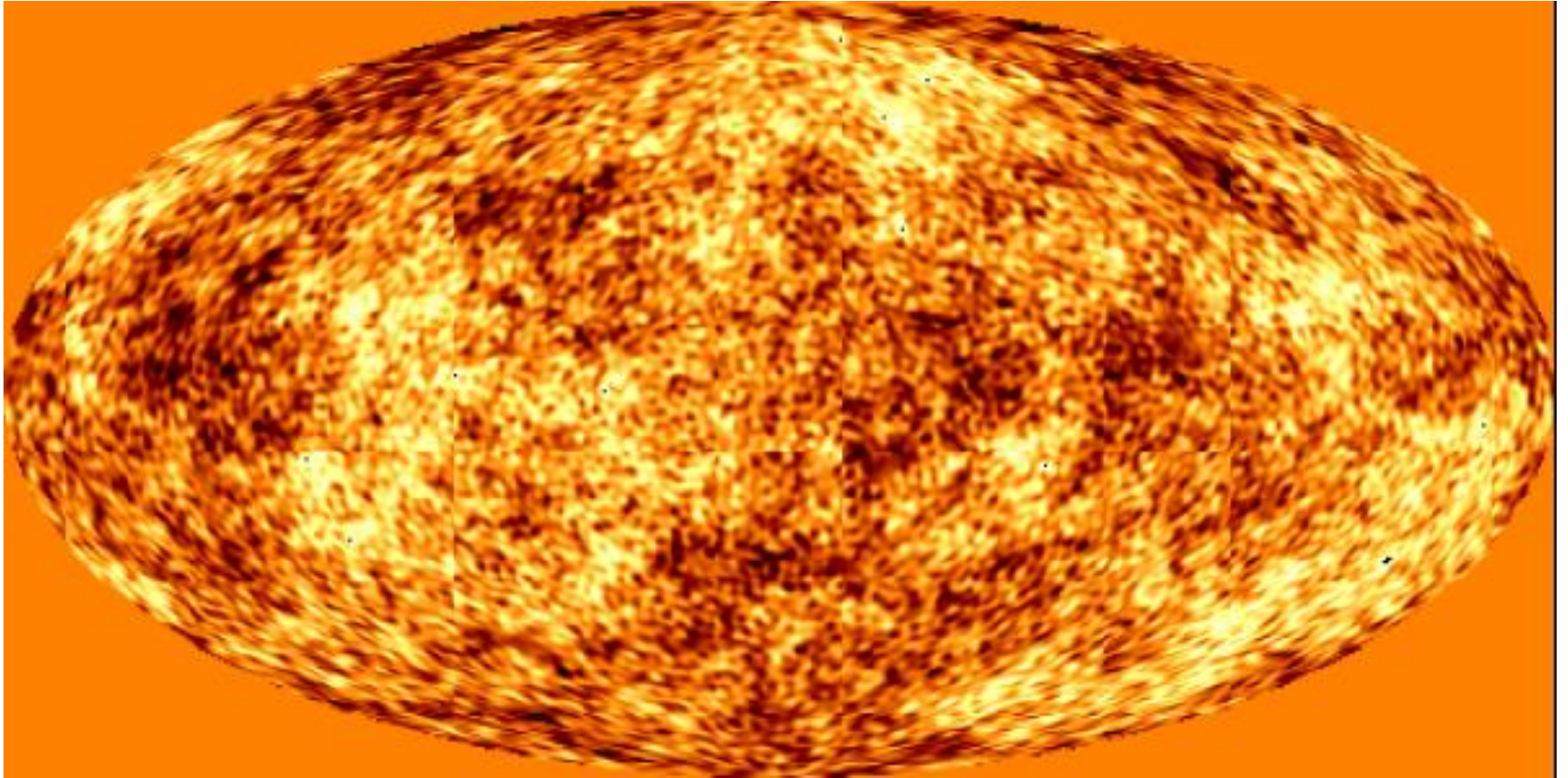
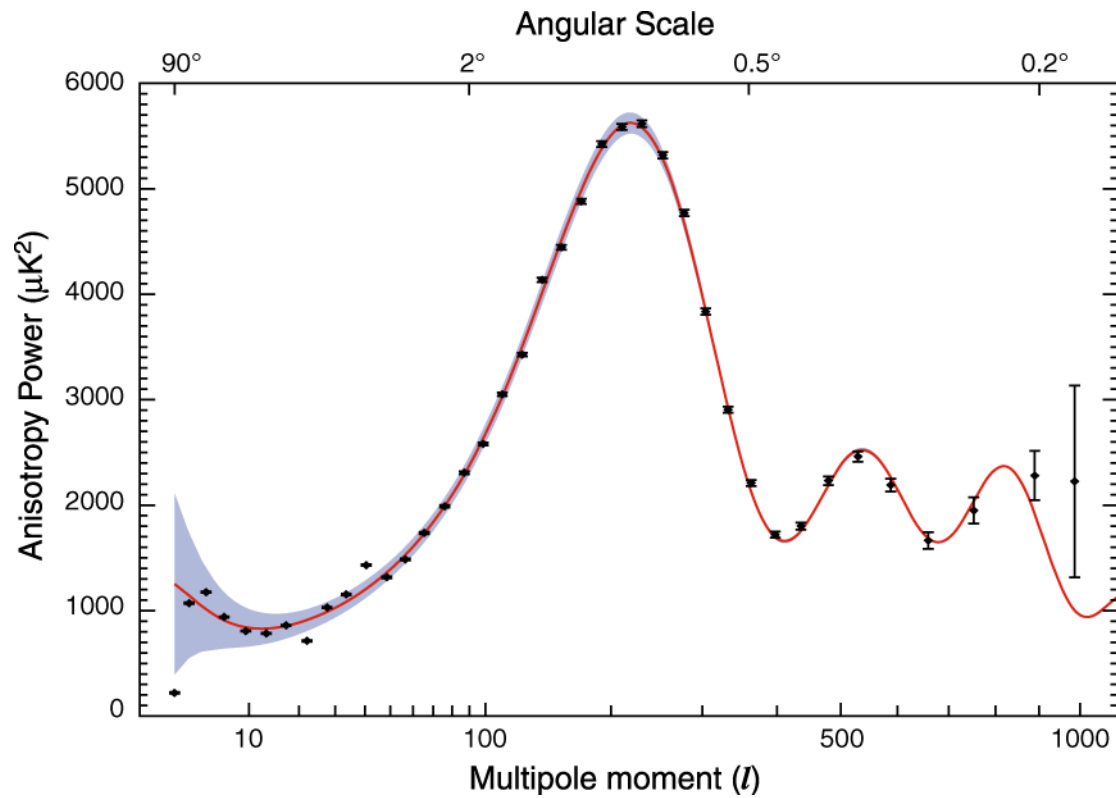


Table 3. “Best” Cosmological Parameters

Description	Symbol	Value	+ uncertainty	− uncertainty
Total density	Ω_{tot}	1.02	0.02	0.02
Equation of state of quintessence	w	< -0.78	95% CL	—
Dark energy density	Ω_Λ	0.73	0.04	0.04
Baryon density	$\Omega_b h^2$	0.0224	0.0009	0.0009
Baryon density	Ω_b	0.044	0.004	0.004
Baryon density (cm^{-3})	n_b	2.5×10^{-7}	0.1×10^{-7}	0.1×10^{-7}
Matter density	$\Omega_m h^2$	0.135	0.008	0.009
Matter density	Ω_m	0.27	0.04	0.04
Light neutrino density	$\Omega_\nu h^2$	< 0.0076	95% CL	—
CMB temperature (K) ^a	T_{cmb}	2.725	0.002	0.002
CMB photon density (cm^{-3}) ^b	n_γ	410.4	0.9	0.9
Baryon-to-photon ratio	η	6.1×10^{-10}	0.3×10^{-10}	0.2×10^{-10}
Baryon-to-matter ratio	$\Omega_b \Omega_m^{-1}$	0.17	0.01	0.01
Fluctuation amplitude in $8h^{-1}$ Mpc spheres	σ_8	0.84	0.04	0.04
Low- z cluster abundance scaling	$\sigma_8 \Omega_m^{0.5}$	0.44	0.04	0.05
Power spectrum normalization (at $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$) ^c	A	0.833	0.086	0.083
Scalar spectral index (at $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$) ^c	n_s	0.93	0.03	0.03
Running index slope (at $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$) ^c	$dn_s/d \ln k$	−0.031	0.016	0.018
Tensor-to-scalar ratio (at $k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$)	r	< 0.90	95% CL	—
Redshift of decoupling	z_{dec}	1089	1	1
Thickness of decoupling (FWHM)	Δz_{dec}	195	2	2
Hubble constant	h	0.71	0.04	0.03
Age of universe (Gyr)	t_0	13.7	0.2	0.2
Age at decoupling (kyr)	t_{dec}	379	8	7
Age at reionization (Myr, 95% CL))	t_r	180	220	80
Decoupling time interval (kyr)	Δt_{dec}	118	3	2
Redshift of matter-energy equality	z_{eq}	3233	194	210
Reionization optical depth	τ	0.17	0.04	0.04
Redshift of reionization (95% CL)	z_r	20	10	9
Sound horizon at decoupling (^a)	θ_A	0.598	0.002	0.002
Angular size distance (Gpc)	d_A	14.0	0.2	0.3
Acoustic scale ^d	ℓ_A	301	1	1
Sound horizon at decoupling (Mpc) ^d	r_s	147	2	2

^afrom COBE (Mather et al. 1999)^bderived from COBE (Mather et al. 1999)^c $l_{\text{eff}} \approx 700$ ^d $\ell_A \equiv \pi \theta_A^{-1}$ $\theta_A \equiv r_s d_A^{-1}$

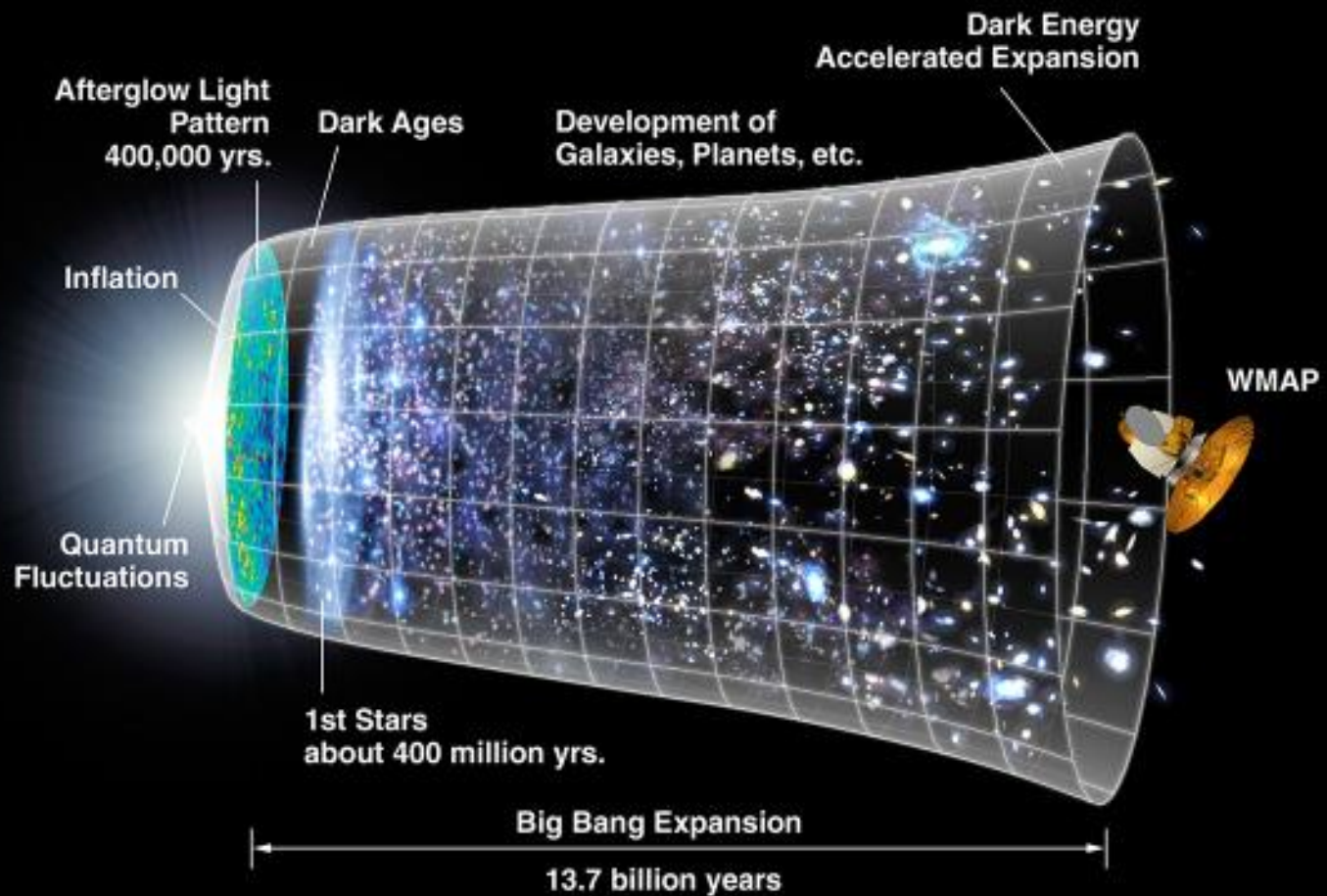
O Timbre do Universo



ECOS

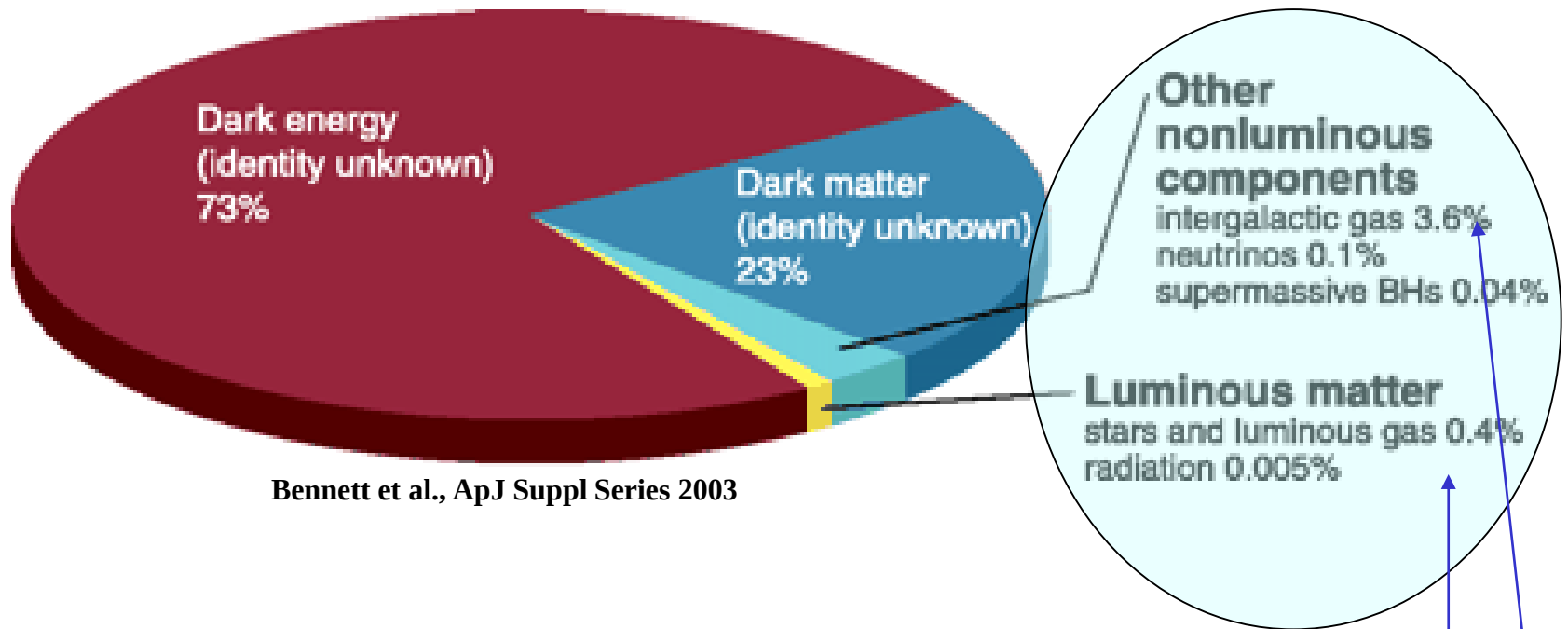
Eduardo Galeano

Soava como o zumbido dos mosquitos no verão, mas não era verão. Naquela noite de 1964, Arno Penzias e Robert Wilson não conseguiam trabalhar tranquilos. De uma montanha de Nova Jersey, os dois astrônomos tratavam de medir as ondas emitidas por alguma galáxia, mas a antena captava um zumbido que não os deixava em paz. O zumbido atormentava os ouvidos, como ocorre quando as fêmeas dos mosquitos, famintas, enlouquecidas pelo calor, chamam os seus machos e acossam as pessoas. Depois, soube-se. Por incrível que possa parecer, o zumbido era o eco da tremenda explosão que havia dado origem ao universo, há quinze bilhões de anos, um dia mais, um dia menos. Aquela vibração da antena não vinha das fêmeas dos mosquitos, mas de um estouro que havia fundado o tempo e o espaço e os astros e o resto. E talvez, quem sabe, digo eu, supondo, o eco ainda estivesse ali, ressoando, zumbindo no ar, porque queria ser escutado por nós, terrestres pessoinhas, que no fim das contas também somos ecos daquele remoto pranto do universo recém nascido.



Do que é feito o Universo?

A Receita do Universo

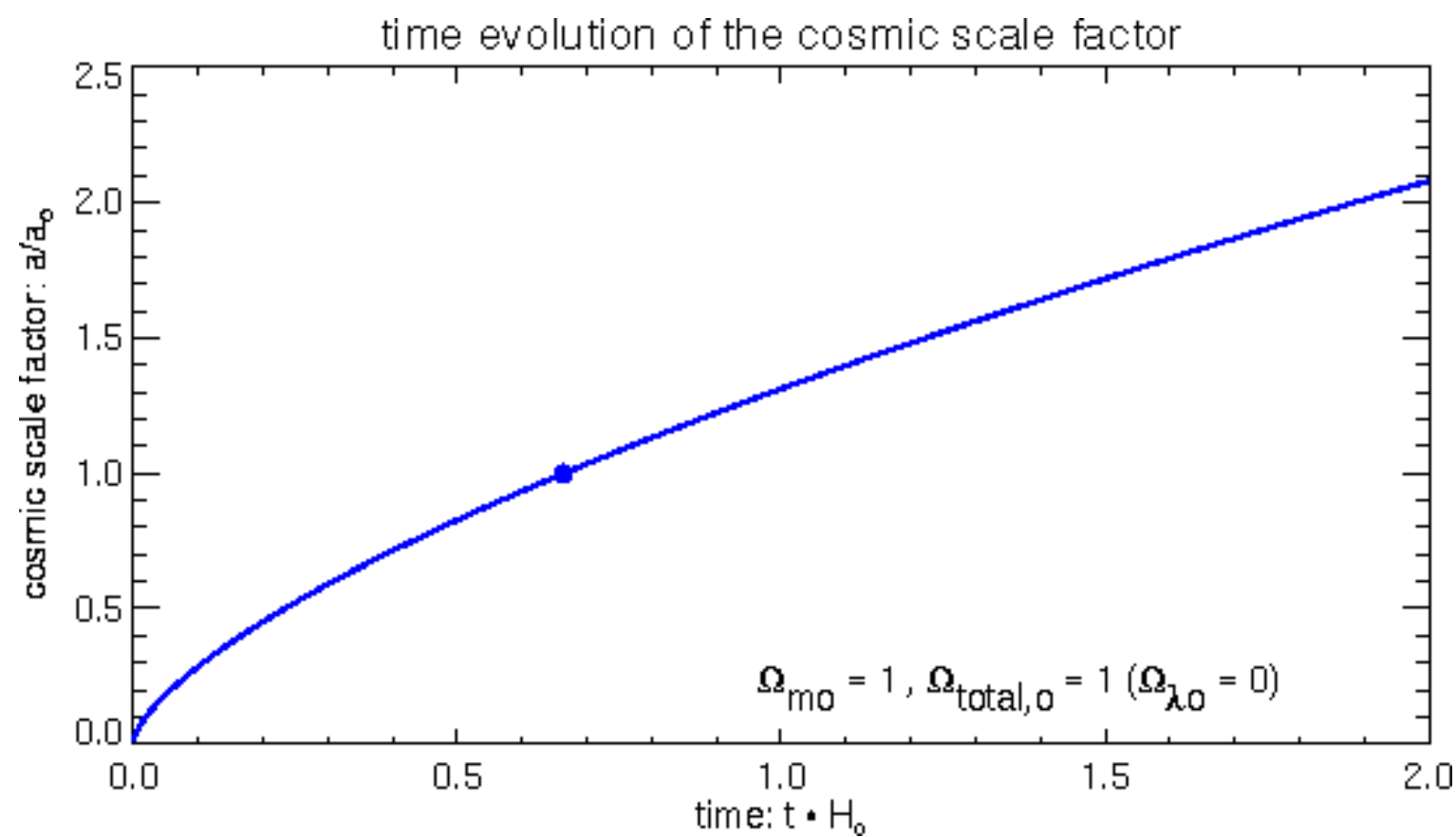


$$\Omega_b = 0.04 \Omega_T$$

Life building blocks come from these components...

A densidade do Universo

- Equações da Relatividade Geral
- Suposições:
 - Universo homogêneo
 - Universo isotrópico
- Densidade crítica: $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$
 $\rho_c = 2.3 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ ($\equiv 1.4$ átomos de H por m^3)
para $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$
- Parâmetro de densidade: $\Omega = \rho/\rho_c$
 - $\Omega < 1$ espaço hiperbólico
 - $\Omega = 1$ espaço plano
 - $\Omega > 1$ espaço esférico



Do que é feito o Universo?

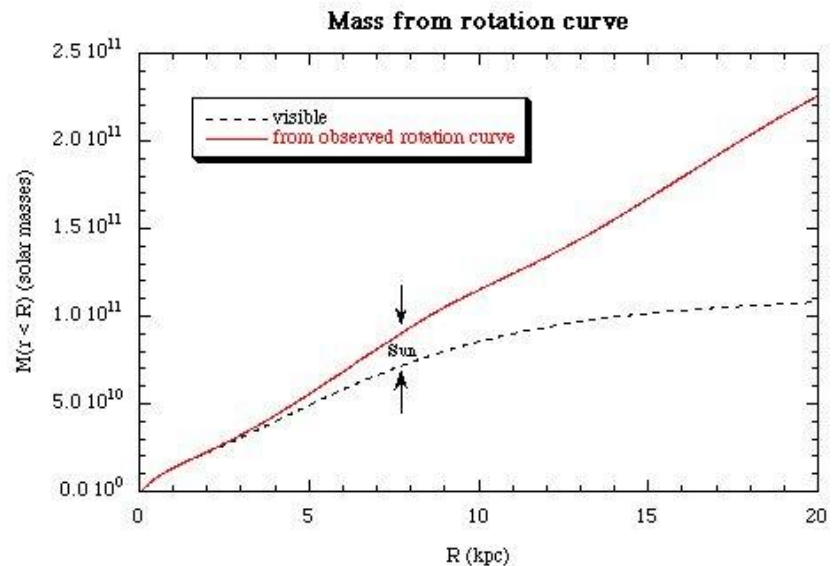
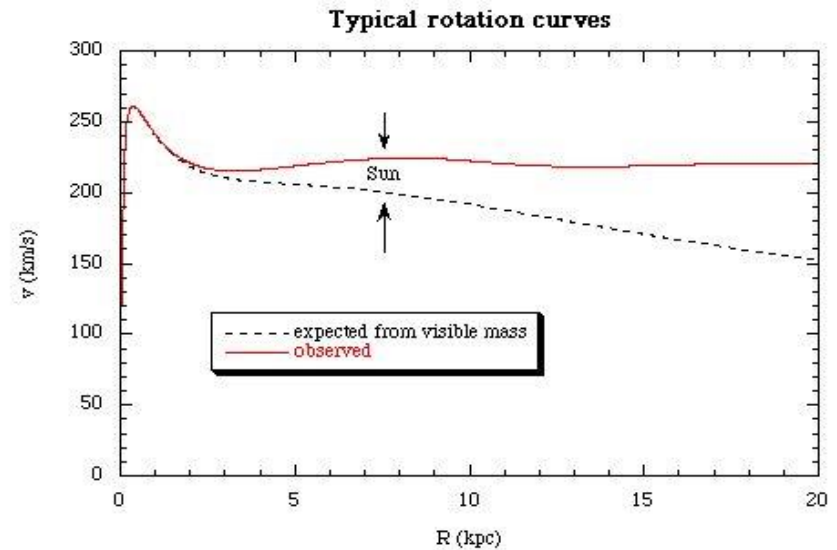
Falta alguma coisa:

Matéria Escura

- Matéria luminosa:
 - Estrelas
 - Gás
- Evidências da matéria escura:
 - Curvas de rotação de galáxias
 - Dispersão de velocidades em aglomerados de galáxias
 - Lentes gravitacionais
 - Halos quentes em raios-X

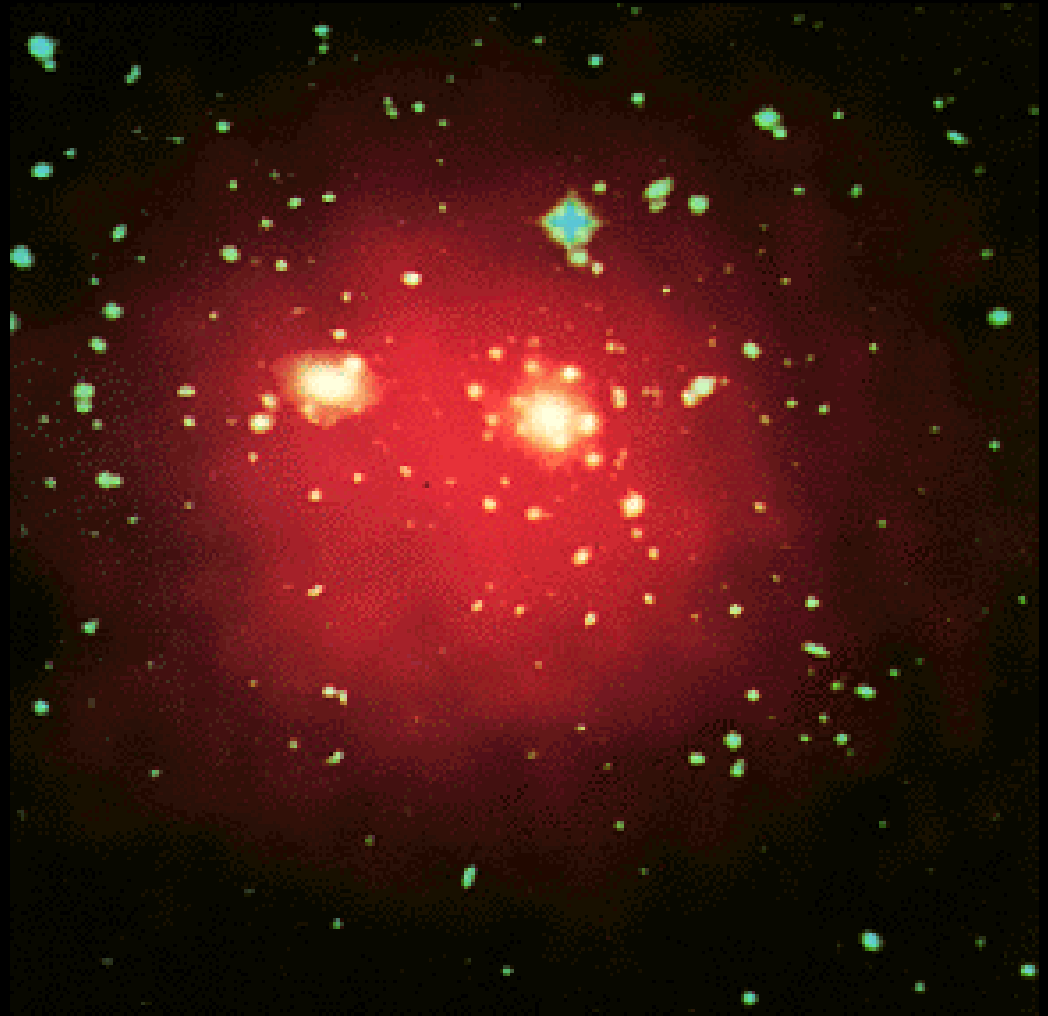
Curvas de Rotação de Galáxias

- Galáxias espirais:
Lei de Kepler:
 $GM/r^2 = v^2/r$
- Ao se englobar a massa visível, a velocidade decresceria
- Mas a curva de rotação é plana!
⇒ Halo Escuro
- Massa escura
= $10 \times$ massa luminosa



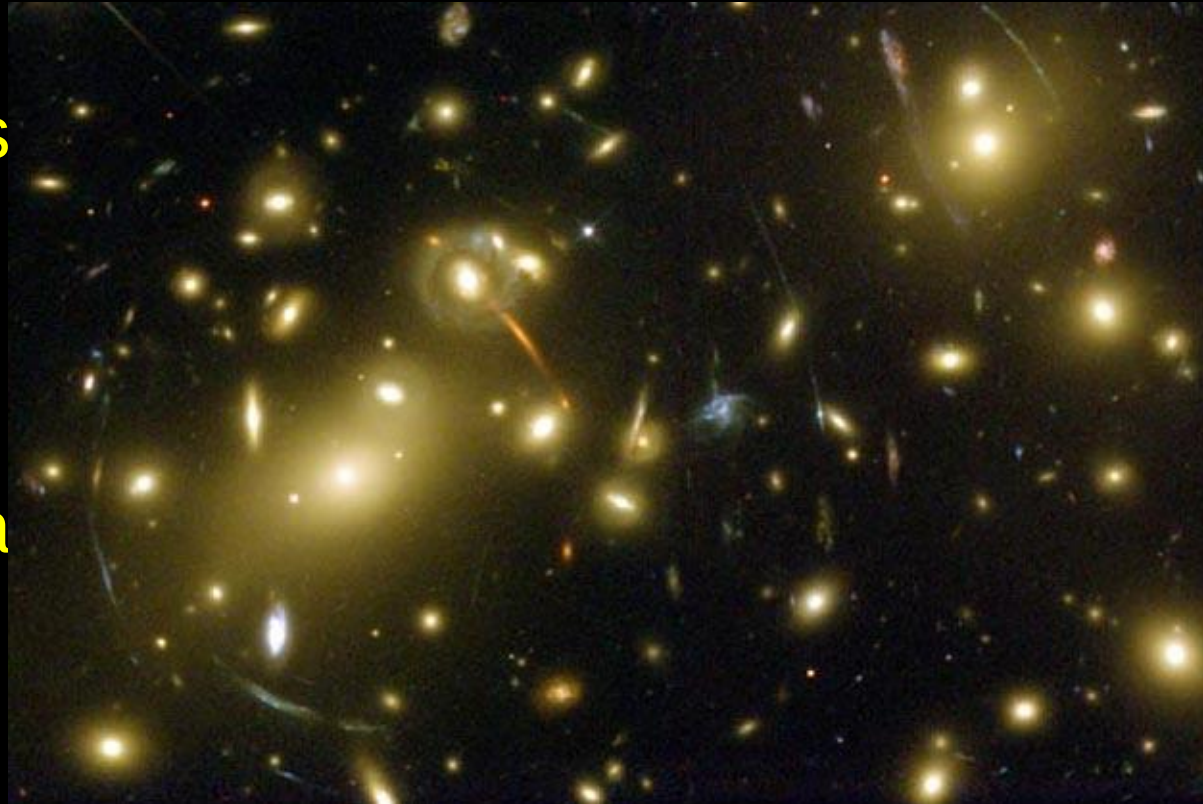
Aglomerados de Galáxias

- Primeira Evidência (Zwicky 1933)
- Teorema do Virial
$$2KE + PE = 0$$
onde
$$KE = \frac{1}{2}M\langle V^2 \rangle$$
$$PE = GM\langle 1/R \rangle$$
- Massa escura =
 $60 \times$ massa
luminosa



Lentes Gravitacionais

- Aglomerados de galáxias e galáxias como lentes
- Um efeito da Relatividade Geral
- Medida mais direta da massa
- Telescópios cósmicos

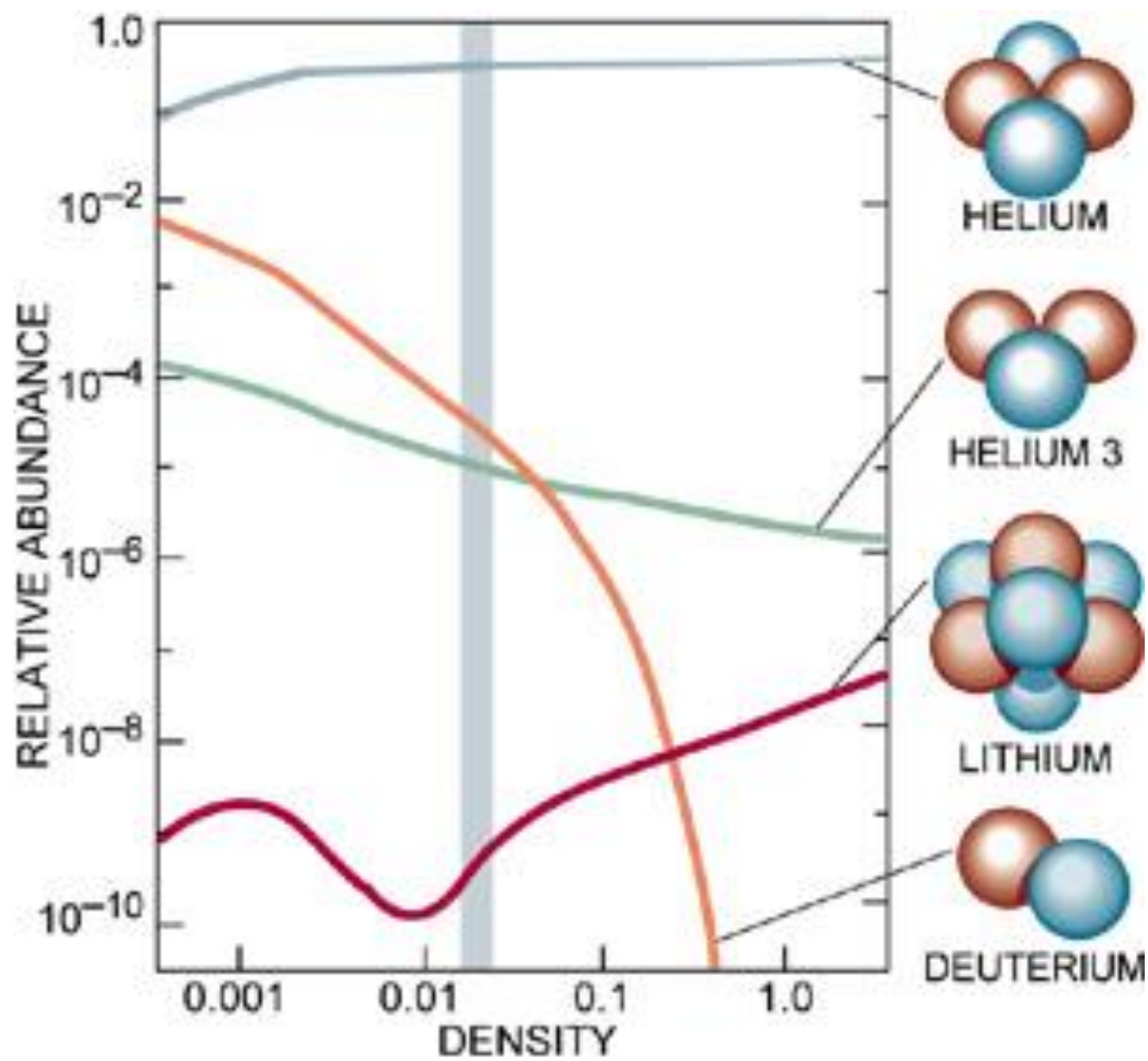


Pesando o Universo: determinação de Ω

- Determinações globais:
 - Expansão do universo
 - Nucleo-síntese primordial
- Procedimentos:
 - Objetos individuais (espirais, aglomerados...)
 - Propriedades globais do Universo
 - Radiação de fundo cósmica
- Componentes de Ω
$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_{\text{b}} + \Omega_{\text{dm}} + \Omega_{\Lambda} = \Omega_{\text{mat}} + \Omega_{\Lambda}$$
- Inflação $\Rightarrow \Omega_{\text{tot}} = 1$

A densidade do Universo a partir da Nucleossíntese Primordial

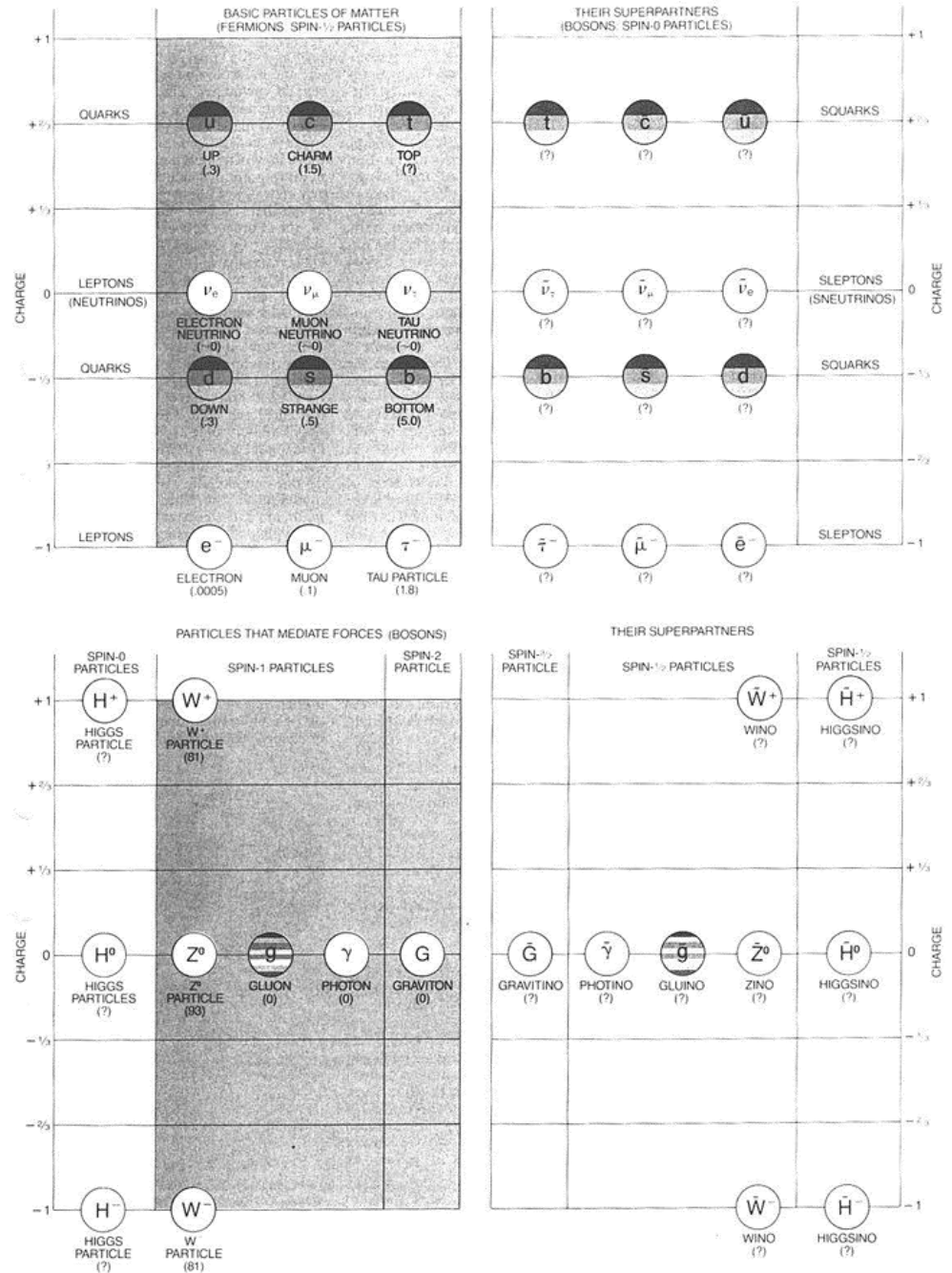
- Durante o Big Bang são produzidos uns poucos elementos leves D, ^3He , ^4He , ^7Li
- A proporção destes elementos permite que se determine a densidade de bárions no Universo
- O valor obtido é $\Omega_b = 0.04$
- Se $\Omega_{\text{mat}} = 0.27$, então o restante $\Omega_{\text{dm}} = 0.23$ é matéria escura não-bariônica



Qual a natureza da Matéria Escura?

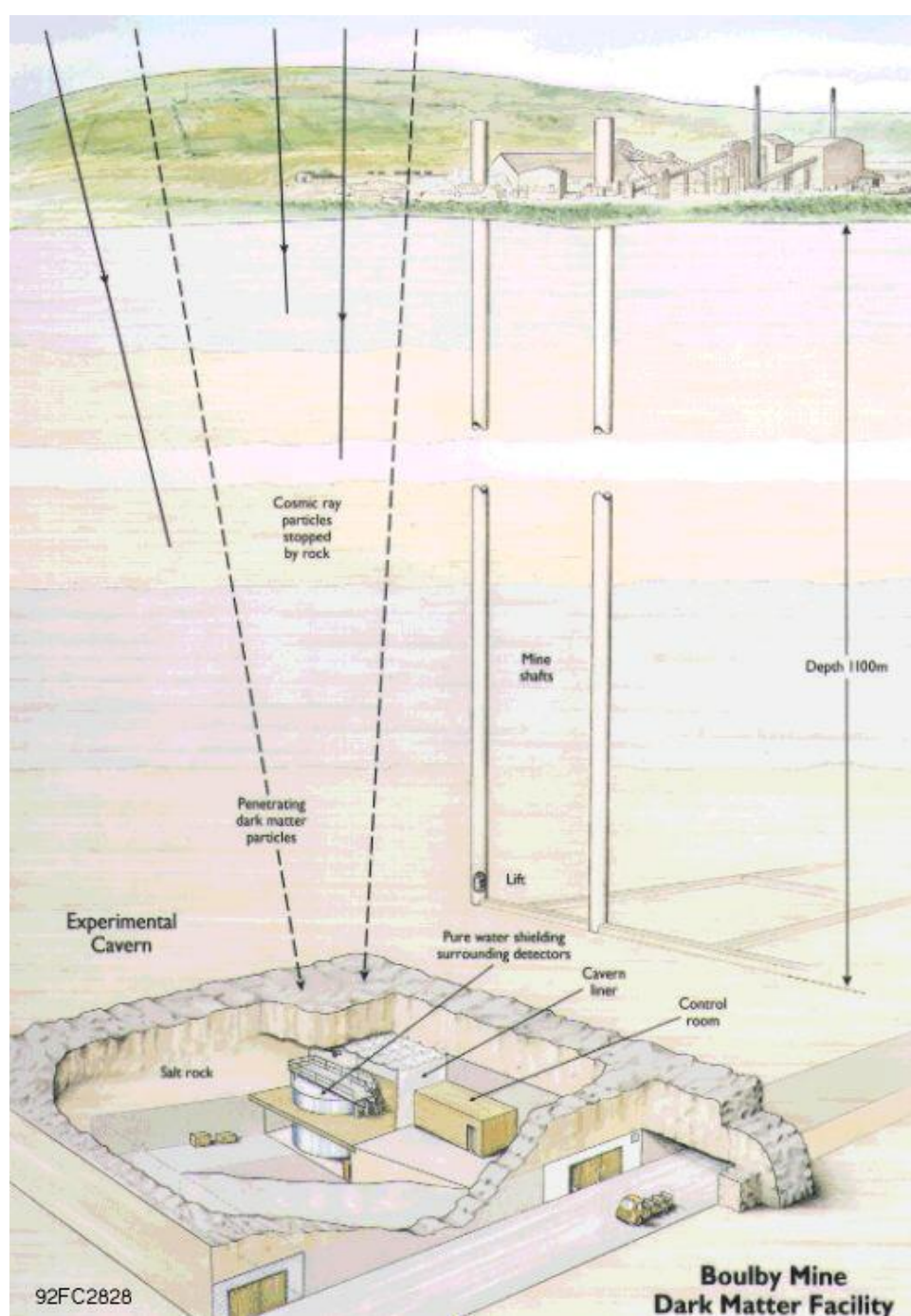
- A contribuição bariônica é pequena
- Matéria escura fracamente interagente
 - Matéria escura quente ($m < 100$ eV)
 - Matéria escura fria ($m > 1$ GeV)
- Matéria escura quente: neutrinos
não podem ser dominantes $\Rightarrow$ estruturas de grande escala
- Matéria escura fria: WIMPs
(weakly interacting massive particles)
candidatos de SUSY (supersymmetric theories)

Supersimetricia (SUSY)

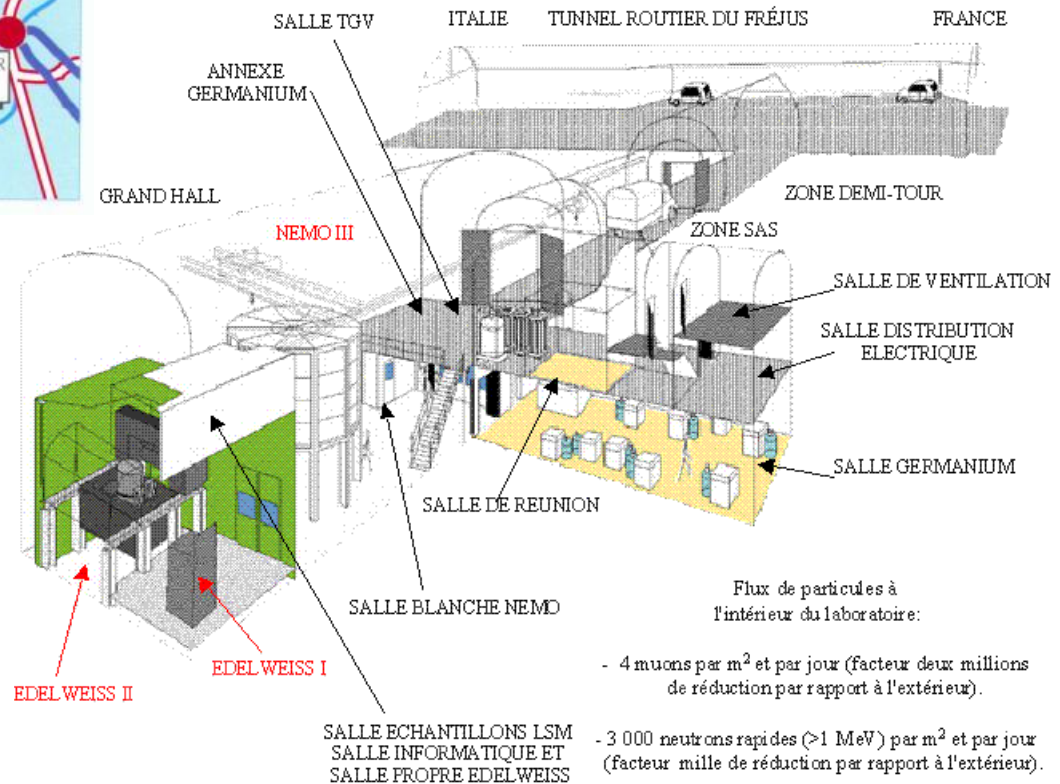
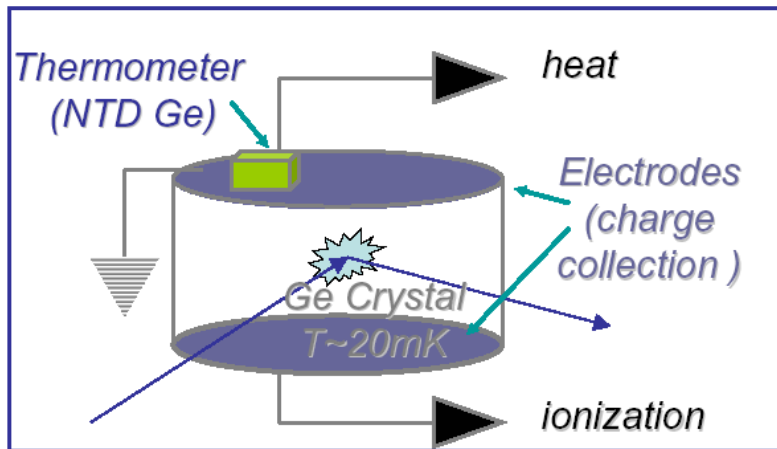
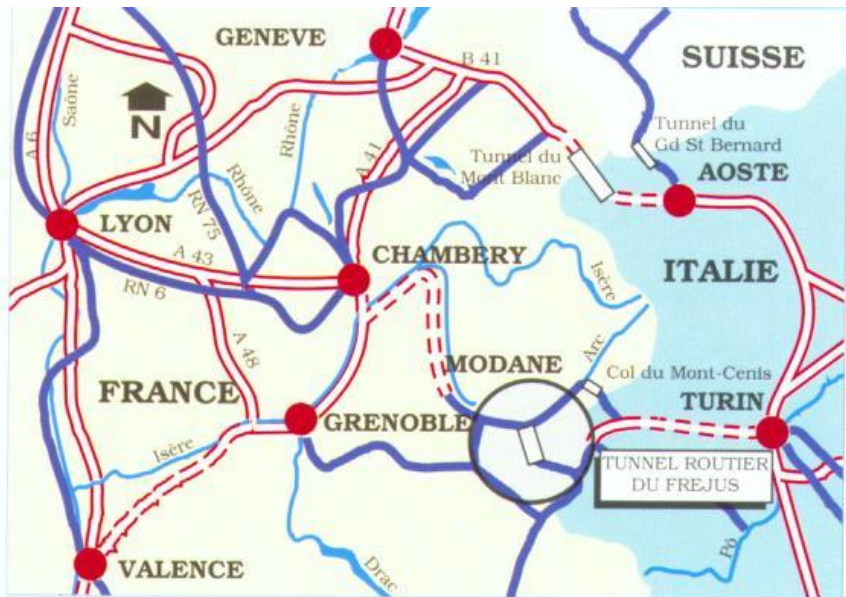


Astronomia Subterrânea: Detecção Direta dos WIMPs

- IGEX (International GERmanium eXperiment)
- CMDS (Cryogenic Dark Matter Search)
- EDELWEISS (Expérience pour DETecter Les Wimps En Site Souterrain)
- CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometer)
- ROSEBUD (Rare Objects Search w. Bolometers UnDerground)
- DAMA (DARK MATter)
- UKDMC (United Kingdom Dark Matter Collaboration)



Mont Fréjus: EDELWEISS



DAMA (ITÁLIA)



ROM2F/2008/07

April 2008

First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI

R. Bernabei ^{a,b}, P. Belli ^b, F. Cappella ^{c,d}, R. Cerulli ^e, C.J. Dai ^f,
 A. d'Angelo ^{c,d}, H.L. He ^f, A. Incicchitti ^d, H.H. Kuang ^f,
 J.M. Ma ^f, F. Montecchia ^{a,b}, F. Nozzoli ^{a,b},
 D. Prosperi ^{c,d}, X.D. Sheng ^f, Z.P. Ye ^{f,g}

^a*Dip. di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata", I-00133 Rome, Italy*

^b*INFN, sez. Roma "Tor Vergata", I-00133 Rome, Italy*

^c*Dip. di Fisica, Università di Roma "La Sapienza", I-00185 Rome, Italy*

^d*INFN, sez. Roma, I-00185 Rome, Italy*

^e*Laboratori Nazionali del Gran Sasso, I.N.F.N., Assergi, Italy*

^f*IHEP, Chinese Academy, P.O. Box 918/3, Beijing 100039, China*

^g*University of Jing Gangshan, Jiangxi, China*

Abstract

The highly radiopure $\simeq 250$ kg NaI(Tl) DAMA/LIBRA set-up is running at the Gran Sasso National Laboratory of the I.N.F.N.. In this paper the first result obtained by exploiting the model independent annual modulation signature for Dark Matter (DM) particles is presented. It refers to an exposure of $0.53 \text{ ton}\times\text{yr}$. The collected DAMA/LIBRA data satisfy all the many peculiarities of the DM annual modulation signature. Neither systematic effects nor side reactions can account for the observed modulation amplitude and contemporaneously satisfy all the several requirements of this DM signature. Thus, the presence of Dark Matter particles in the galactic halo is supported also by DAMA/LIBRA and, considering the former DAMA/NaI and the present DAMA/LIBRA data all together (total exposure $0.82 \text{ ton}\times\text{yr}$), the presence of Dark Matter particles in the galactic halo is supported at 8.2σ C.L..

Do que é feito o Universo?

Continua faltando alguma coisa:

Energia Escura

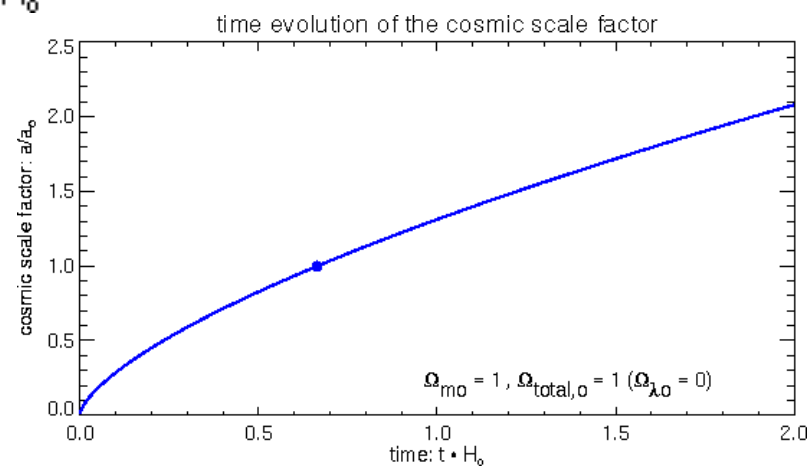
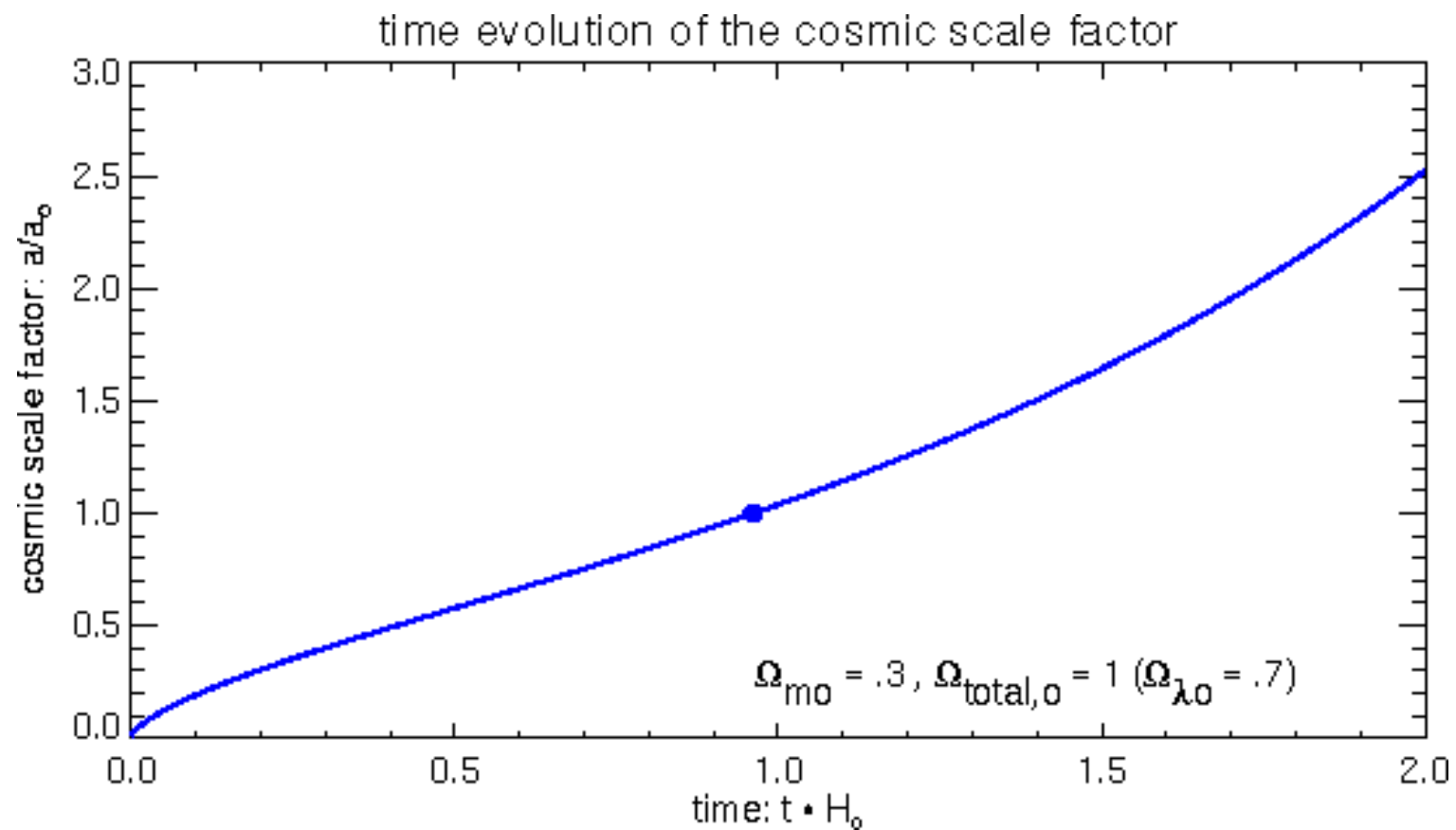
- Matéria
 - Bariônica (Estrelas, Gás, Raios cósmicos)
 - Radiação
 - Escura (quente, fria)

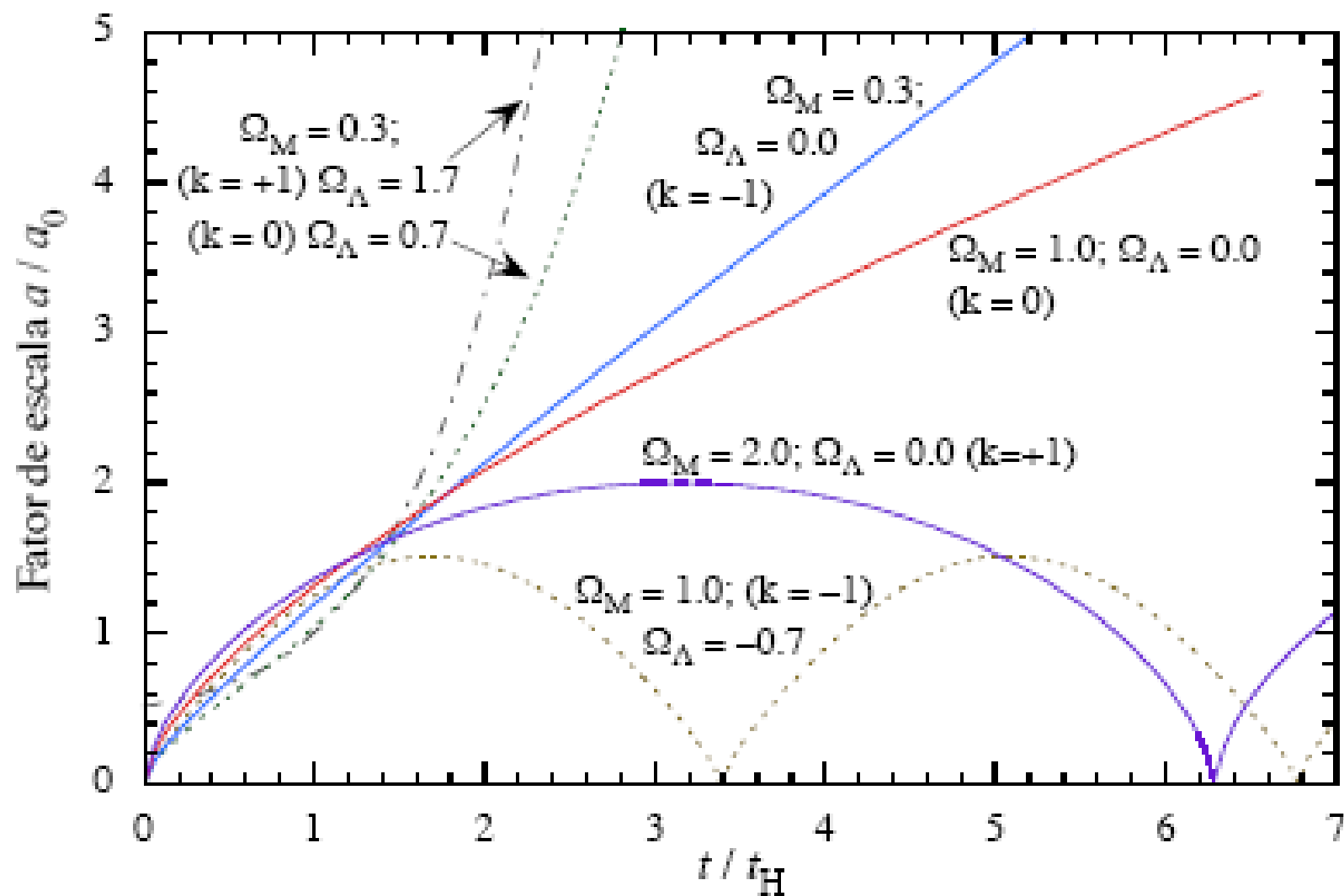
Sempre Atrativa Ω_{mat}

- Evidências da energia escura:
 - Expansão do Universo (Supernovas Ia)
 - Lentes Gravitacionais
 - Radiação de Fundo Cósmica
 - Aglomerados de galáxias (Raios-X)

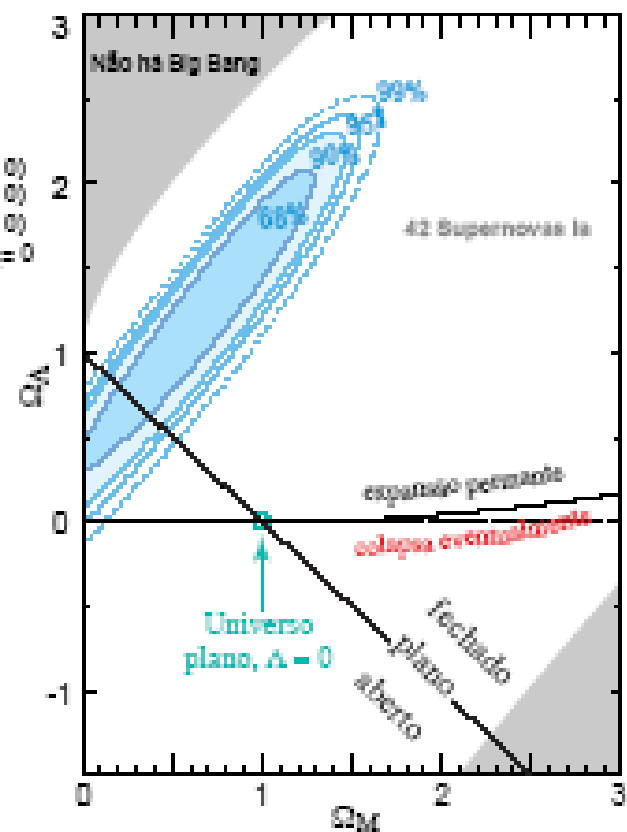
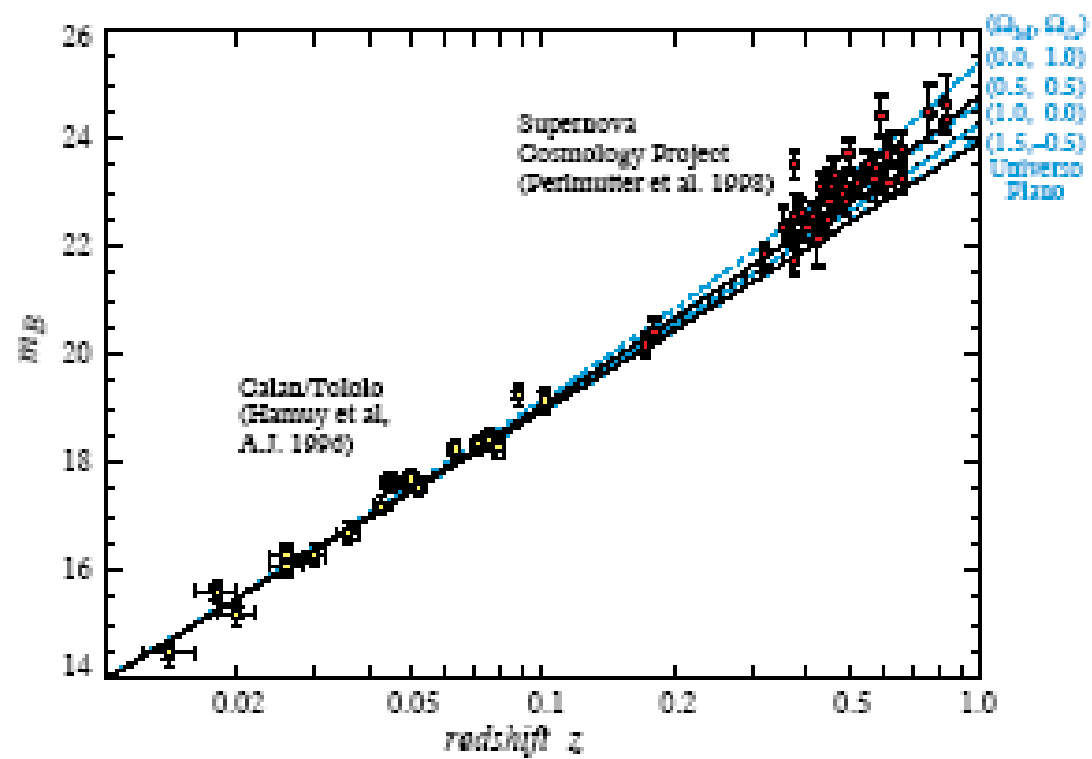
Força repulsiva universal

Ω_{Λ} **Constante Cosmológica**

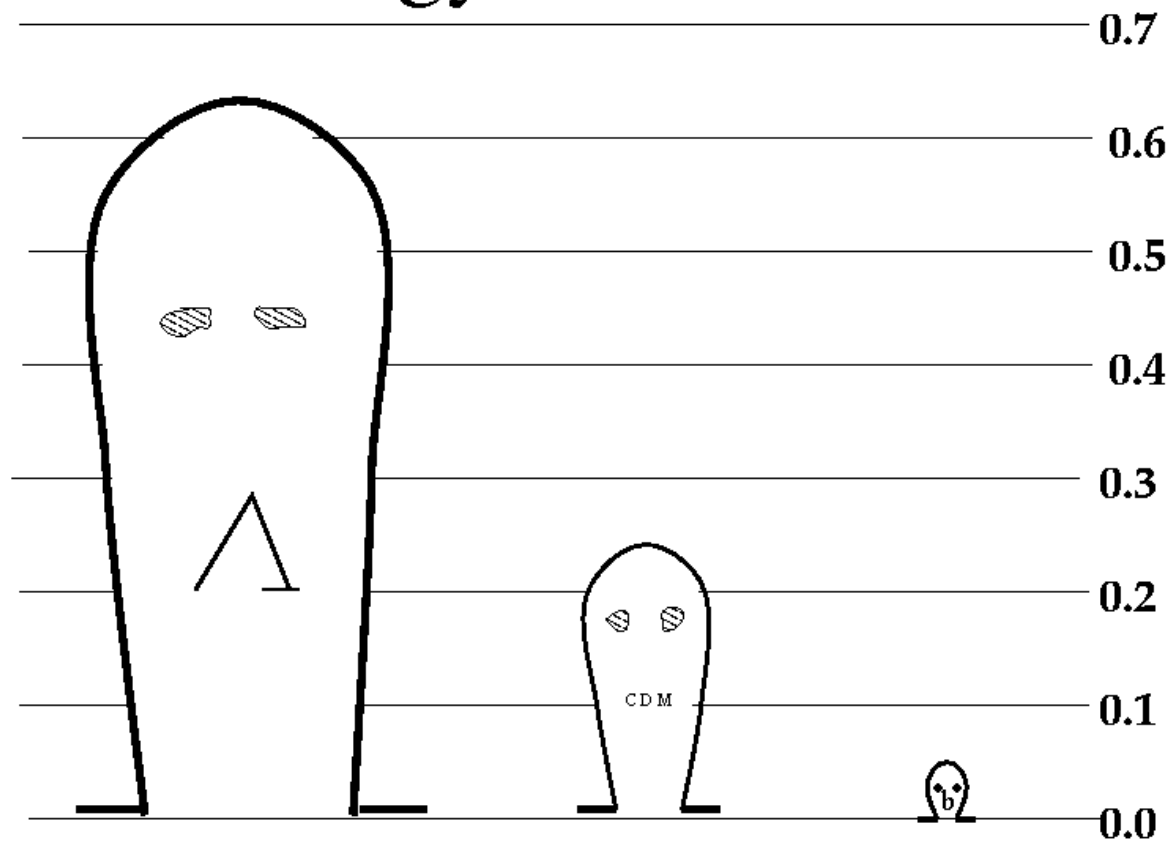






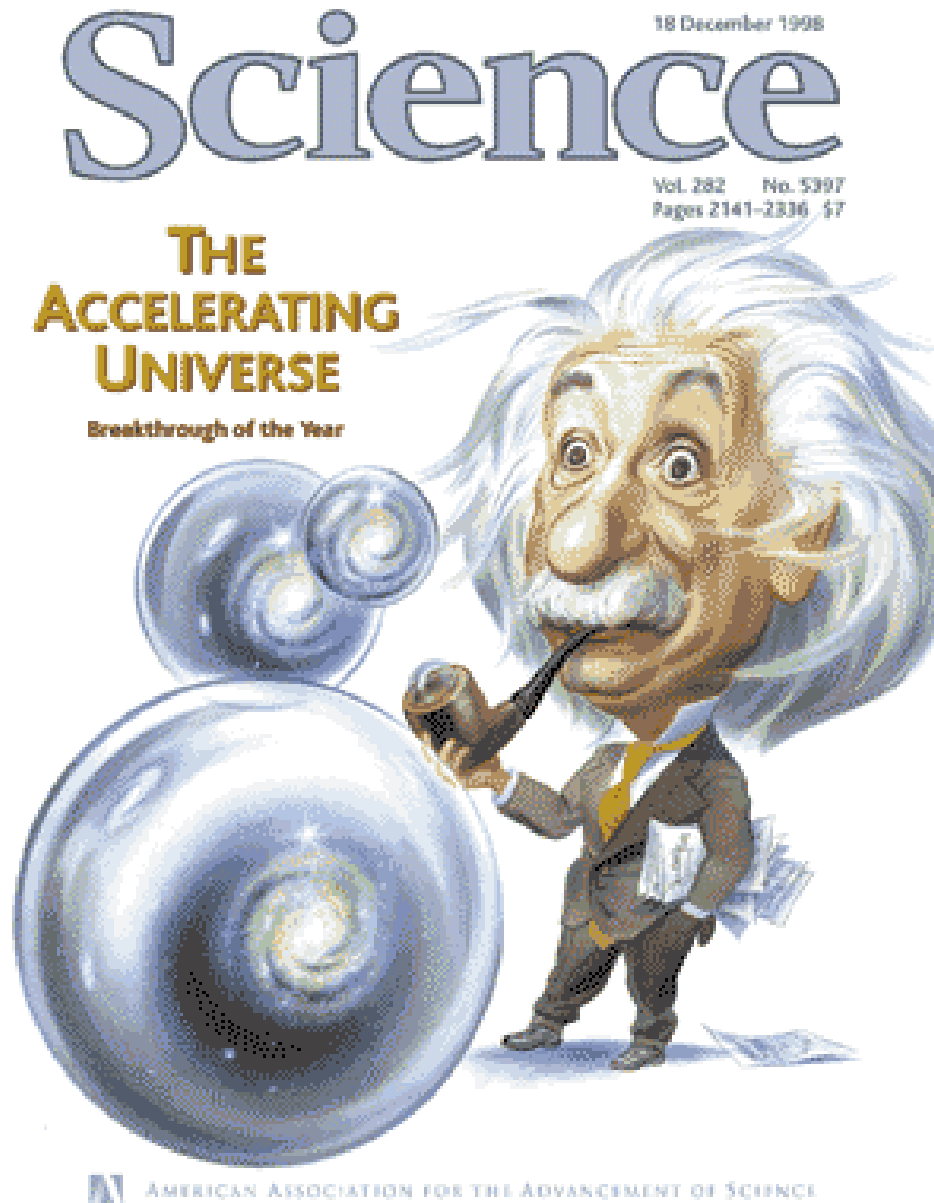


Cosmology's Most Wanted



Ω_A	Ω_{CDM}	Ω_b
cosmological constant energy of the vacuum He never clumps His evil plan is to blow up the Universe	cold dark matter He likes to clump but has never been detected directly His evil plan is to make the Universe collapse	normal baryonic matter a pawn in the cosmic game who just follows CDM around. He thinks he's a complex life form but is really just a bunch of hydrogen

**Surprise,
Surprise!
1998**





Evolução da Complexidade no Universo



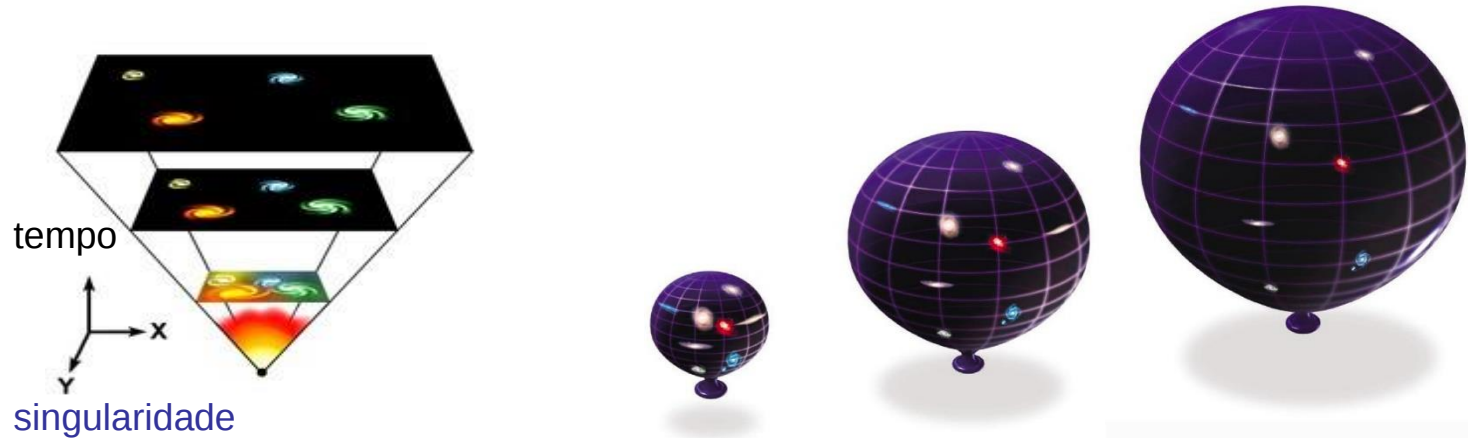
A história do universo é tal que
surgem níveis cada vez maiores
de complexidade.

*O aumento da complexidade
permite o aparecimento da vida*

História da Complexidade no Universo

- 10^{-43} s
 - 10^{-33} s
 - 10^{-4} s
 - 1 minuto
 - 300.000 anos
 - ~300 Manos
 - ~300 Manos
 - ~10 Ganos
1. Nasce o espaço (4 dimensões estendidas)
 2. Nasce a matéria (quarks e léptons)
 3. Nascem os prótons (quarks confinados)
 4. Nascem os núcleos (^4He ^2H ^3He ^7Li)
 5. Nascem os átomos (reunião elétrons-núcleos)
 6. Nascem os elementos pesados (C em diante)
 7. Nascem as heteromoléculas (OH, CO, H₂O)
 8. Nasce a vida ($\oplus$: ao menos 3.85 Ganos atrás)

A SINGULARIDADE



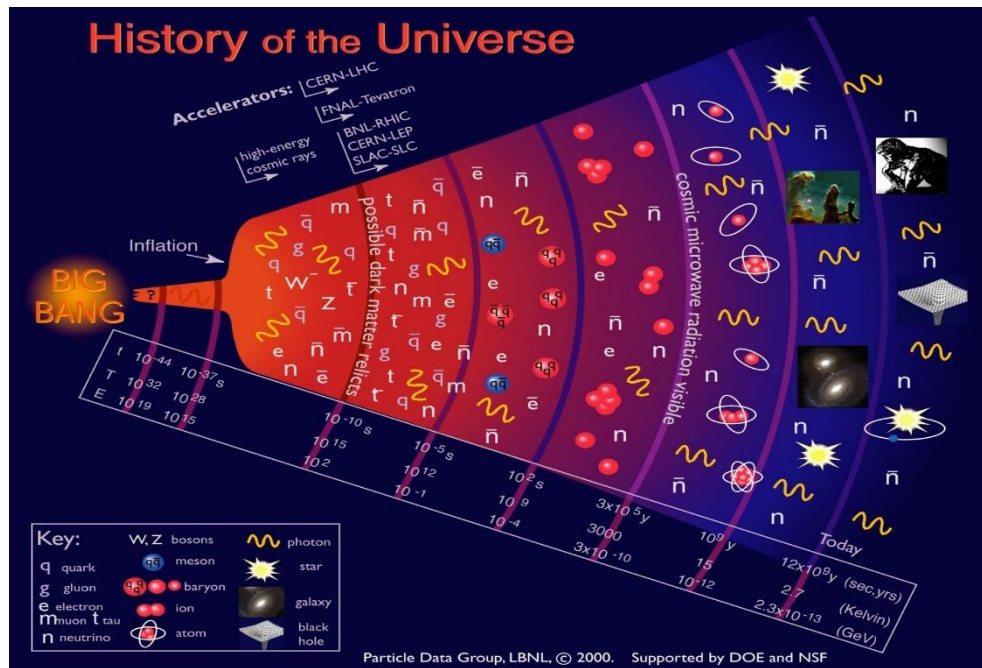
No Modelo do Big Bang, a **origem do Universo** está associada a uma **Singularidade (início - "ponto zero")**, uma previsão matemática que resulta das equações da Relatividade Geral de Einstein, onde o Universo surge , o volume seria zero e as condições físicas seriam extremas: a densidade e temperatura seriam infinitas.

Esta singularidade seria responsável pelo início do espaço-tempo, e que com a expansão ocorreria a transformação da **energia inicial em criação da matéria**, que ocorreu a uns 13,7 bilhões de anos.

Desde então o Universo estaria se expandindo, criando matéria, radiação, gravidade e o próprio espaço-tempo.

Cenário da História de Evolução Térmica do Universo

Conforme o Universo se expande a temperatura diminui e a densidade também. Como consequência, vão ocorrer fenômenos que estão diretamente relacionados com a diminuição da temperatura, caracterizando assim uma história térmica do universo, uma evolução, portanto, que resulta em diferentes fases, caracterizando as 4 Eras de Evolução do Universo



$$E=mc^2$$



Grandes Eras na Evolução do Universo

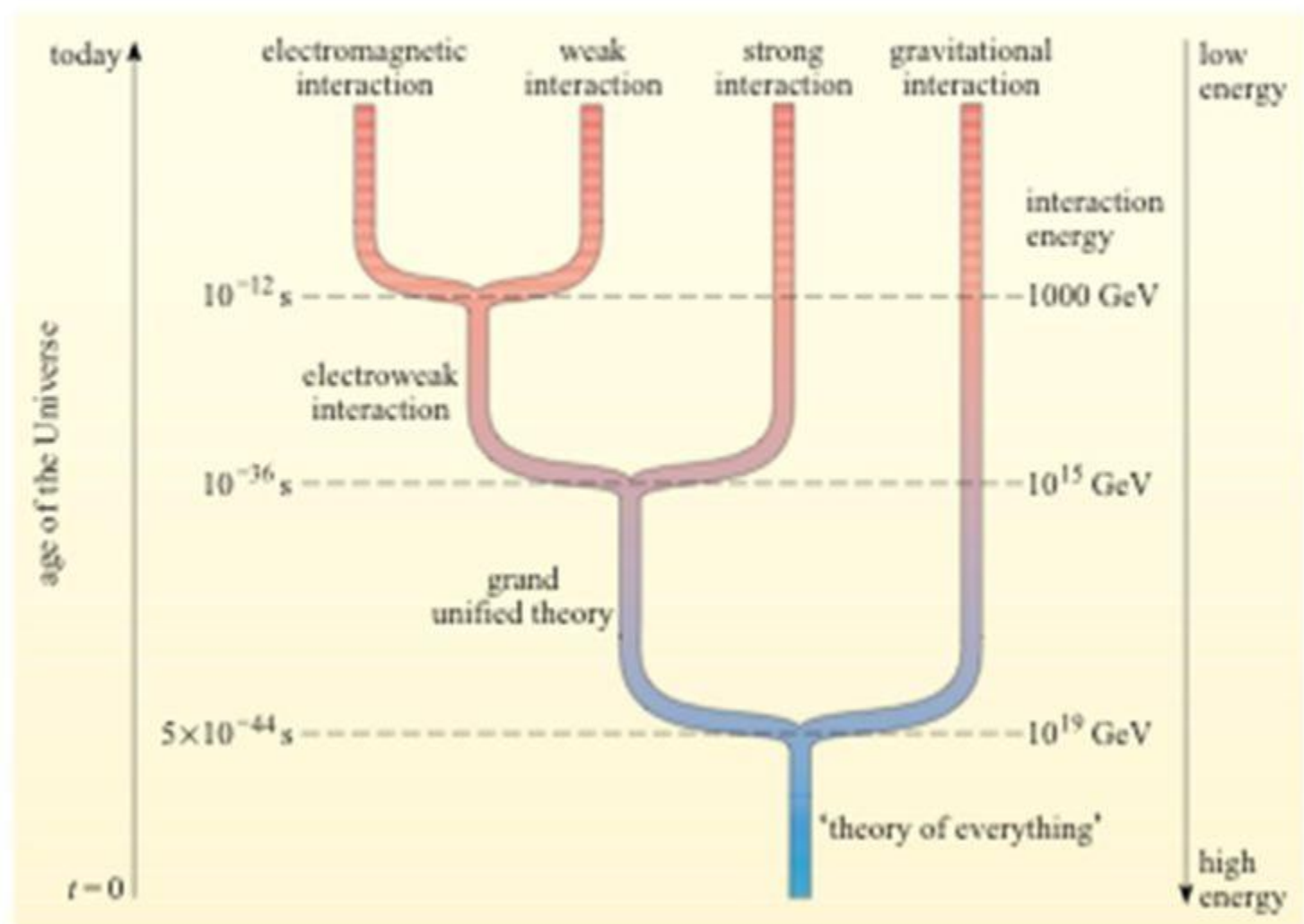
Tempo Cósmico	Era	Evento
0	Singularidade	Big-Bang
até 10^{-43} s	Era de Planck	(ainda desconhecida)
até 10^{-6} s	Era dos Hádrons	Criação das partículas pesadas
até 1 segundo	Era dos Léptons	Criação das partículas leves
1 minuto	Era da Radiação	Formação de hélio e Deutério
10 mil anos	Era da Matéria	A matéria torna-se predominante
300 mil anos	Desacoplamento	O Universo torna-se transparente
1 bilhão de anos		Começa a formação das galáxias
3 bilhões de anos		Começa a aglomeração das galáxias
4 bilhões de anos		Formação das primeiras estrelas
15,5 bilhões de anos		Inicia-se a formação do Sol
20 bilhões de anos		Época atual

$$M_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{19} GeV$$

$$\ell_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 10^{-35} m$$

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 10^{-43} s$$

Evolution of fundamental interactions with time



← inflation

Era de Planck

0 até 10^{-43} segundos

Não sabemos muito sobre esta Era...já que a Teoria da Gravitação da Relatividade Geral é incapaz de descreve-la, pois não consegue incluir os efeitos quânticos.

Sabemos que era uma fase onde o Universo se encontrava MUITO quente e denso, e que dominou a evolução enquanto a idade era inferior a $T \leq 10^{-43}$ segundos, o **Tempo de Planck**. Nesta fase o Universo se expandiu e atingiu uma dimensão da ordem de $1,6 \times 10^{-43}$ cm

A Era da Inflação

No começo dos anos 80 os cosmologistas descobriram que as **teorias de unificação** previam a existência uma superforça, onde as forças fracas, forte e eletromagnética coexistiam, e que tinham uma **implicação extraordinária se aplicadas ao começo do Universo**.

Aproximadamente 10^{-34} s após o Big Bang, as temperaturas caem abaixo de 10^{28} K e as forças básicas da natureza se reorganizam: o Universo, por um período de tempo muito curto, entra em um **estado instável, de alta densidade de energia**, que os físicos chamam de "falso vácuo".

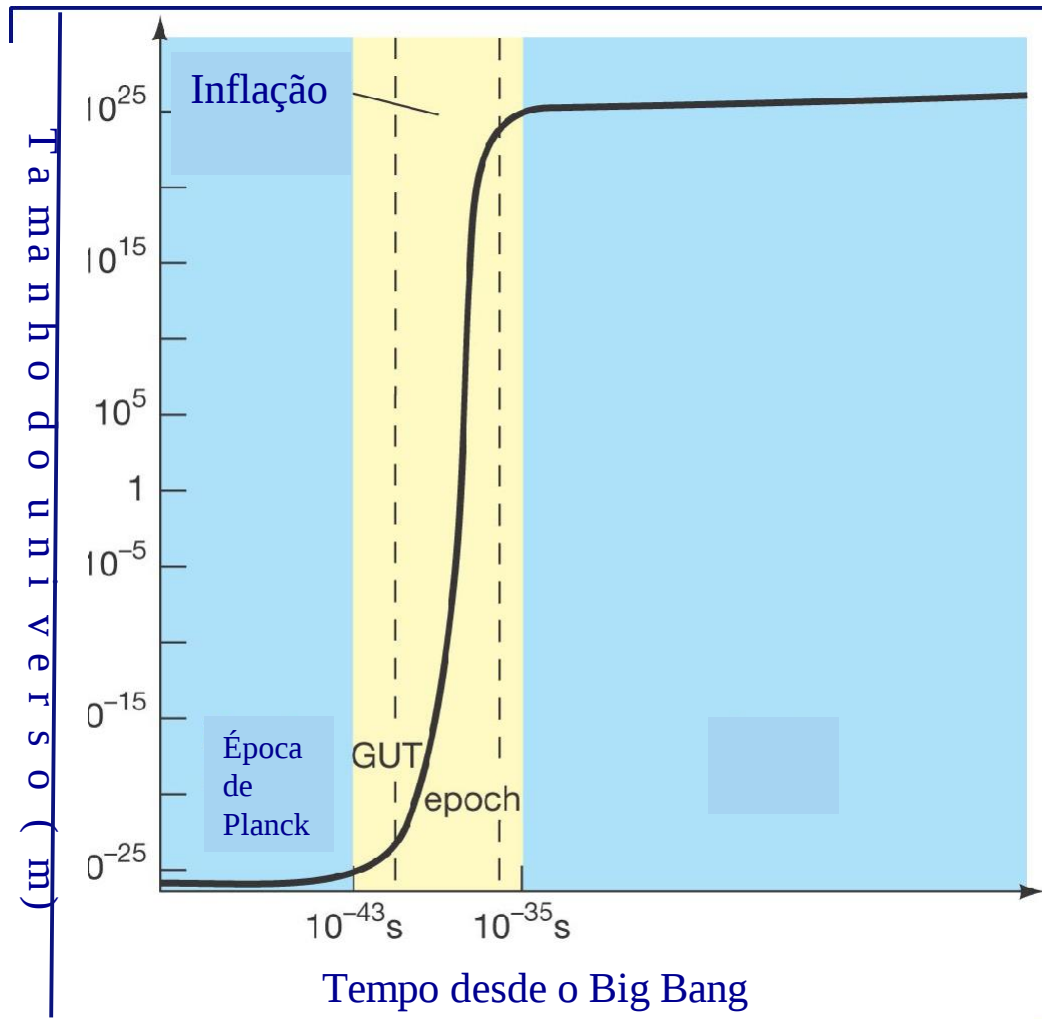
O **falso vácuo** decai e durante esta fase teria ocorrido uma transição onde um processo de **liberação de energia do calor latente**, teria separado a **força gravitacional das outras forças da natureza – força fraca, forte, eletromagnética**. As 4 forças que conhecemos hoje seria unificada nesta fase.

Segundo a **TRG o vácuo teria a propriedade de acelerar o Universo**, exercendo pressão negativa, onde a **gravidade teria nesta fase um caráter repulsivo!**

Este período de grande expansão cósmica foi conhecido como a **Época da Inflação**.

A Era da Inflação

O Universo retornou para o estado de "vácuo verdadeiro" e a inflação parou.



O episódio inteiro durou somente 10^{-32} s, mas durante este tempo o **Universo aumentou em tamanho por um fator de 10^{50}**

O vácuo normalidade e então o universo retoma também sua expansão relativamente lenta, tendo seu movimento desacelerado pela gravidade.

A Teoria da Inflação propõe que **as galáxias teriam sido formadas a partir de sementes geradas no período inflacionário.**

Aniquilação da Anti-matéria

Após a fase de inflação, o Universo continuou a expandir e a resfriar, mas em ritmo mais lento.

Quando o universo era muito quente e denso, os fótons podiam produzir um par de partículas de matéria e antimatéria que se aniquilavam e eram produzidos continuamente e tudo estava em equilíbrio.

Quando o **Universo esfria** o equilíbrio se perde e ocorre uma assimetria cujo resultado é que a antimatéria é virtualmente erradicada.

1 em cada bilhão de partículas sobrevive.



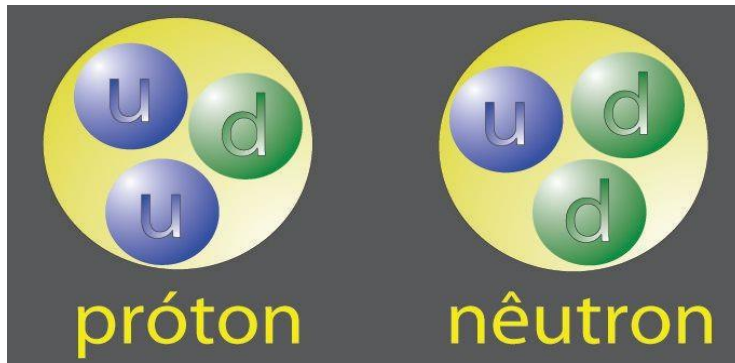
$T = 0,00000000001$ segundos (tem 9 zeros depois da vírgula.....!!!) Universo ainda é **MUITO** quente e denso

Bariogênese

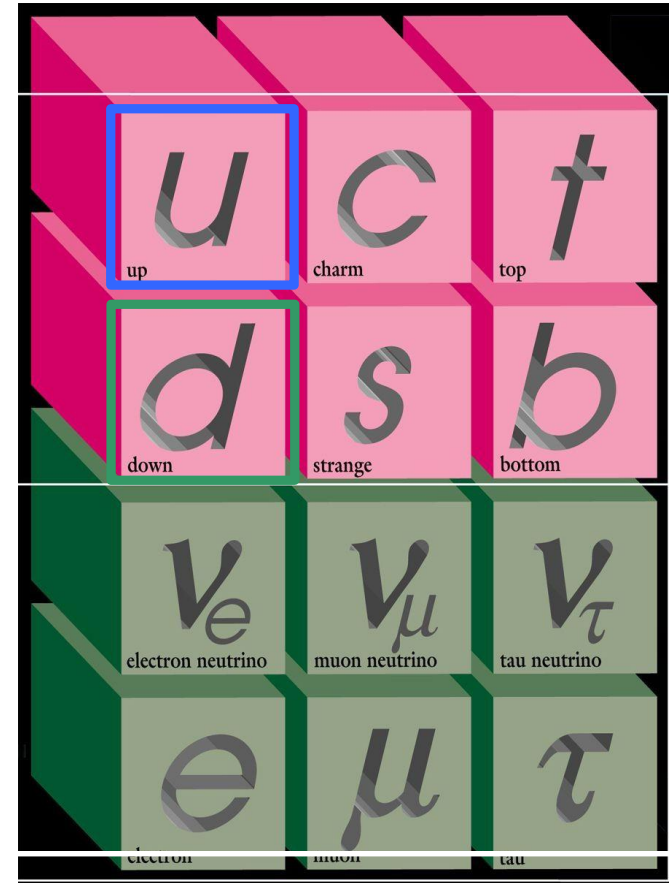
...formação de partículas massivas : protons e neutrons, via quarks

Quarks são **partículas fundamentais** da natureza que formam todos os hádrons (partículas compostas por quarks).

Grupos de 3 quarks formam bárions. Os dois bárions mais conhecidos são: nêutrons e prótons. Esta época é chamada de **Bariogênese** (formação de bárions – partículas massivas).



Quarks
Leptons



$T = 0,00001$ segundos (tem 4 zeros depois da vírgula)

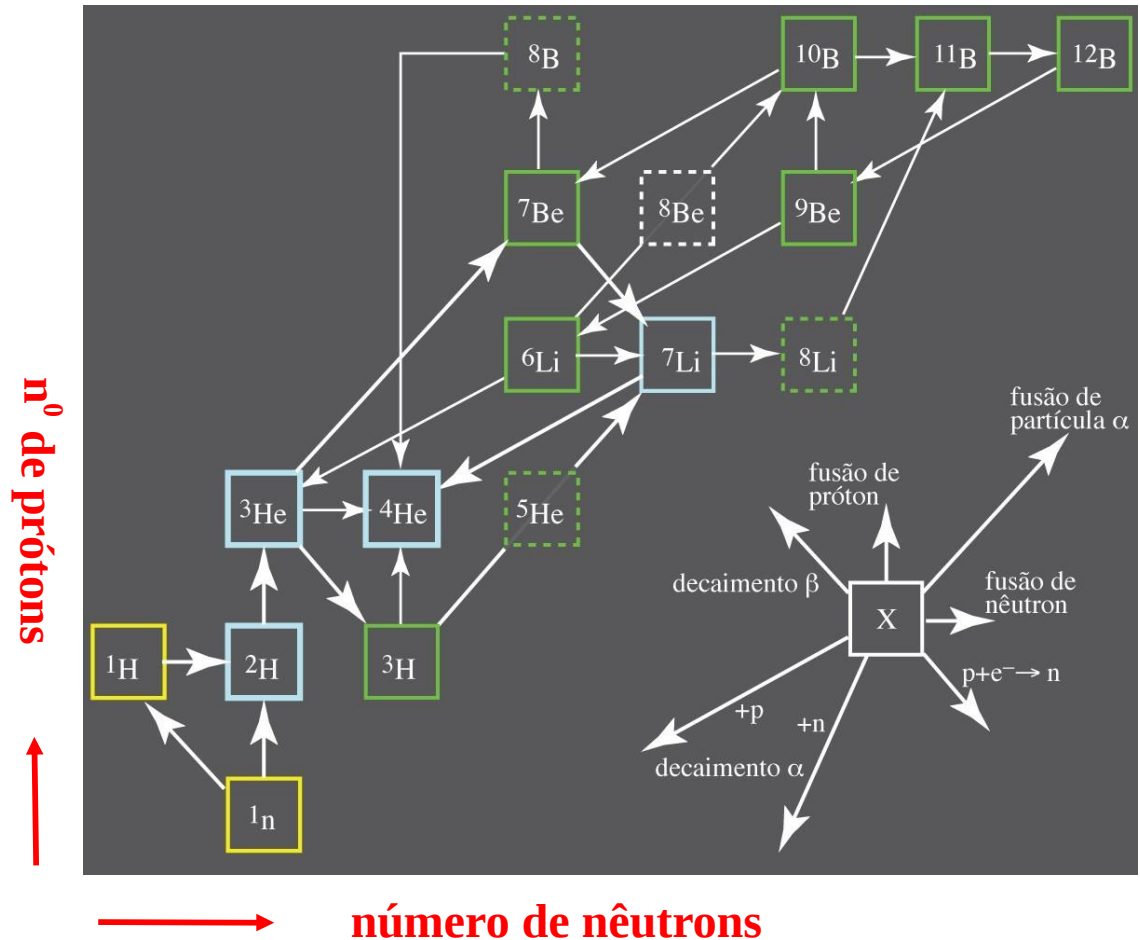
Universo ainda é MUITO quente e denso

Exemplo de Lépton: o elétron

Nucleossíntese Primordial

Nucleossíntese significa produção de núcleos atômicos a partir da fusão termonuclear de núcleos mais leves.

Formam-se os elementos
leves: **deutério, hélio, lítio,
berílio e boro.**



Ocorre entre 1 segundo e 5 minutos
Termina quando $T \sim 1$ bilhão de graus, densidade $\sim$ água

Formação dos Átomos Neutros

Enquanto os átomos estão ionizados, o Universo é opaco à radiação.

Quando o universo se esfria, ele se torna transparente.

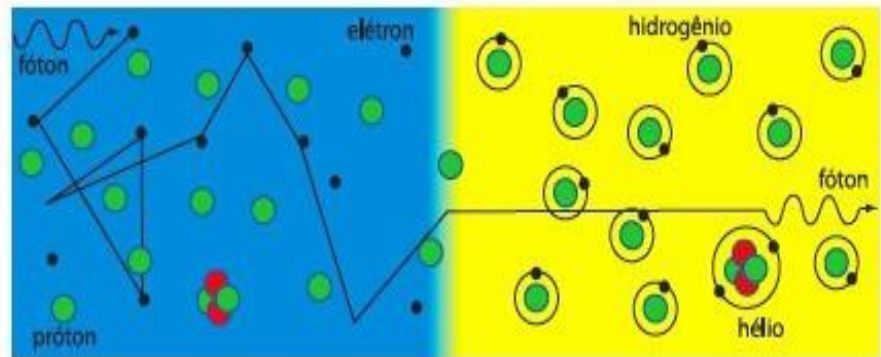
Origem da **radiação cósmica de fundo**, hoje, com 3K.

Prevista desde os anos 1950.



Observada em 1964:
Prêmio Nobel em 1978
para Arno Penzias e
Robert Wilson

$t \sim 400.000$ anos $T \sim 3000$ graus,
densidade ~ 10.000 átomos/cm³



passagem do tempo →

Era da Recombinação

...formação dos átomos neutros

A radiação cósmica de fundo se forma a $T \sim 3000\text{K}$, mas hoje medimos $2,725\text{ K}$ devido a expansão do Universo. Lembrem-se que o Gamov previu este valor no Modelo dele....

A esta temperatura não há mais fótons com energia suficiente para manter a matéria ionizada, então os núcleos começam a capturar e reter os elétrons.

Os átomos se tornaram neutros e o Universo ficou transparente para a radiação este momento é chamado de **Era da Recombinação**.

Ocorre em $t = 400.000$ anos

$T \sim 3000$ graus, densidade ~ 10.000 átomos/cm³

Idade das trevas

Passada a época da Recombinação, o Universo entrou em uma fase em que não havia qualquer fonte de luz, a chamada **Idade das Trevas**.

Há apenas a **radiação cósmica de fundo**, no infravermelho



idade das trevas

entre 400 mil e 400 milhões de anos

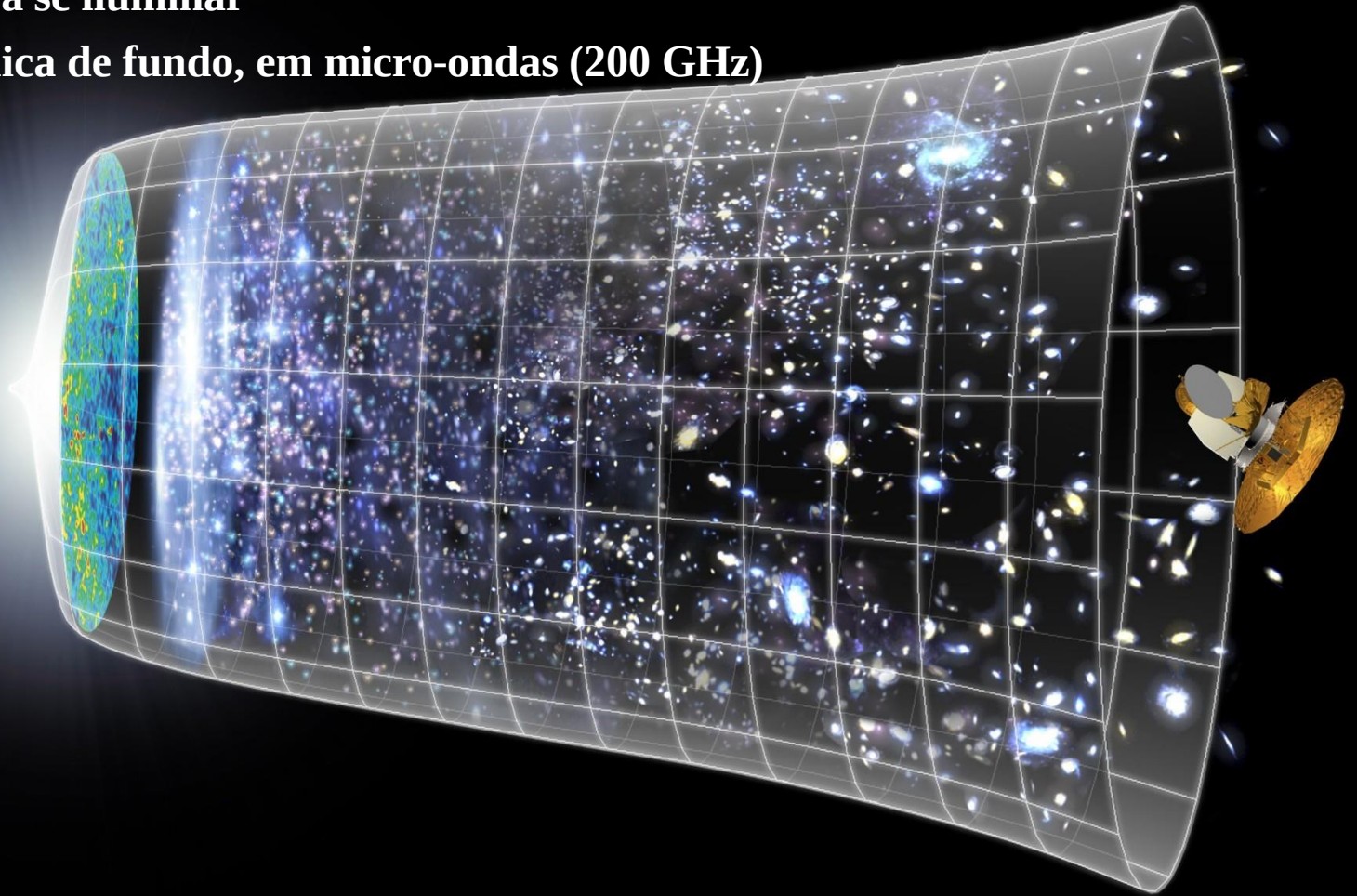
Foi nessa época que se formou a teia cósmica traçada pela matéria escura.

Fim da idade das trevas: $T \sim 30 \text{ K}$, densidade $\sim 10 \text{ átomos/m}^3$

Formação das estrelas, galáxias, planetas...

Universo volta a se iluminar

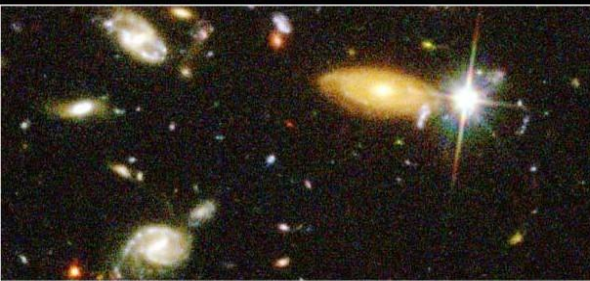
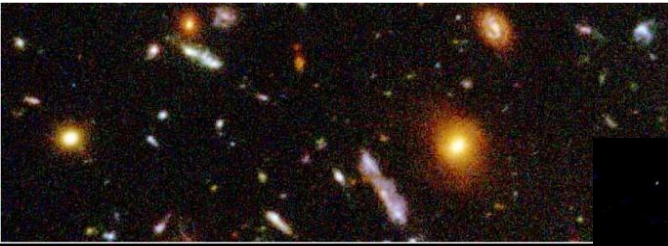
Radiação cósmica de fundo, em micro-ondas (200 GHz)



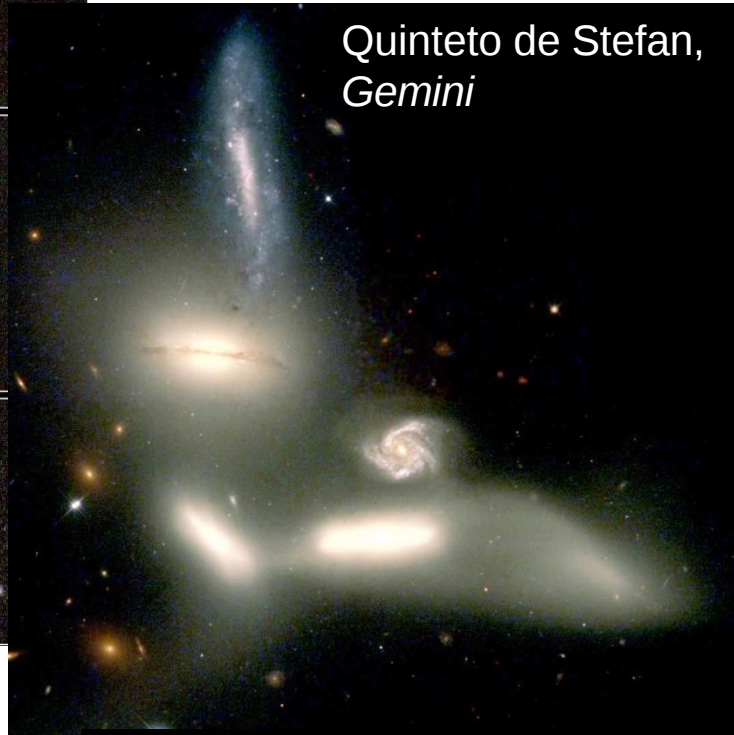
Entre 400 milhões de anos até hoje

$T \sim 2,725$ K, densidade ~ 1 átomo/ 1000 litros

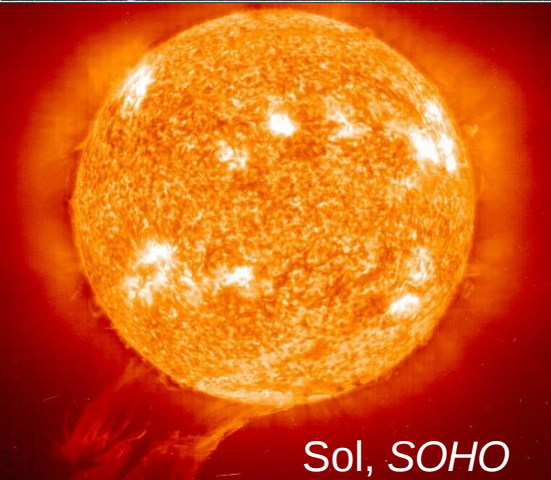
Formação das estrelas, galáxias, planetas...



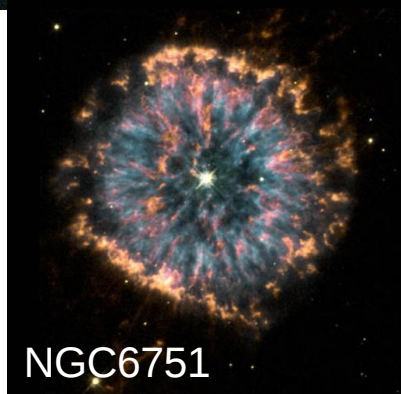
Campo profundo
do *Hubble*



Quinteto de Stefan,
Gemini



Sol, *SOHO*

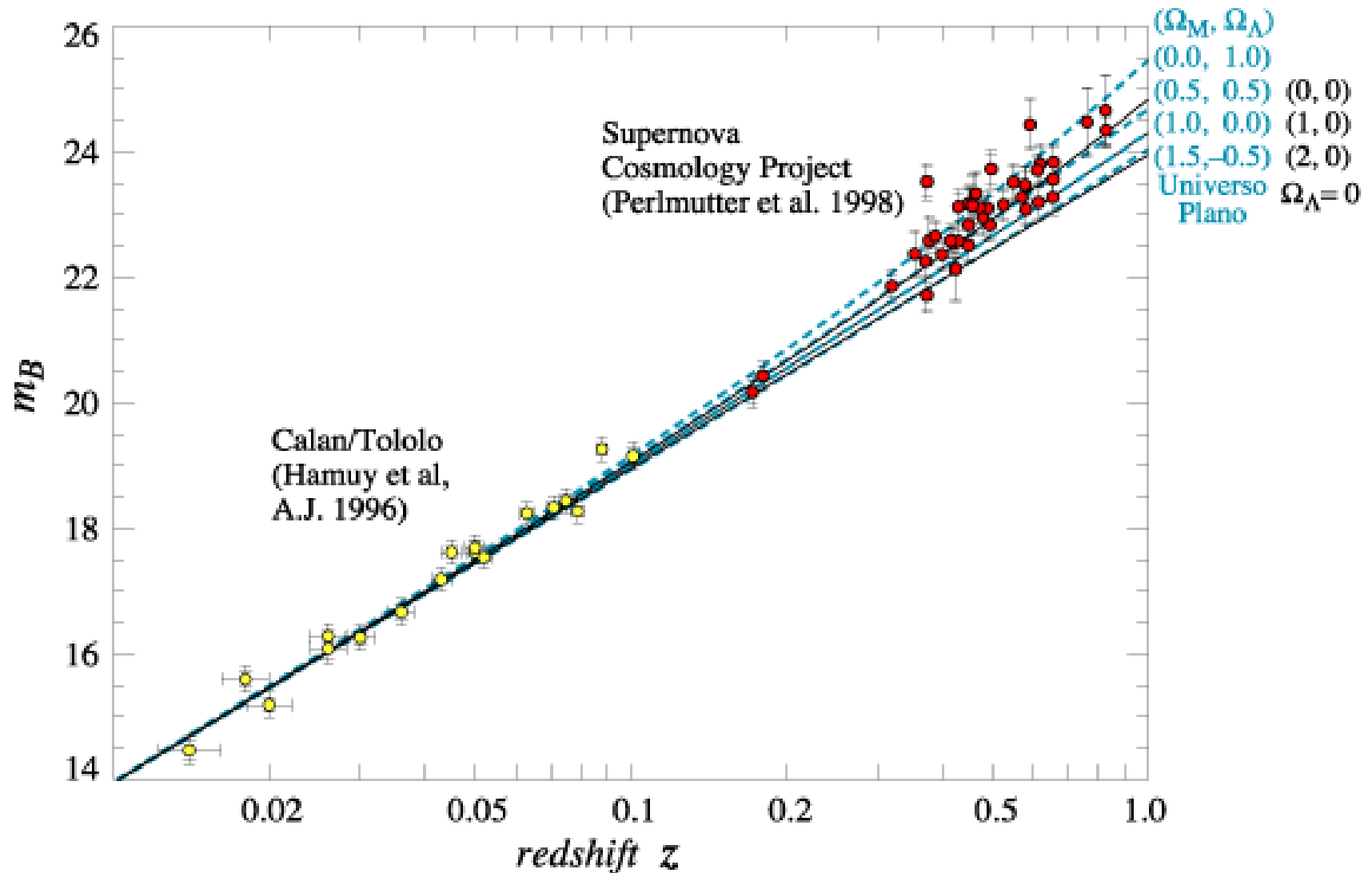


NGC6751

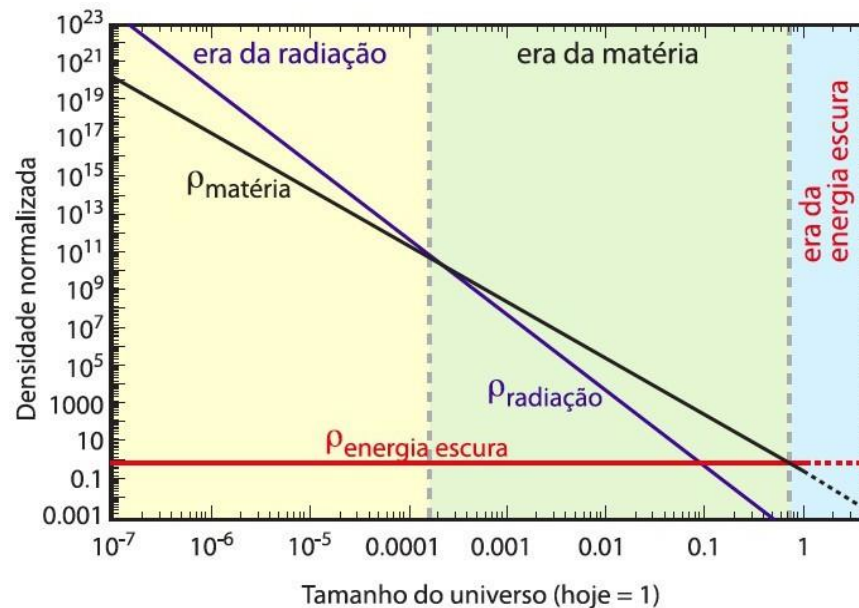


Aglomerado de Coma,
CFHT

Universo em expansão acelerada



Domínios da densidade de radiação, matéria e energia escura



Evolução da densidade (ρ) das três principais componentes do Universo: radiação, matéria (escura e bariônica), e energia escura.

As Eras são definidas pela intersecção da reta representando a densidade de matéria com a densidade de radiação e a densidade de energia escura.

A densidade da radiação depende da quarta potência da temperatura da radiação. Como no passado a temperatura de radiação era muito maior, concluímos que próximo ao Big-Bang o termo de radiação era responsável pela contribuição dominante naquele período.

O Universo como
um problema da
“Cachinhos Dourados”

Um Universo Biofílico

Um universo hospitaleiro à vida – o que podemos chamar de um universo biofílico – tem que ser muito especial de diversos modos.

Os pré-requisitos para qualquer vida – **estrelas de vida longa, uma tabela periódica de elementos com química complexa etc.** – são sensíveis às leis físicas e não poderiam ter emergido de um Big Bang com uma receita que fosse mesmo ligeiramente diferente.

Martin Rees

Our Cosmic Habitat

APENAS SEIS NÚMEROS

- $N = 10^{36}$, a razão da força eletromagnética para a força gravitacional entre dois prótons.
- $\varepsilon = 0.007$, medida da intensidade da energia de ligação entre os nêutrons e prótons dentro do núcleo atômico.
- $\Omega = 0.3$, quantidade de matéria no Universo
- $\lambda = 0.7$, quantidade de energia em vácuo no Universo
- $Q = 1/100\ 000$, medida da profundidade média das flutuações de densidade do Universo
- $D = 3$, número de dimensões do espaço