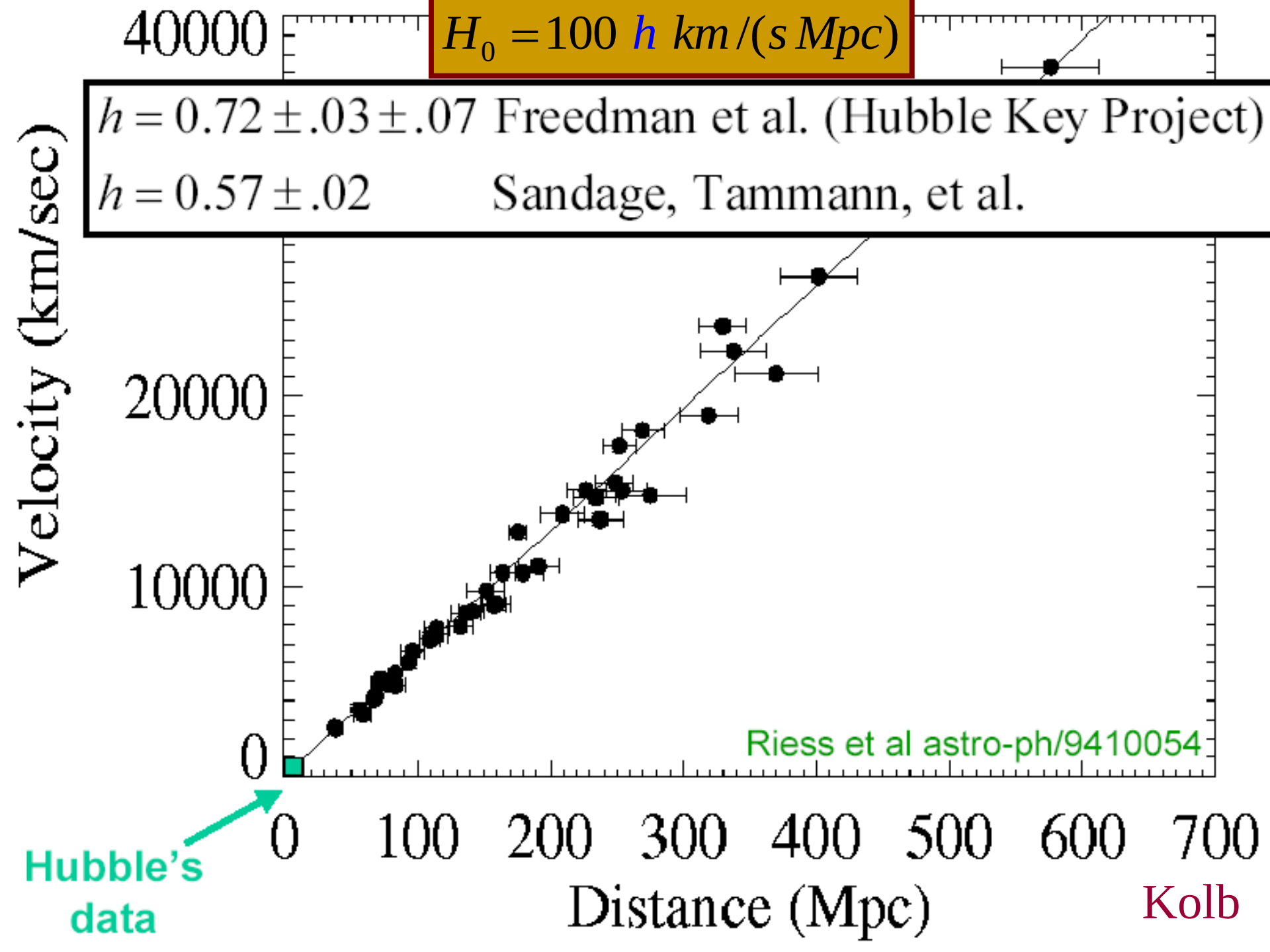
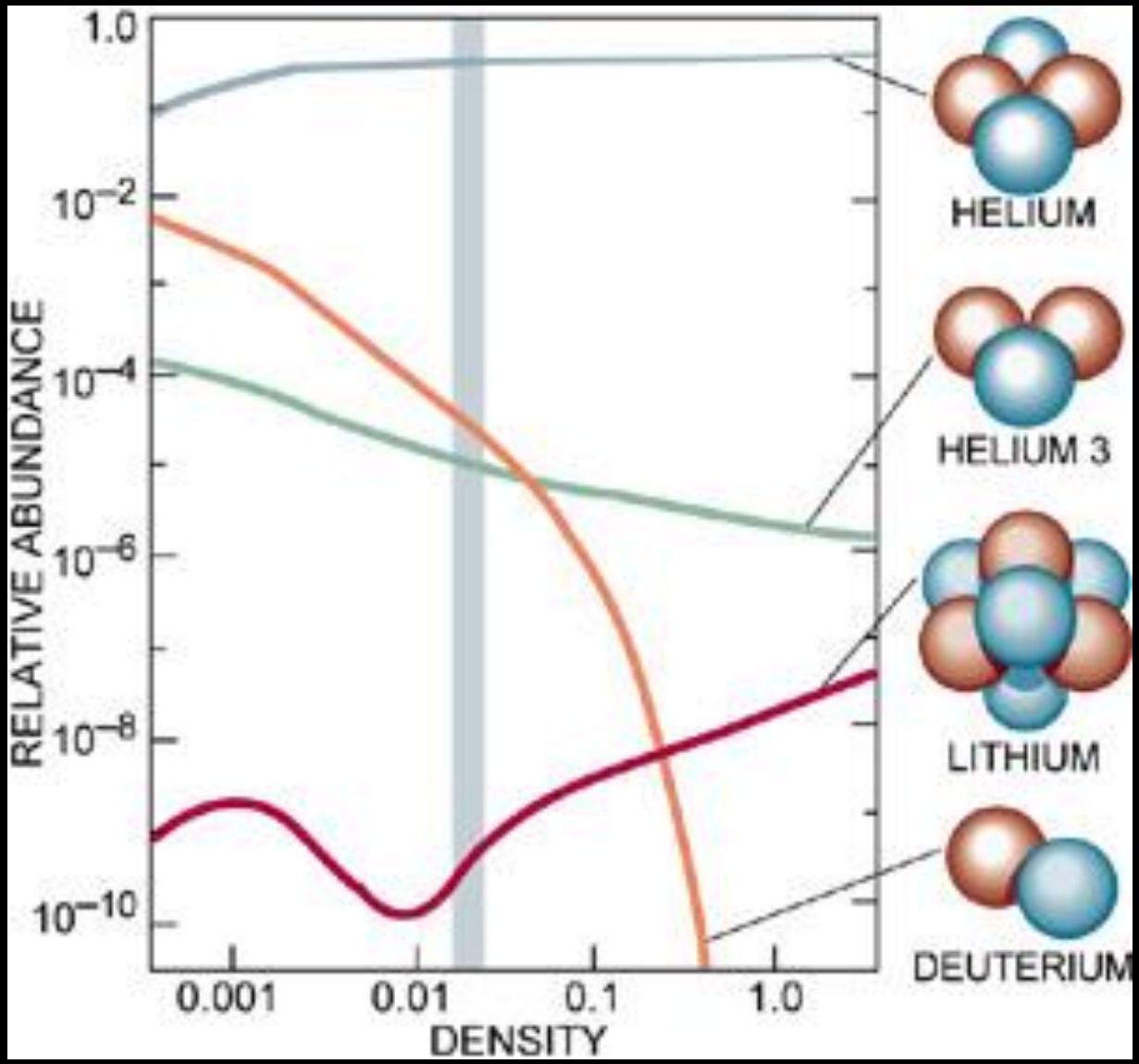
OS PILARES DA COSMOLOGIA

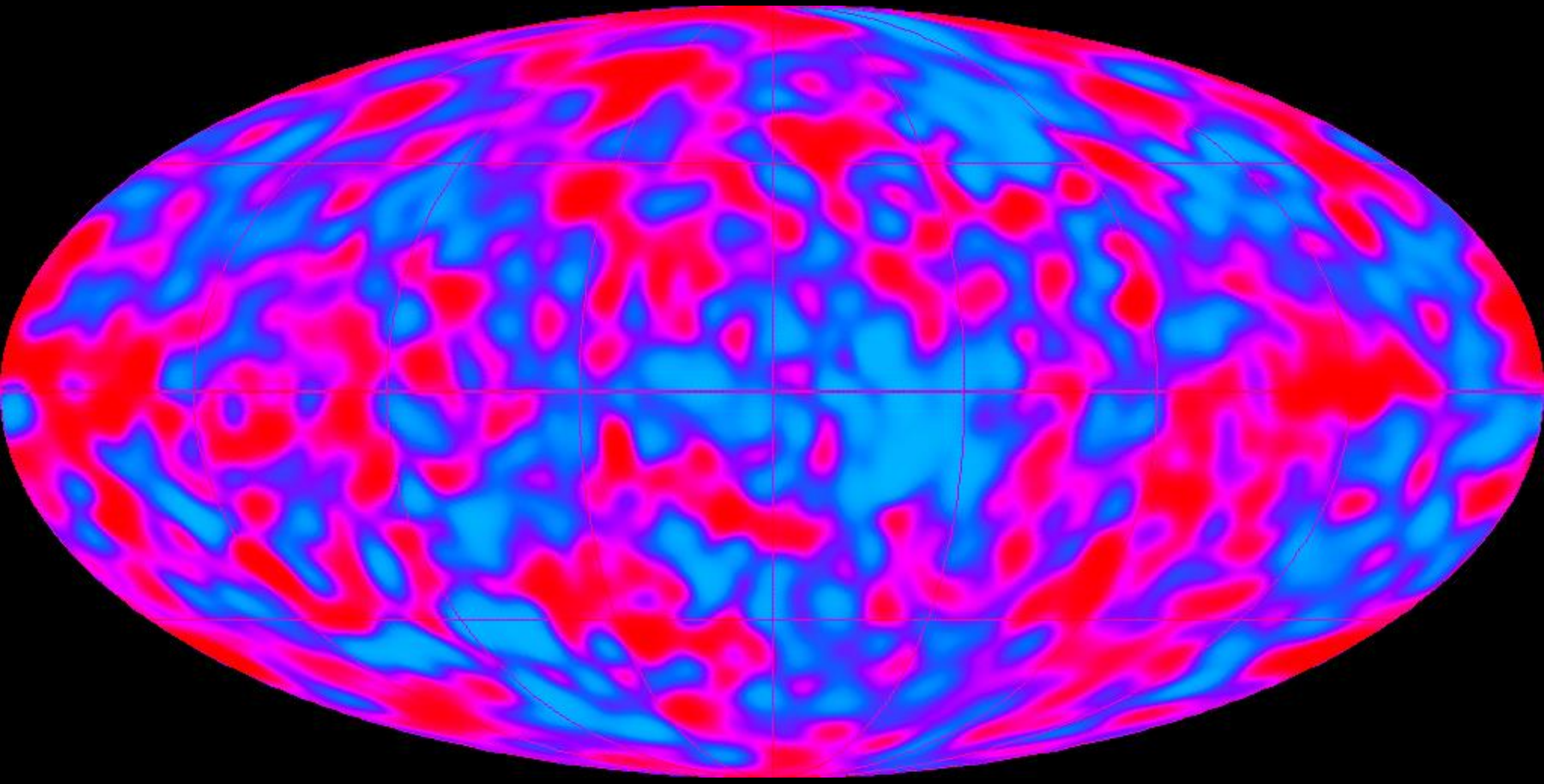
- Expansão do Universo
- Nucleossíntese Primordial
- Radiação de Fundo Cósmica


$H_0 = 100\ h\ km/(s\,Mpc)$
$h = 0.72 \pm .03 \pm .07$ Freedman et al. (Hubble Key Project)
$h = 0.57 \pm .02$ Sandage, Tammann, et al.
Velocity (km/sec)
40000
20000
10000
0
Riess et al astro-ph/9410054
0
100
200
300
400
500
600
700
Distance (Mpc)
Hubble's data
Kolb

NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL



RADIAÇÃO DE FUNDO CÓSMICA

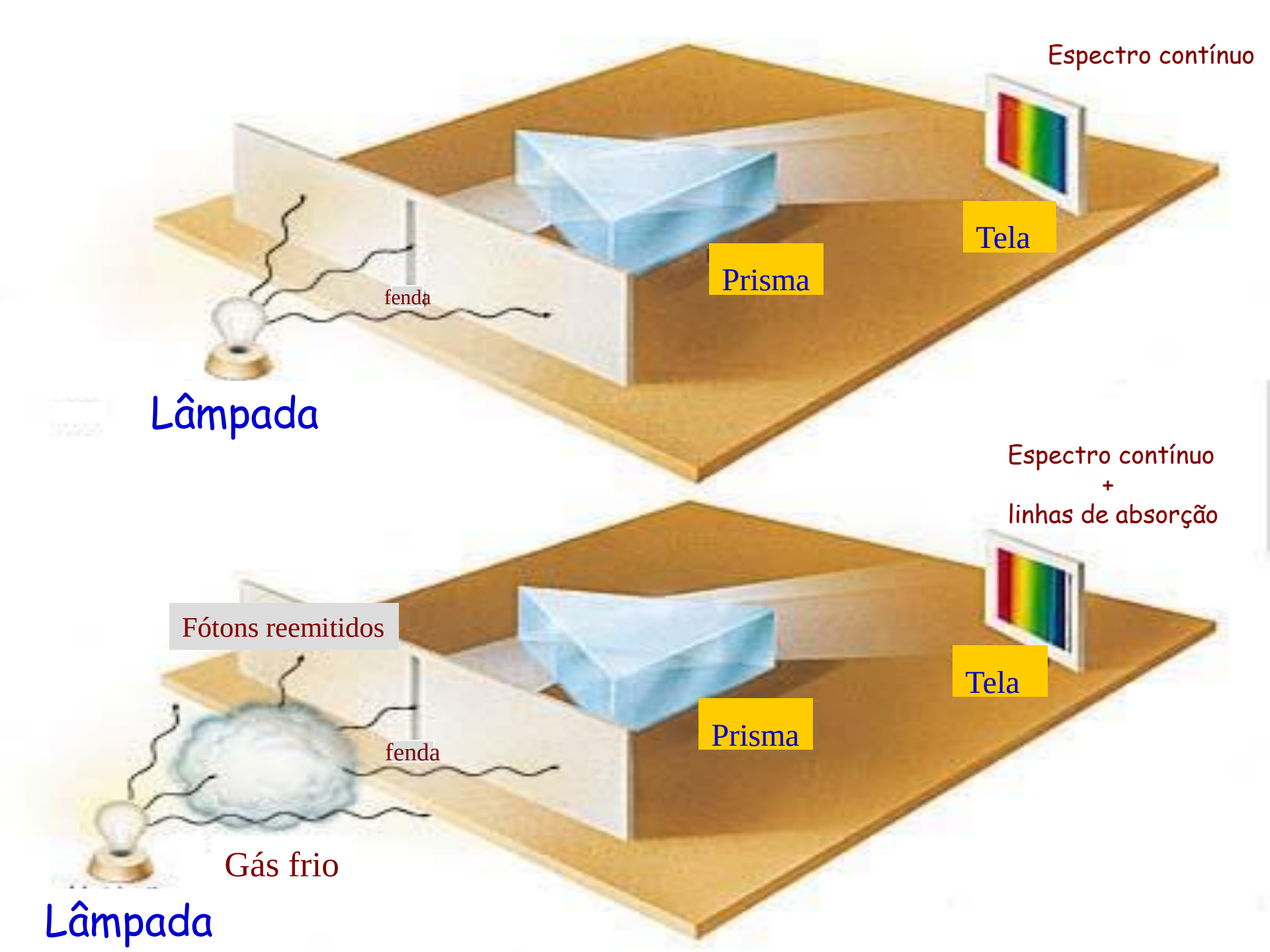


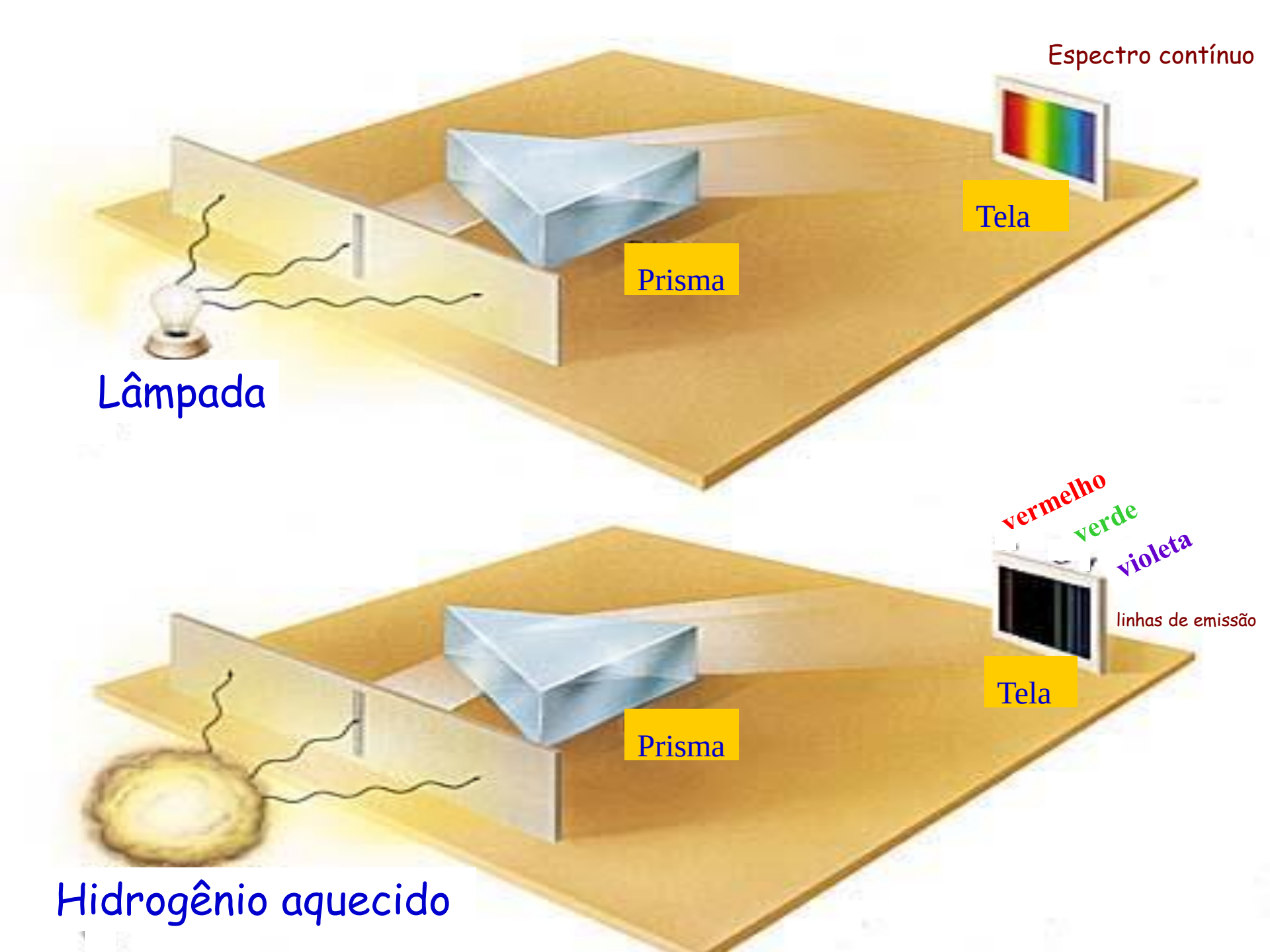
A expansão do Universo e a lei de Hubble.

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.**

O espectro da luz


Espectro contínuo
Tela
Prisma
fenda
Lâmpada
Espectro contínuo
+
linhas de absorção
Fótons reemitidos
Tela
Prisma
fenda
Gás frio
Lâmpada


Espectro contínuo
Tela
Prisma
Lâmpada
vermelho
verde
violeta
linhas de emissão
Tela
Prisma
Hidrogênio aquecido

Hidrogênio

Sódio

Hélio

Neonio

Mercúrio

Espectro de emissão de alguns elementos conhecidos

A expansão do Universo e a lei de Hubble.

V. M. Slipher

- **Em 1912 Slipher percebeu que as linhas espectrais de Andrômeda estavam no lugar errado, elas estavam deslocadas para o azul (região de menor comprimento de onda).**

Como interpretar o resultado de Slipher?

Efeito Doppler

Christian Doppler

- **1842 - Efeito Doppler**

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

C = 300 000 km/seg

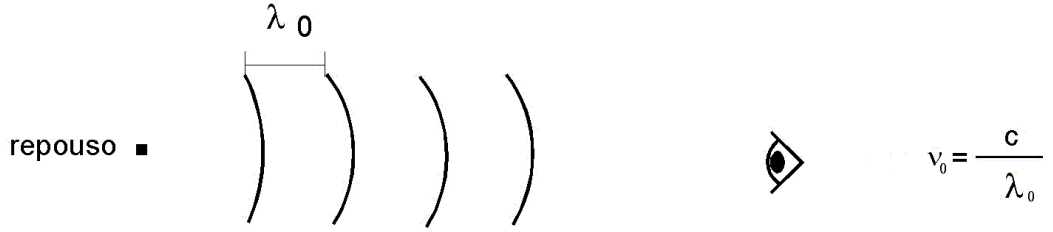
Válido para v muito menor que c

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

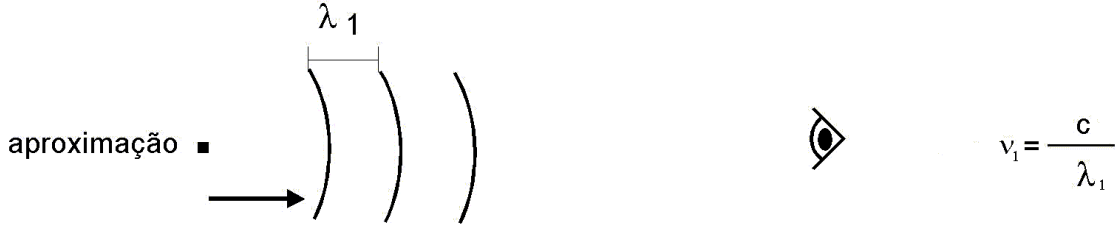
Efeito Doppler

Fonte emissora desloca-se em relação ao observador.

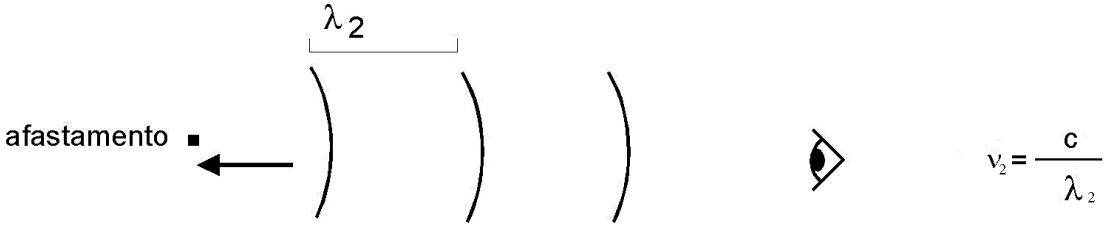
Fonte em repouso, emitindo luz a um comprimento de onda λ_0.



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

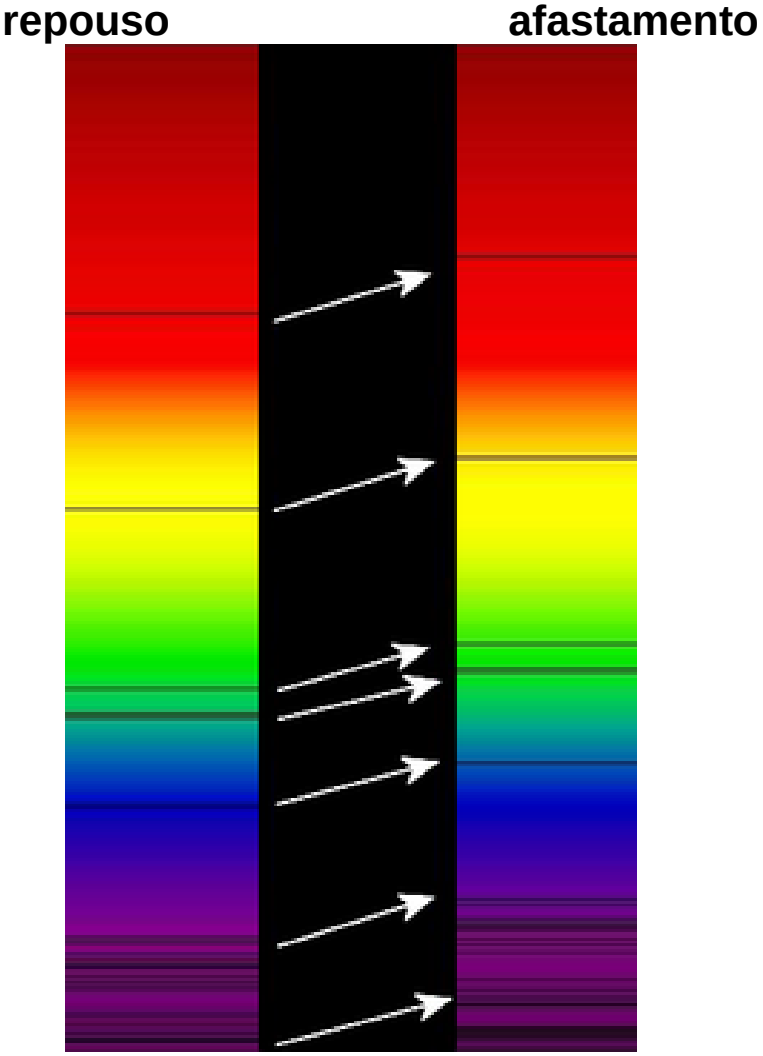


Fonte afasta-se: comprimento de onda observado será maior ($\lambda_2 > \lambda_0$).



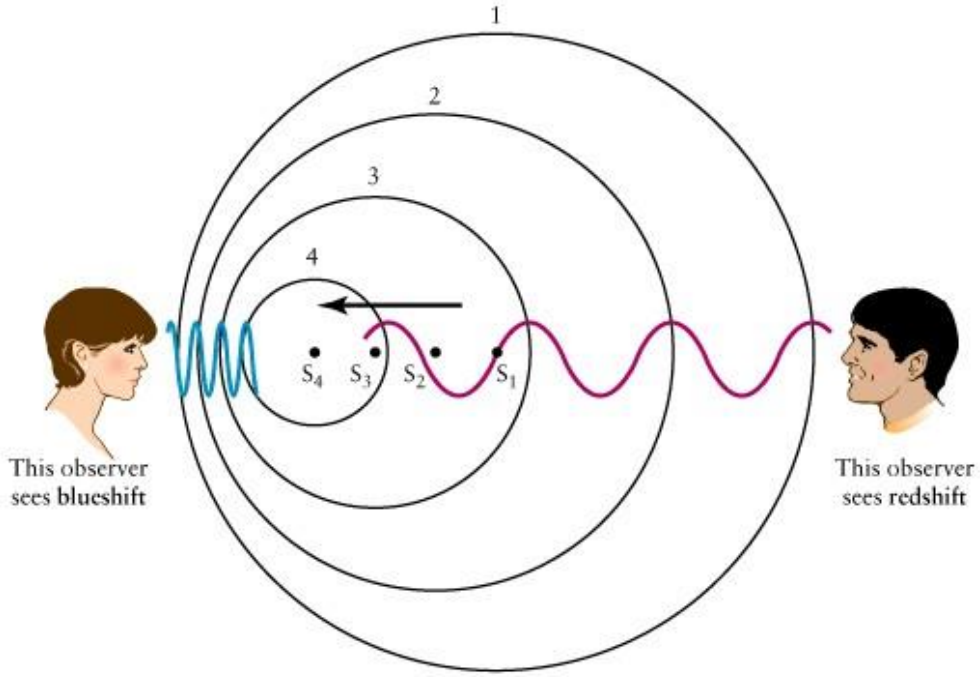
Desvio para o vermelho (redshift)

Para velocidades não-relativísticas (fonte com v << c)

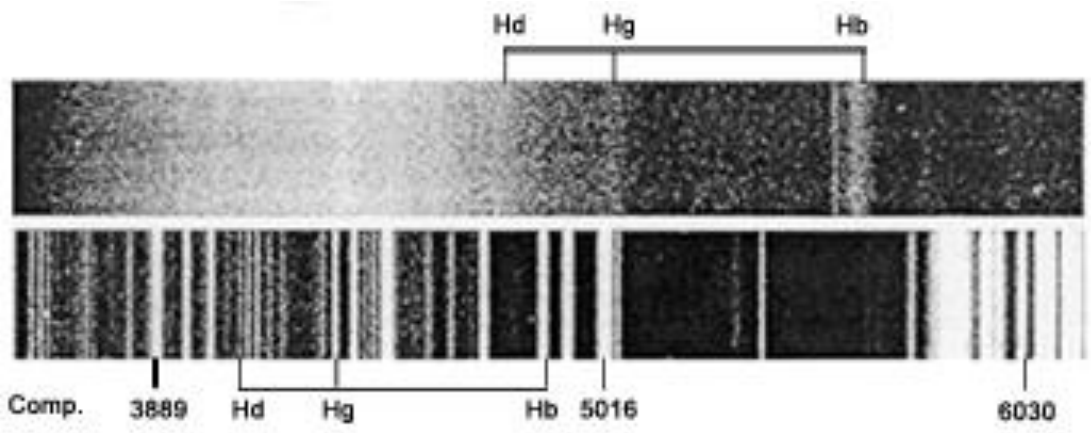


$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left(v / c \right)$$

$$\Delta\lambda / \lambda_0 = v / c$$



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

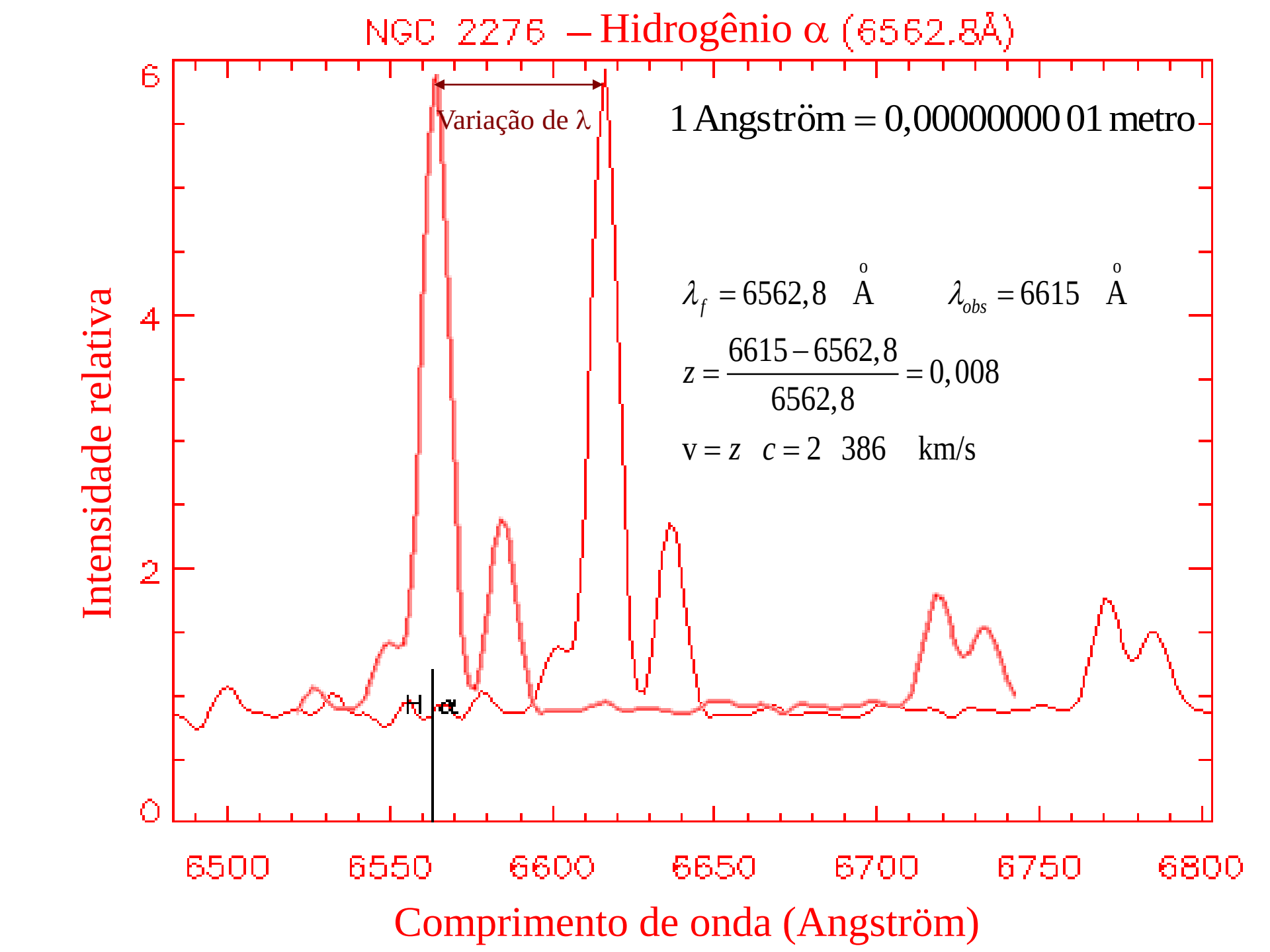


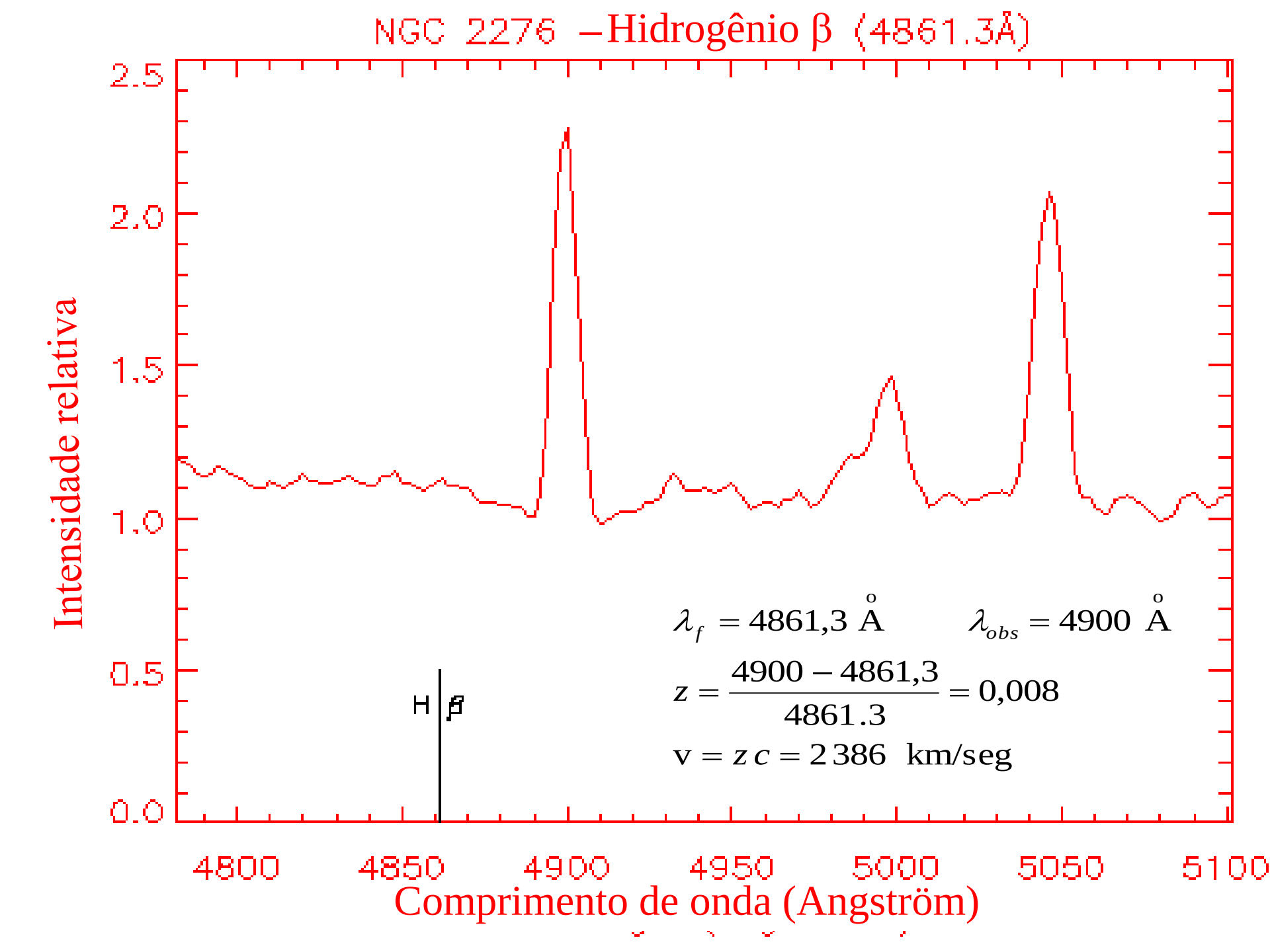
Maarten Schmidt
(Palomar, 1963)
z=0.158 p/ 3C273
$\Rightarrow$ 47 400 km/s

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

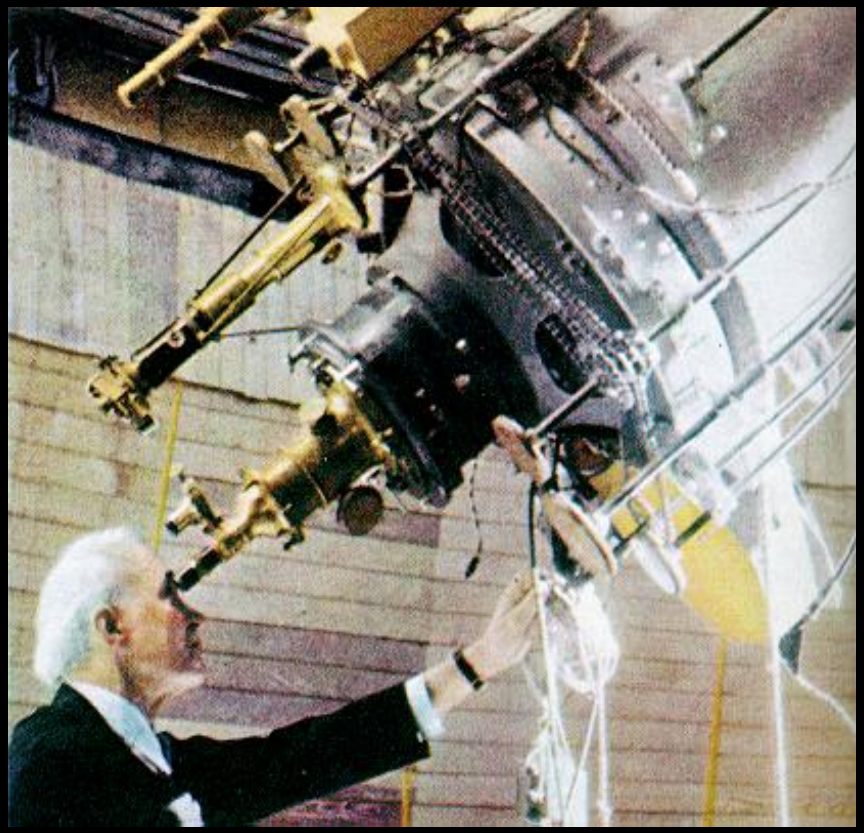
z = v/c
c = 300 000 km/seg

Válido para v muito menor que c


NGC 2276 – Hidrogênio α (6562.8Å)
Variação de λ
1 Angström = 0,00000000 01 metro
$\lambda_f = 6562,8 \quad \mathring{A} \qquad \lambda_{obs} = 6615 \quad \mathring{A}$
$z = \frac{6615 - 6562,8}{6562,8} = 0,008$
v = z c = 2 386 km/s
Intensidade relativa
0
2
4
6
6500
6550
6600
6650
6700
6750
6800
Comprimento de onda (Angström)


NGC 2276 – Hidrogênio β (4861.3Å)
Intensidade relativa
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
4800
4850
4900
4950
5000
5050
5100
Comprimento de onda (Angström)
H β
$\lambda_f = 4861{,}3$ Å
$\lambda_{obs} = 4900$ Å
$z = \frac{4900 - 4861{,}3}{4861.3} = 0{,}008$
$v = z\,c = 2386$ km/seg

A expansão do Universo e a lei de Hubble.

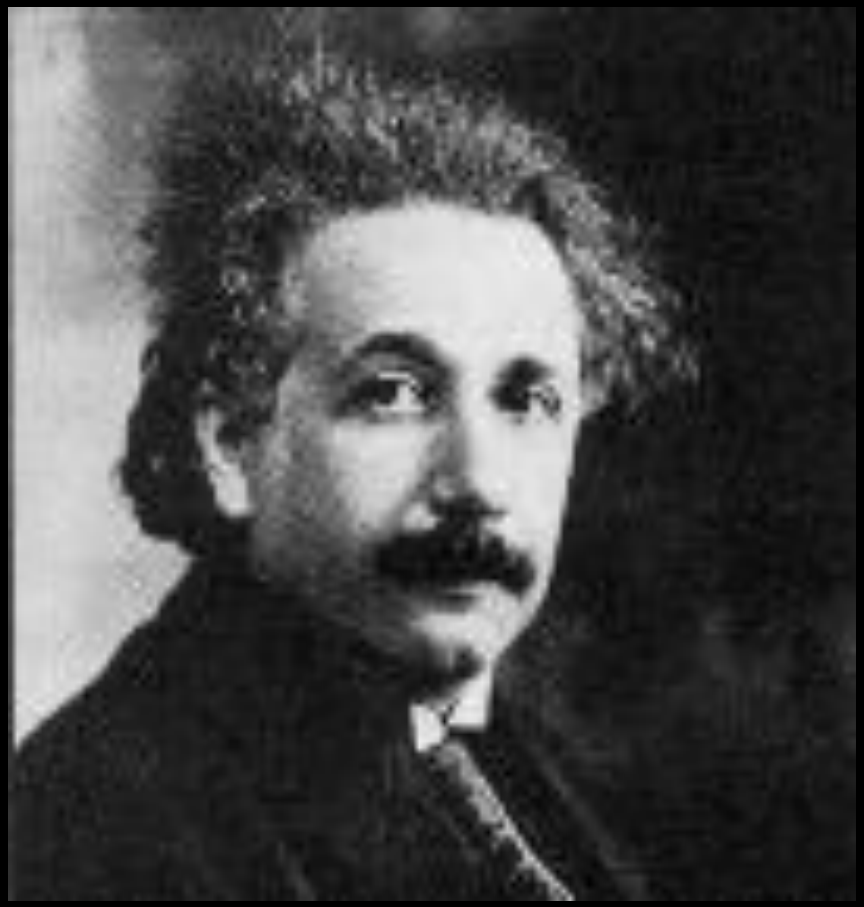


V. M. Slipher

- **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.**

Teoria

O Modelo de Einstein e a Constante Cosmológica



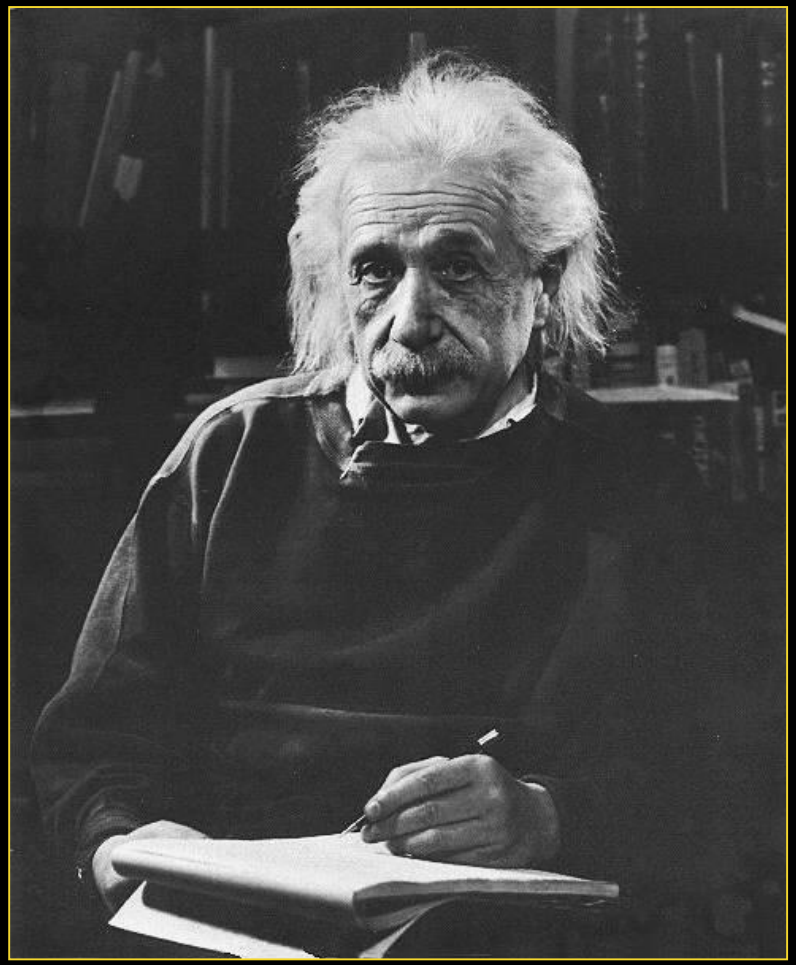
Albert Einstein

- 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



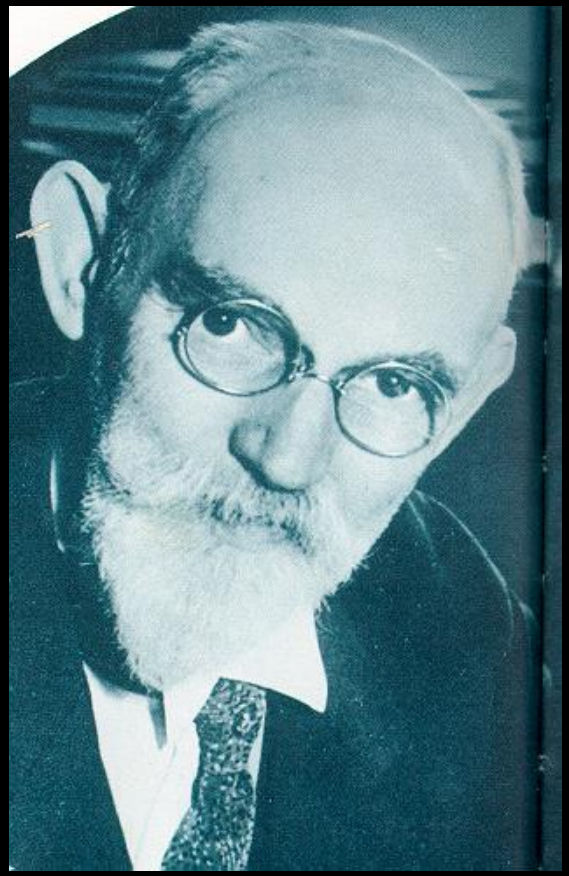
- **Einstein considerava que seu modelo possuía as seguintes virtudes:**

- **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

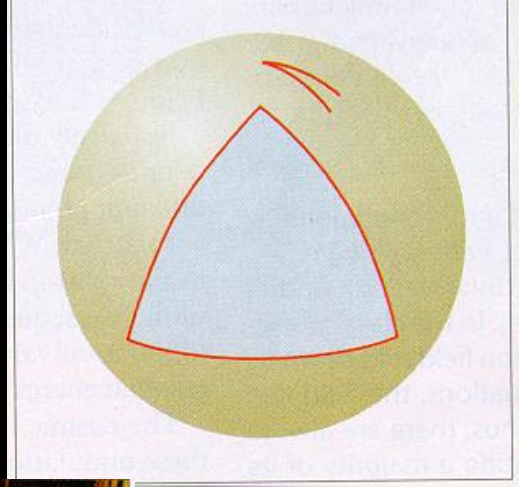
- Em 1917 de Sitter (holandês) obtem novas soluções da Relatividade Geral com constante cosmológica, estacionárias, mas vazias !
- **Efeito de Sitter:** a velocidade de afastamento de objetos aleatoriamente espalhados em um Universo de de Sitter aumenta com a distância.

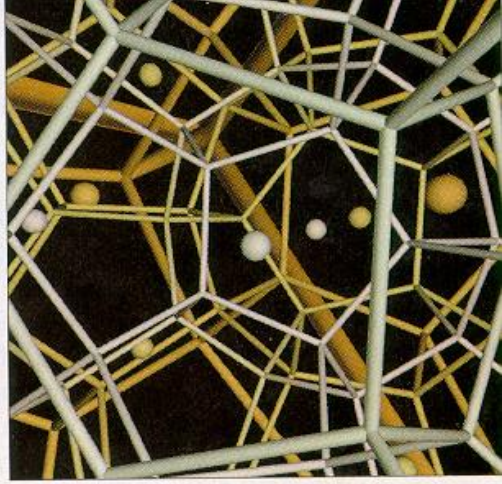
Modelo de Friedmann-Lemaître

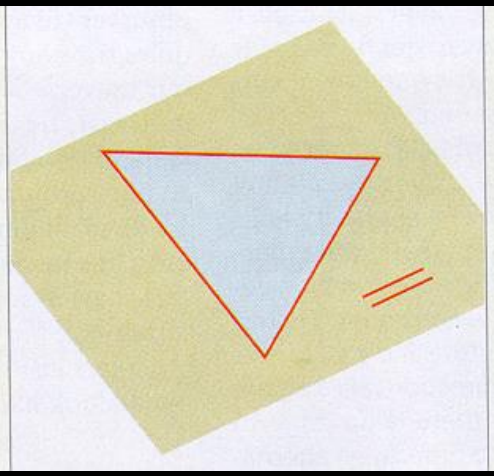
G. Lemaître

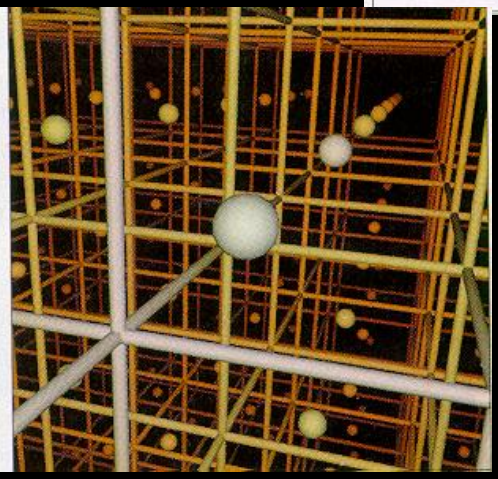
- 1922 - Aleksander Aleksandrovich Friedmann (russo) obtem soluções expansionistas, sem Λ e com matéria das equações de Einstein.
- O modelo de Friedmann é chamado hoje o modelo padrão da cosmologia.
- Características principais: homogeneidade, isotropia (em relação a qualquer ponto) e expansão.

Curvatura espacial positiva



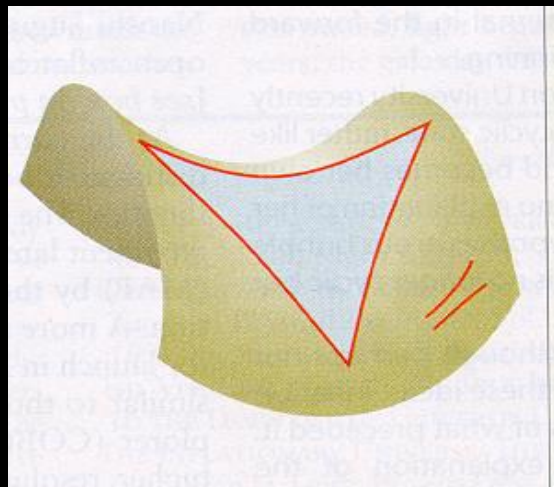


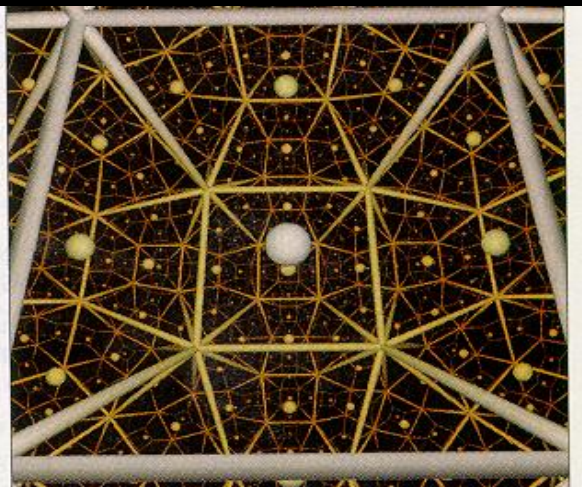




Curvatura espacial nula

Curvatura espacial negativa





A lei de Hubble.

Milton Humason e Hubble

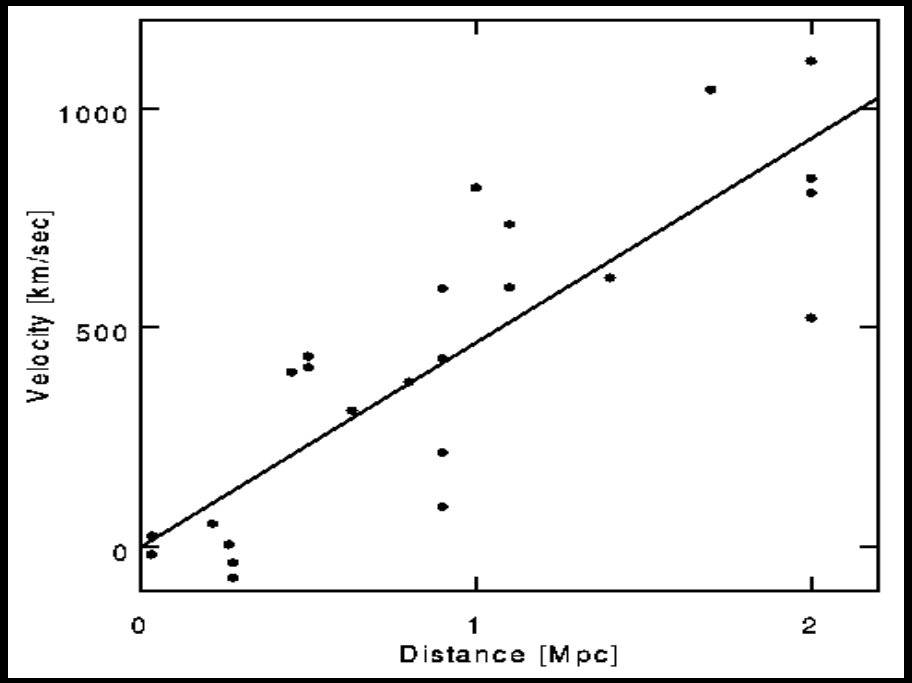
- Em 1929 e nos anos subsequentes Hubble sistematicamente estende suas medidas de distância, e usando desvios para o vermelho medidos por Humason, coloca sobre uma base firme a validade da relação que viria a se chamar ***Lei de Hubble***

A lei de Hubble.

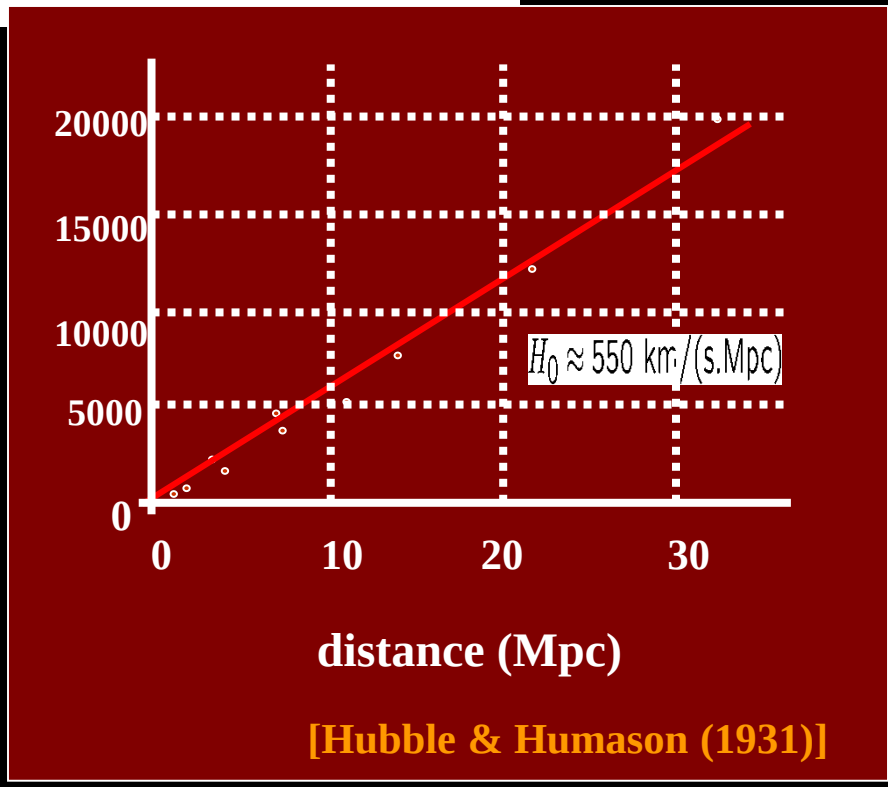
$$\text{desvio de velocidade de recessão} = H \times \text{distância}$$

$$cz = v$$

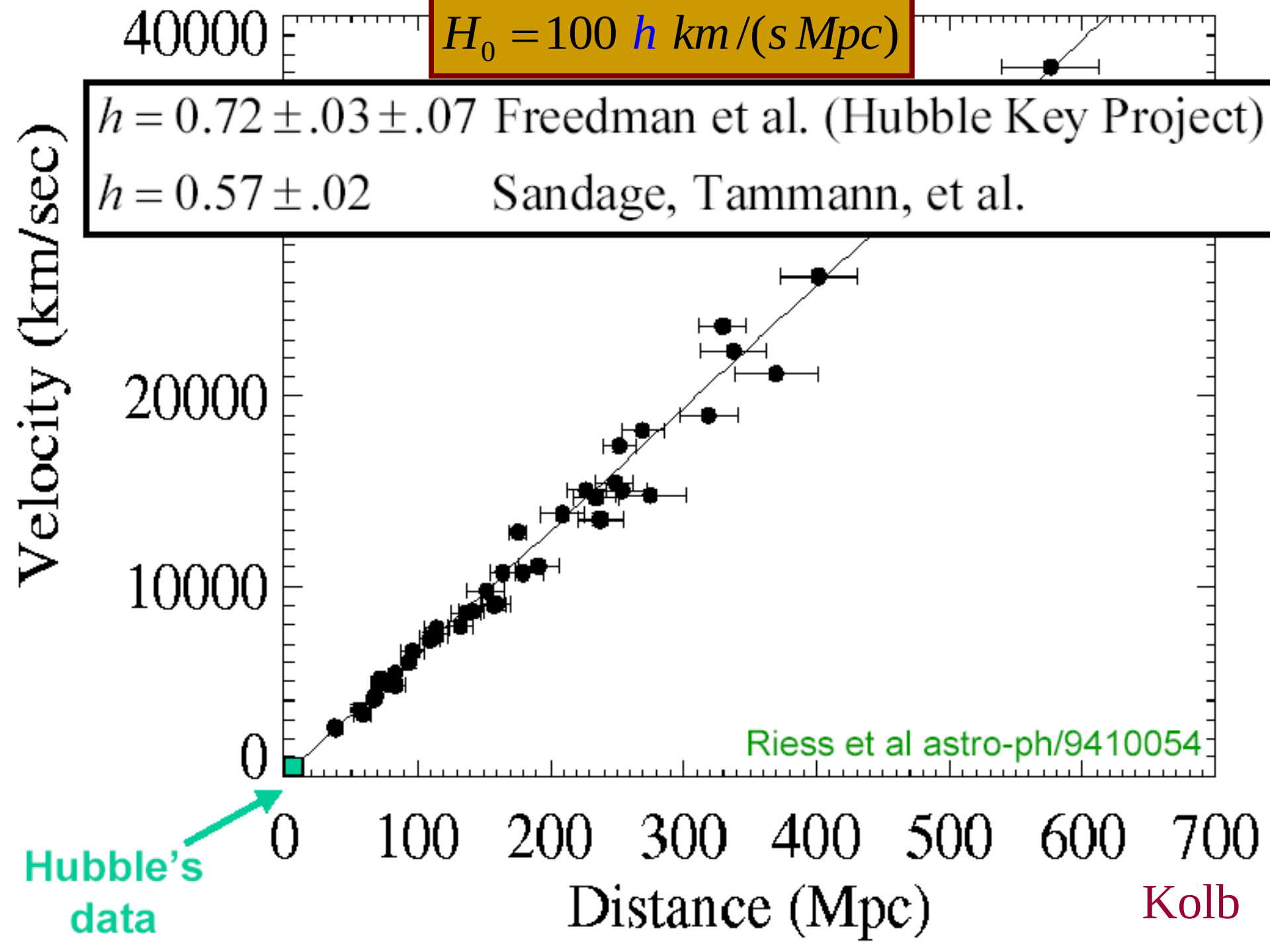
(mos)



[Hubble (1929)]



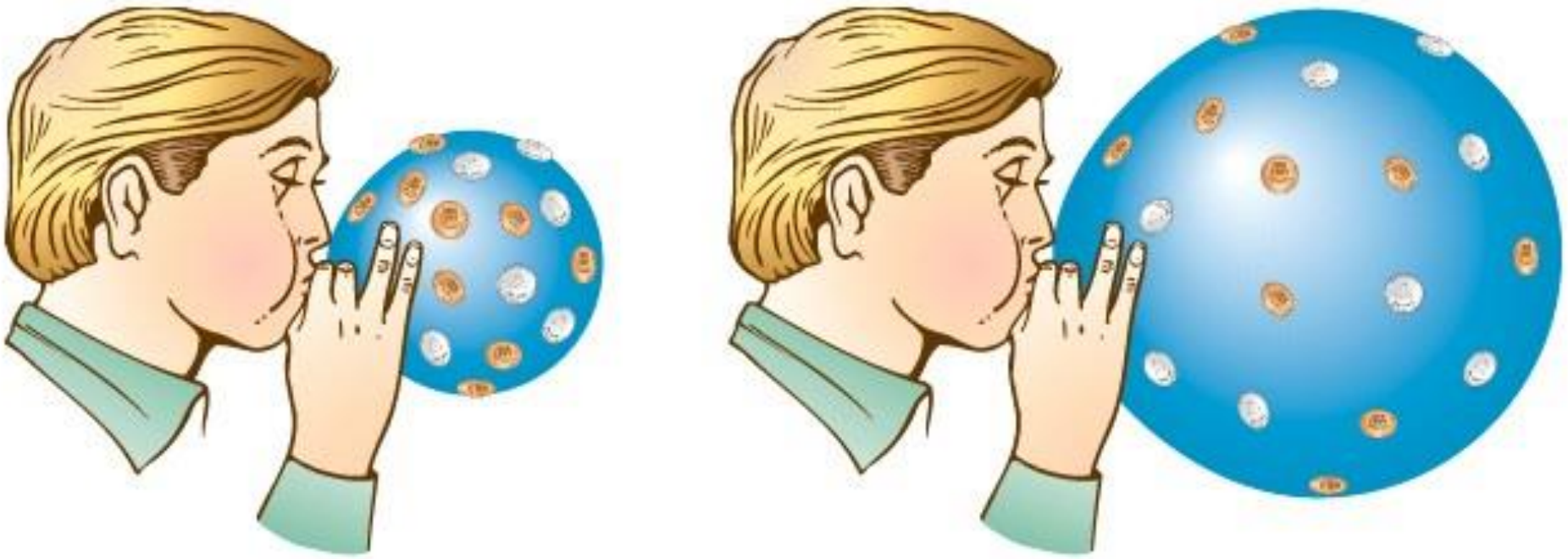
[Hubble & Humason (1931)]


$H_0 = 100\ h\ km/(s\,Mpc)$
$h = 0.72 \pm .03 \pm .07$ Freedman et al. (Hubble Key Project)
$h = 0.57 \pm .02$ Sandage, Tammann, et al.
Velocity (km/sec)
40000
20000
10000
0
Riess et al astro-ph/9410054
0
100
200
300
400
500
600
700
Distance (Mpc)
Hubble's data
Kolb

A lei de Hubble

Onde está o centro do Big Bang?

A lei de Hubble



Não há centro do Universo

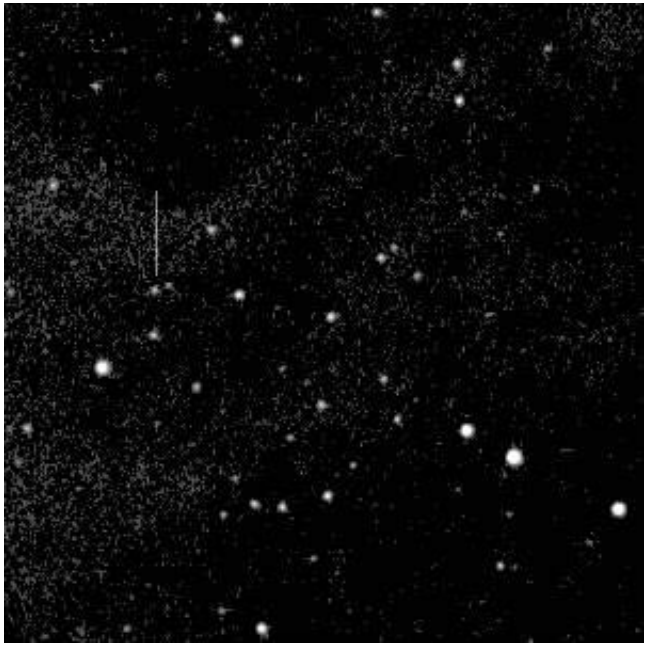
Para onde estão as galáxias se expandindo?

As galáxias estão se expandindo para o espaço vazio?

Não

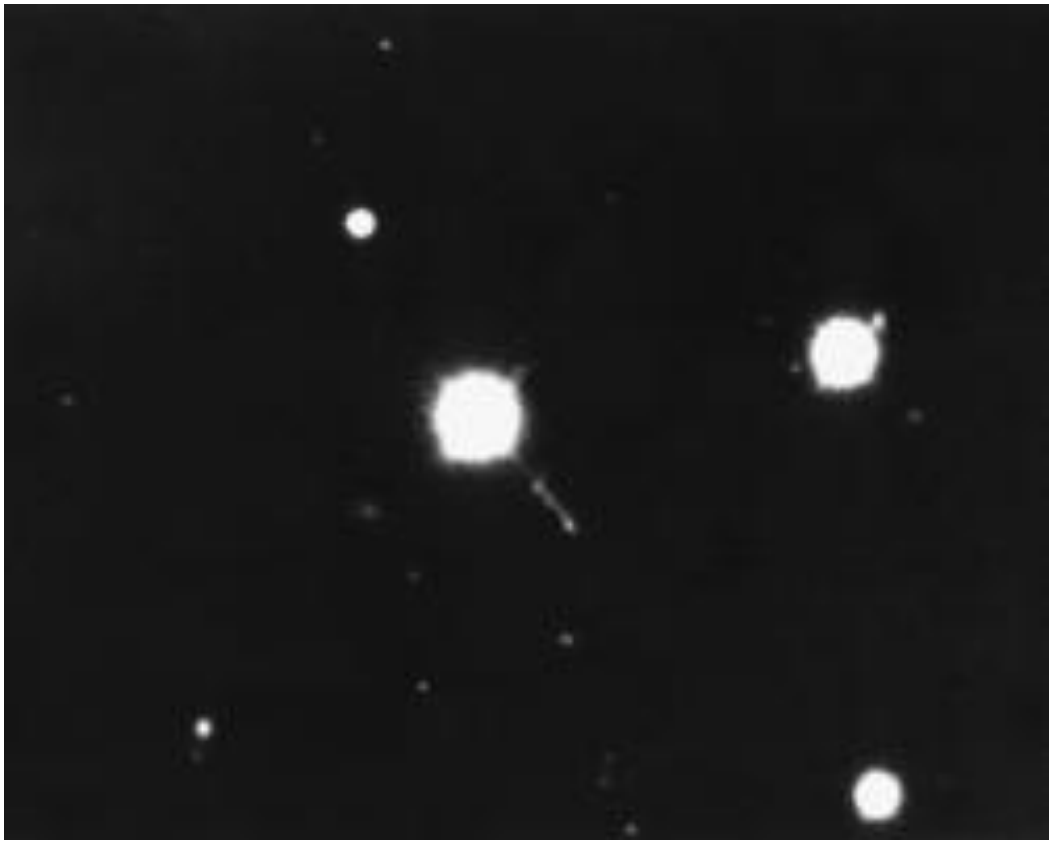
Sim

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?

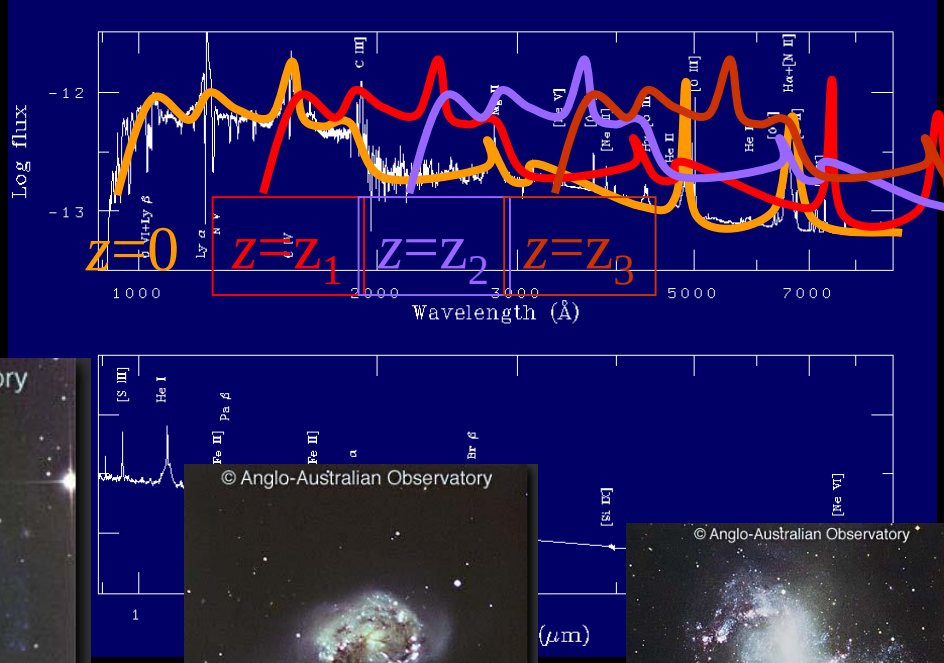
- As diversas definições de distância não coincidem em relatividade geral
- Desse modo é preferível usar o redshift
- Por exemplo, distância usada na lei de Hubble é a distância luminosidade

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

Definições de Distância

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

Mais Distante = Maior Redshift



z=0

z=z1

z=z2

z=z3

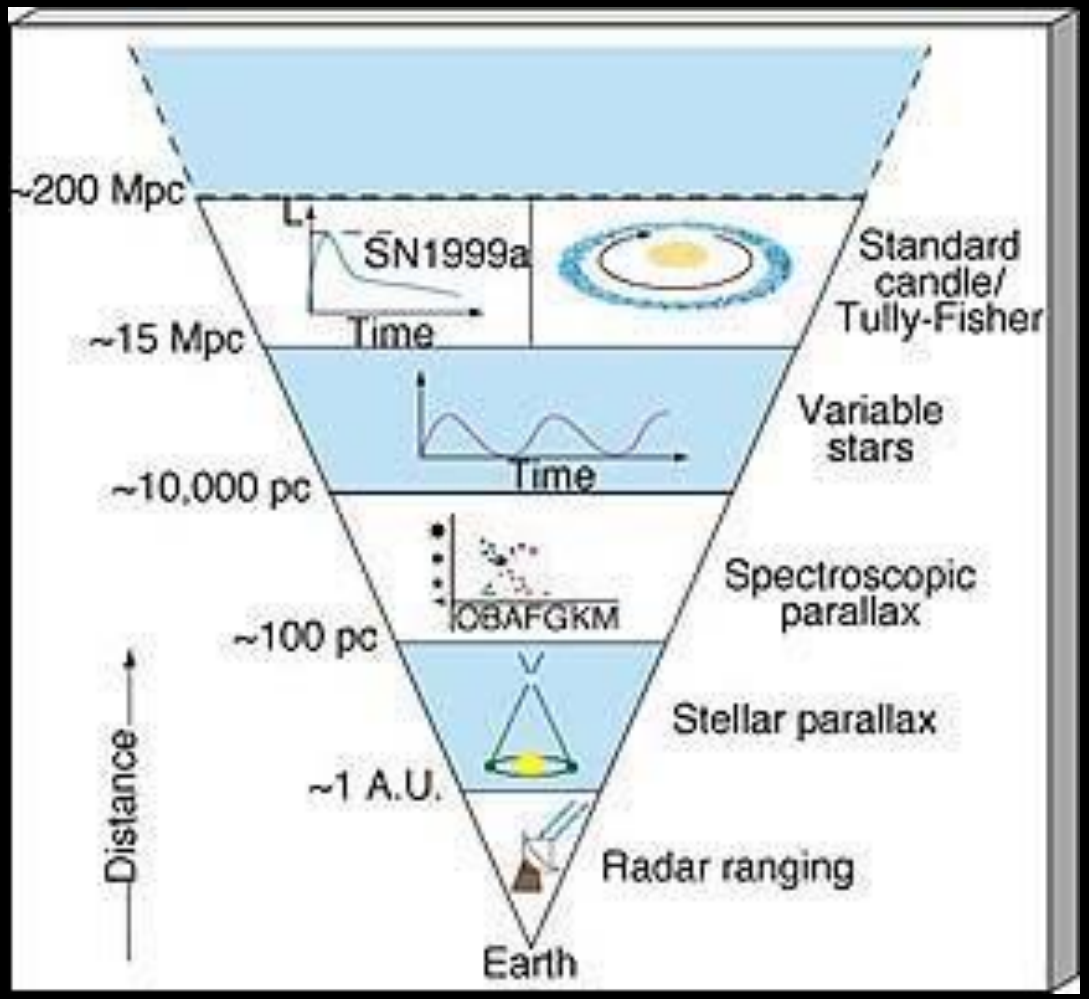
A Máquina do Tempo

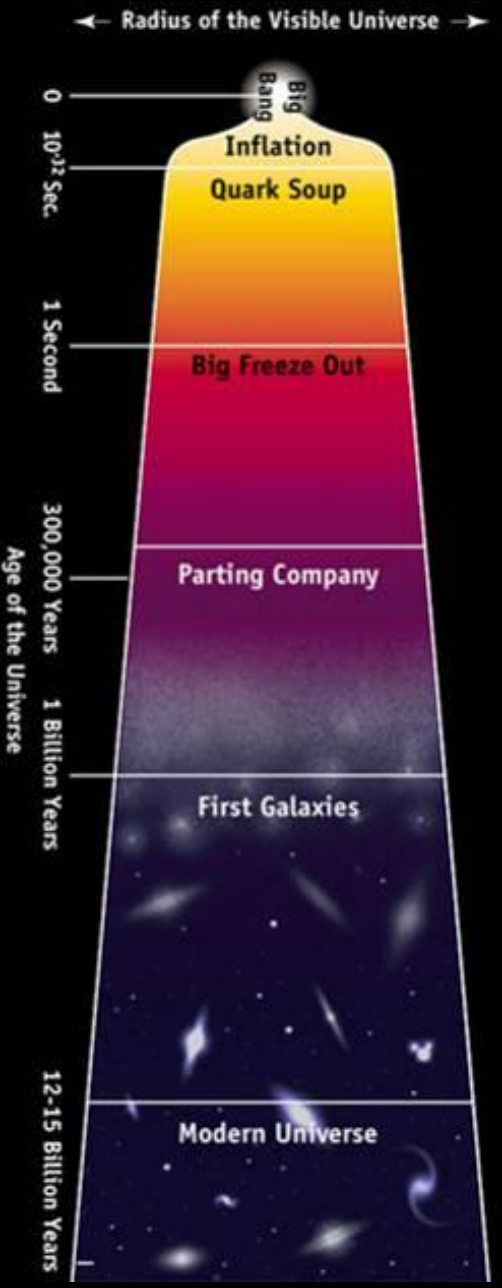
- Em uma observação astronômica, sempre estamos olhando o passado
- Quando observamos Andrômeda (M31), vemos algo que ocorreu 2 milhões de anos atrás
- Porém, compare isso com a Idade do Universo

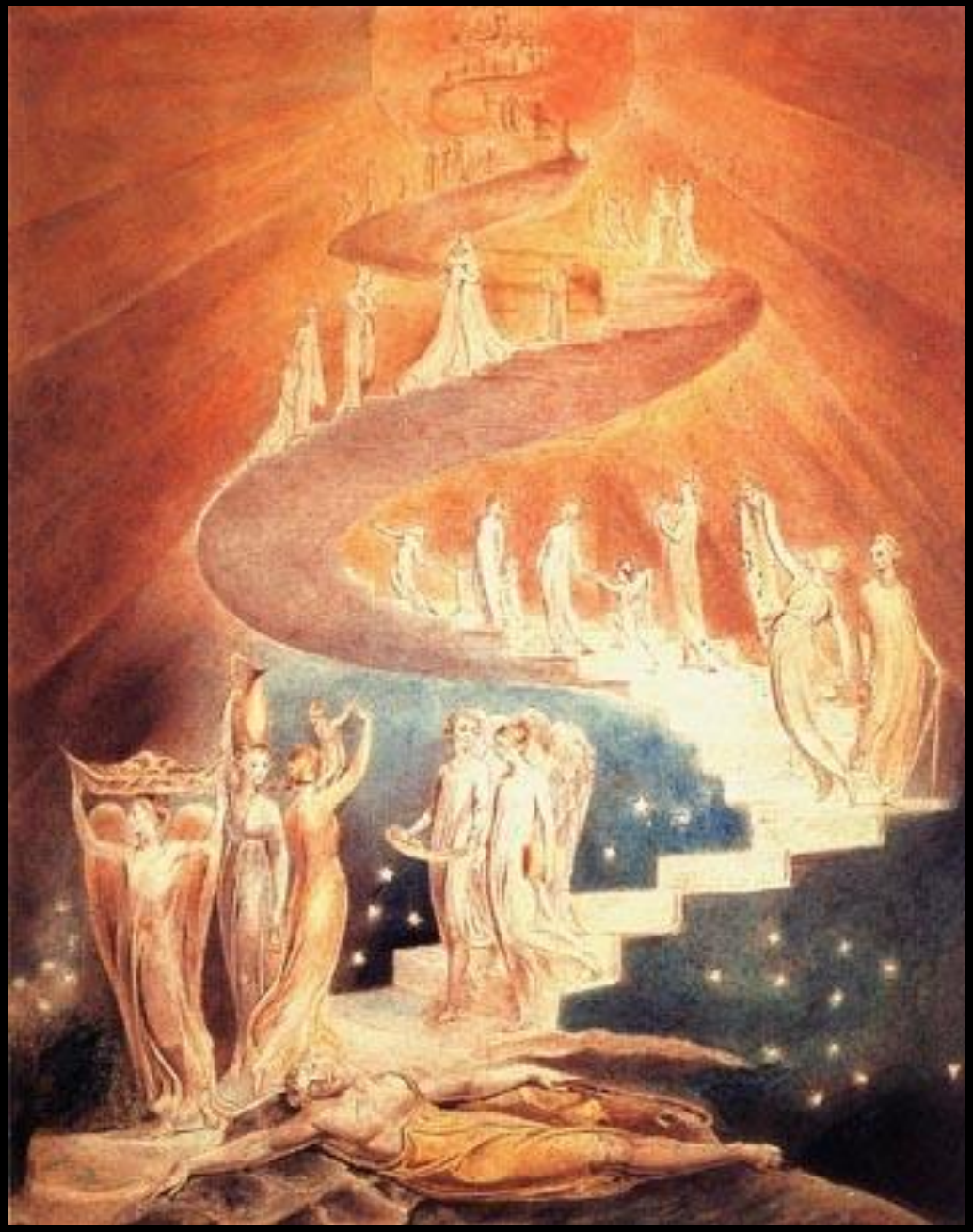
  $\rightarrow$ 13-15 bilhões de anos.
- No caso de quasares, porém estamos olhando para um passado com mais de 2 bilhões de anos

  $\rightarrow$ Cosmologia e evolução de galáxias

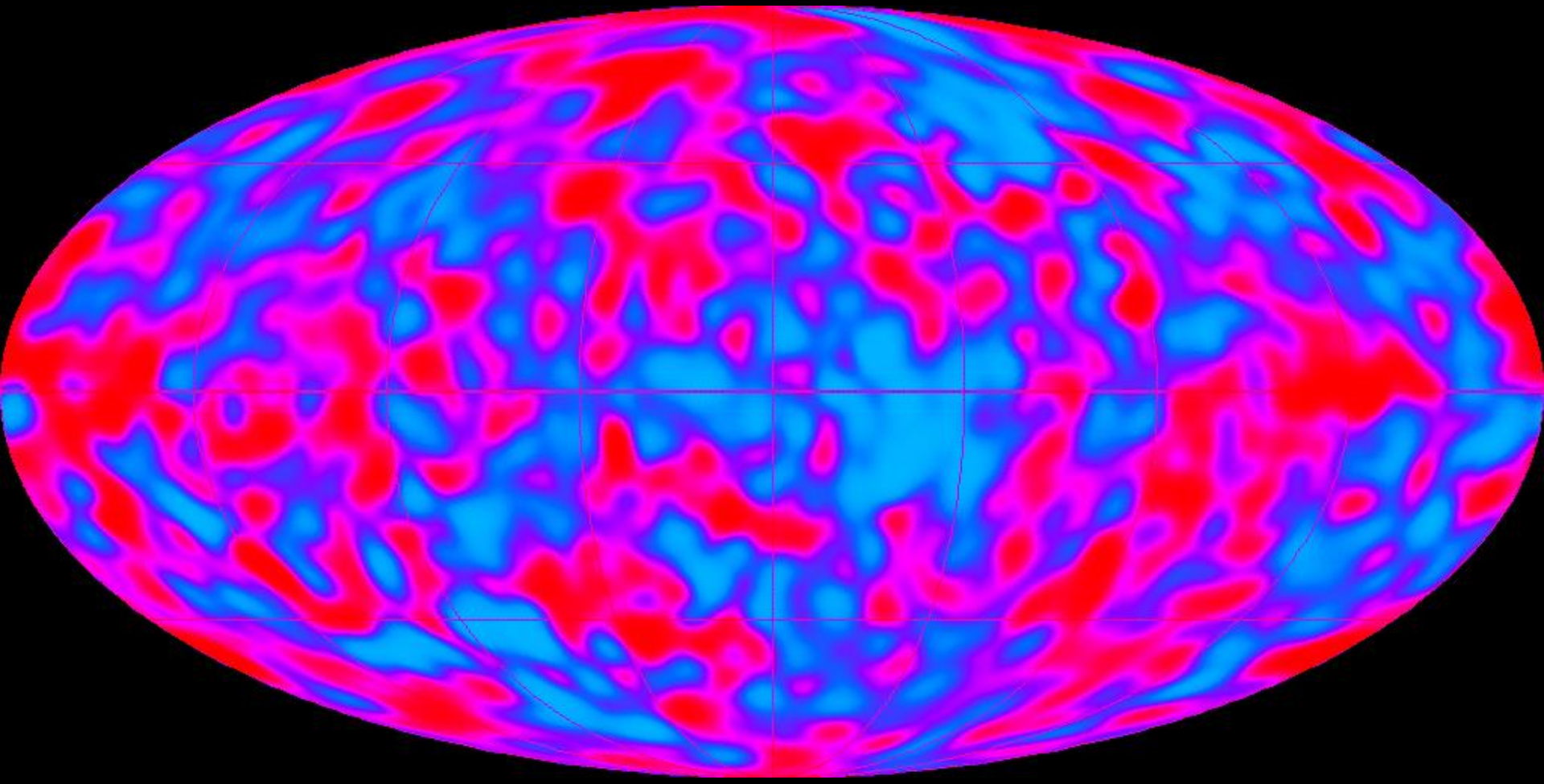
Cosmology "Double Helix" – Space and Time

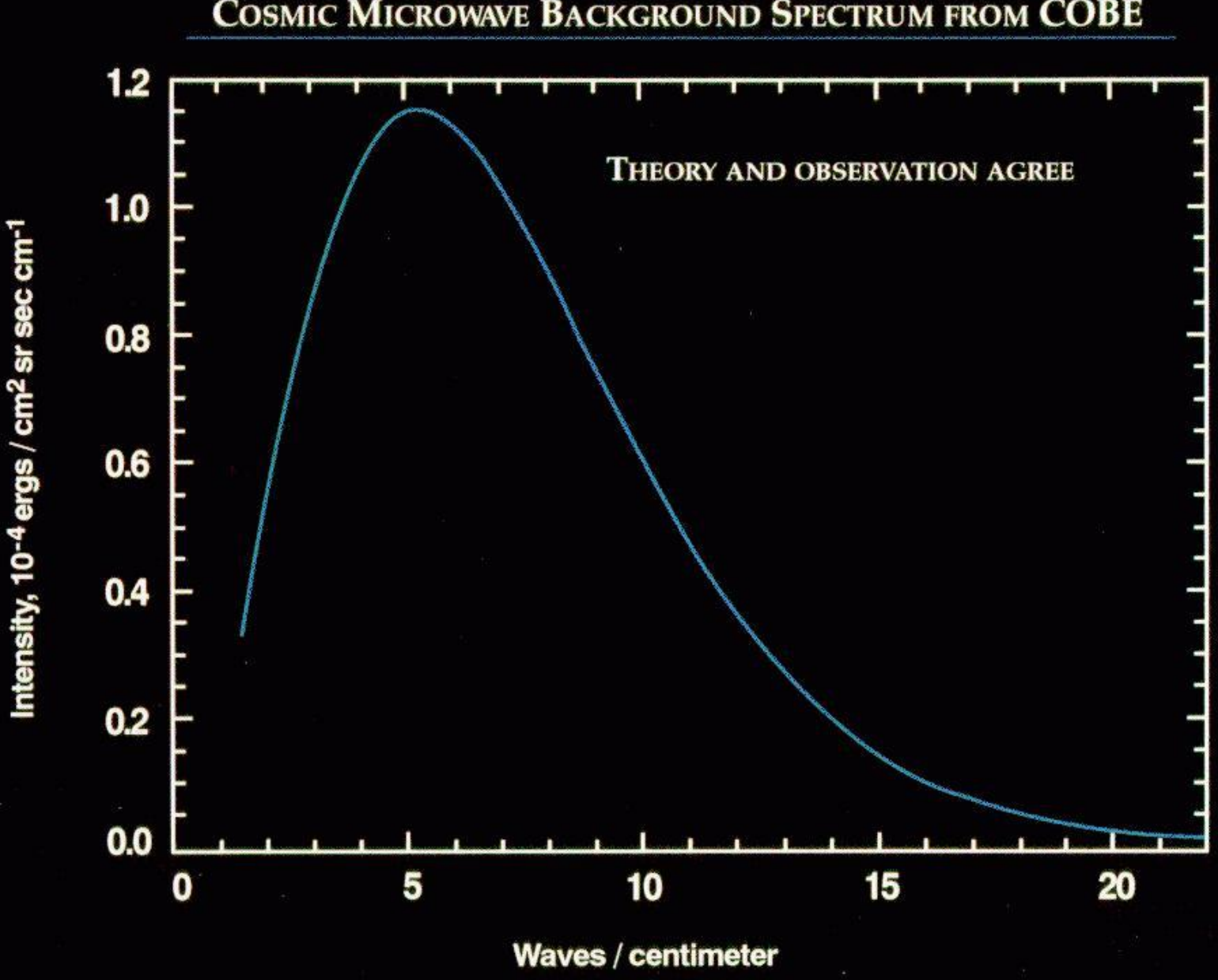






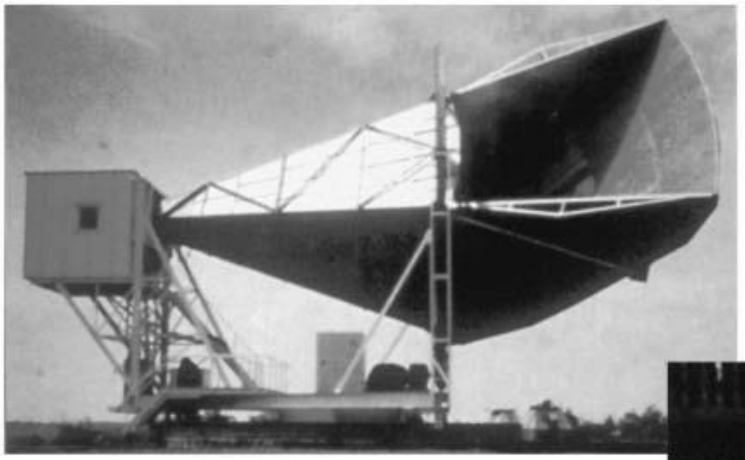
RADIAÇÃO DE FUNDO CÓSMICA



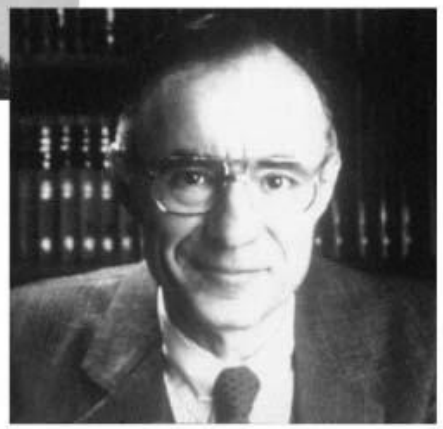

COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE
THEORY AND OBSERVATION AGREE
Intensity, 10-4 ergs / cm2 sr sec cm-1
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
5
10
15
20
Waves / centimeter

T=2,725 K

Descoberta da Radiação de Fundo Cósmica



Microwave Receiver



Arno Penzias

MAP990045

Robert Wilson

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

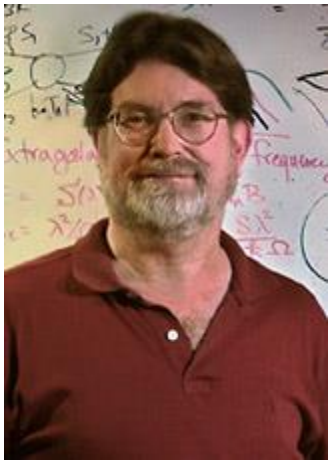


Photo: Berkeley

John C. Mather

1/2 of the prize

USA

NASA Goddard
Space Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946

George F. Smoot

1/2 of the prize

USA

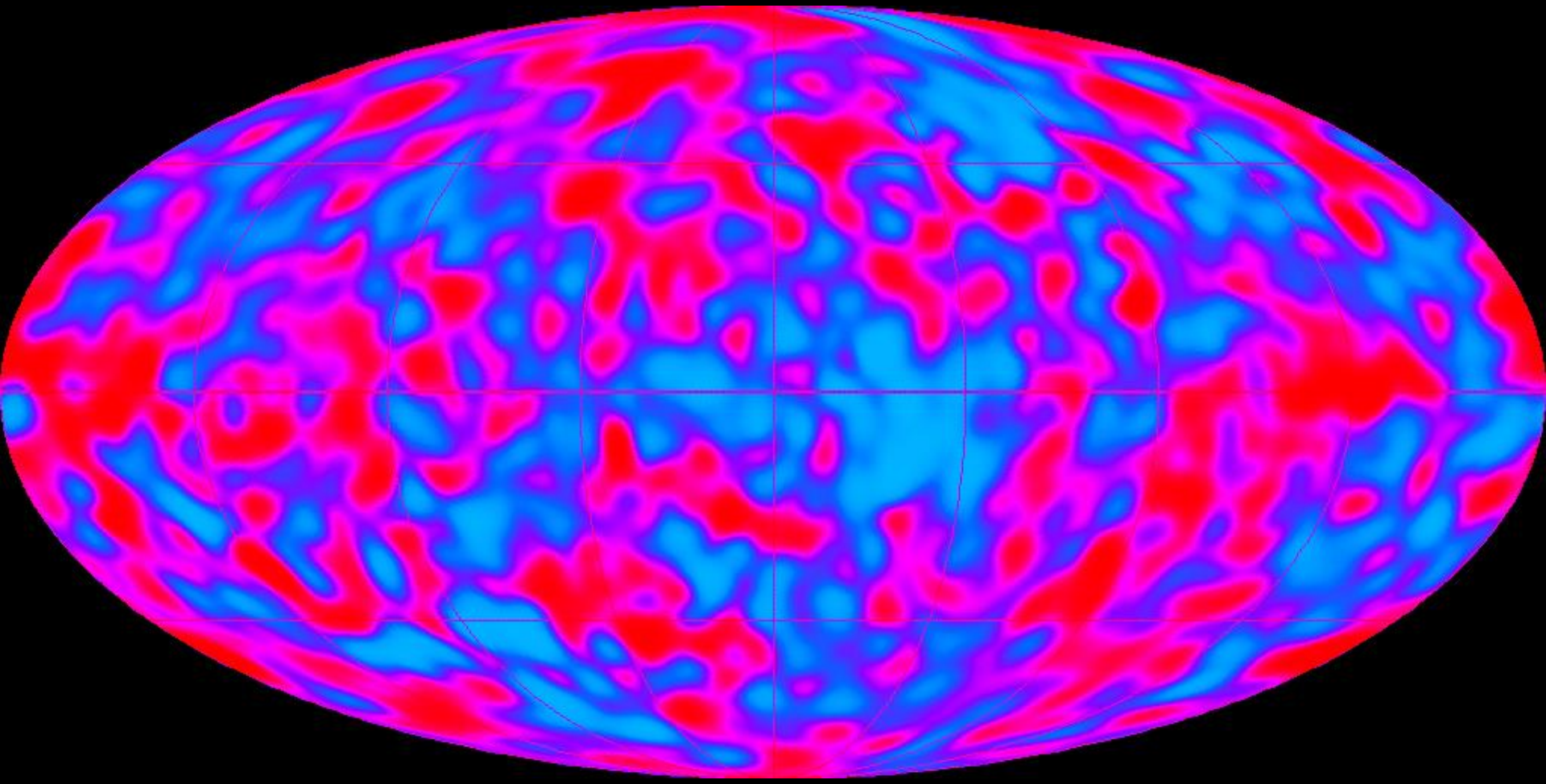
University of
California
Berkeley, CA, USA

b. 1945

Satélite COBE

Lançamento: 1992

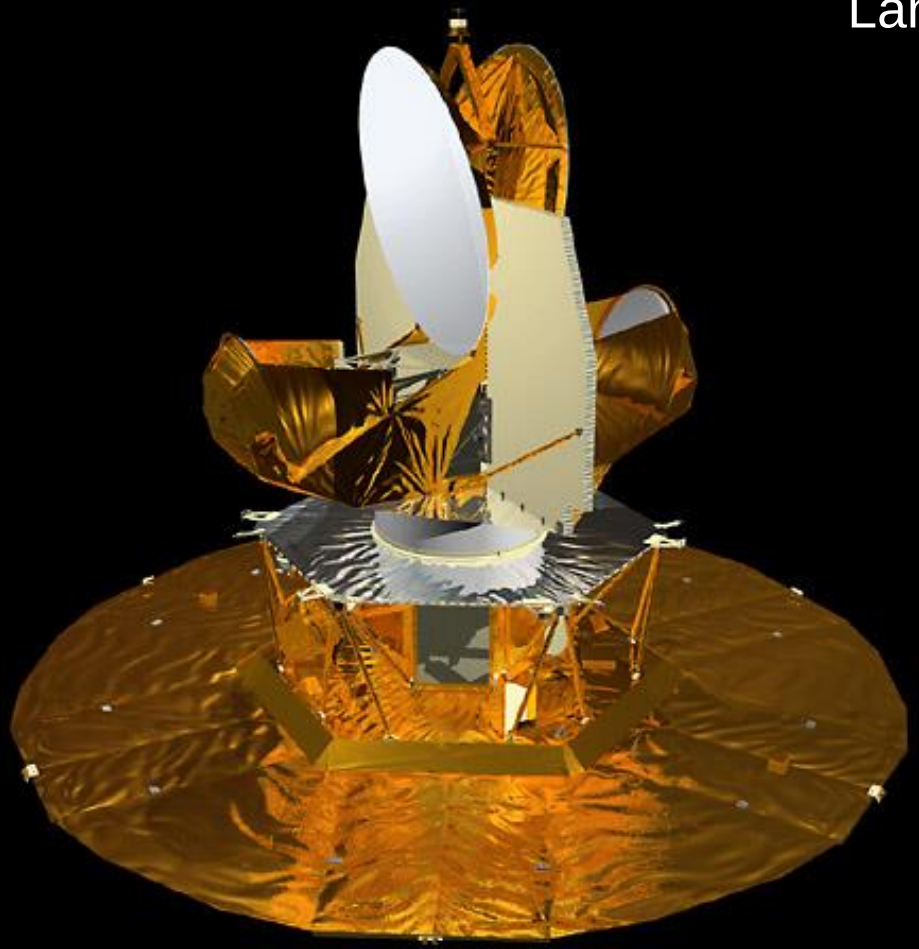
Resultados do COBE



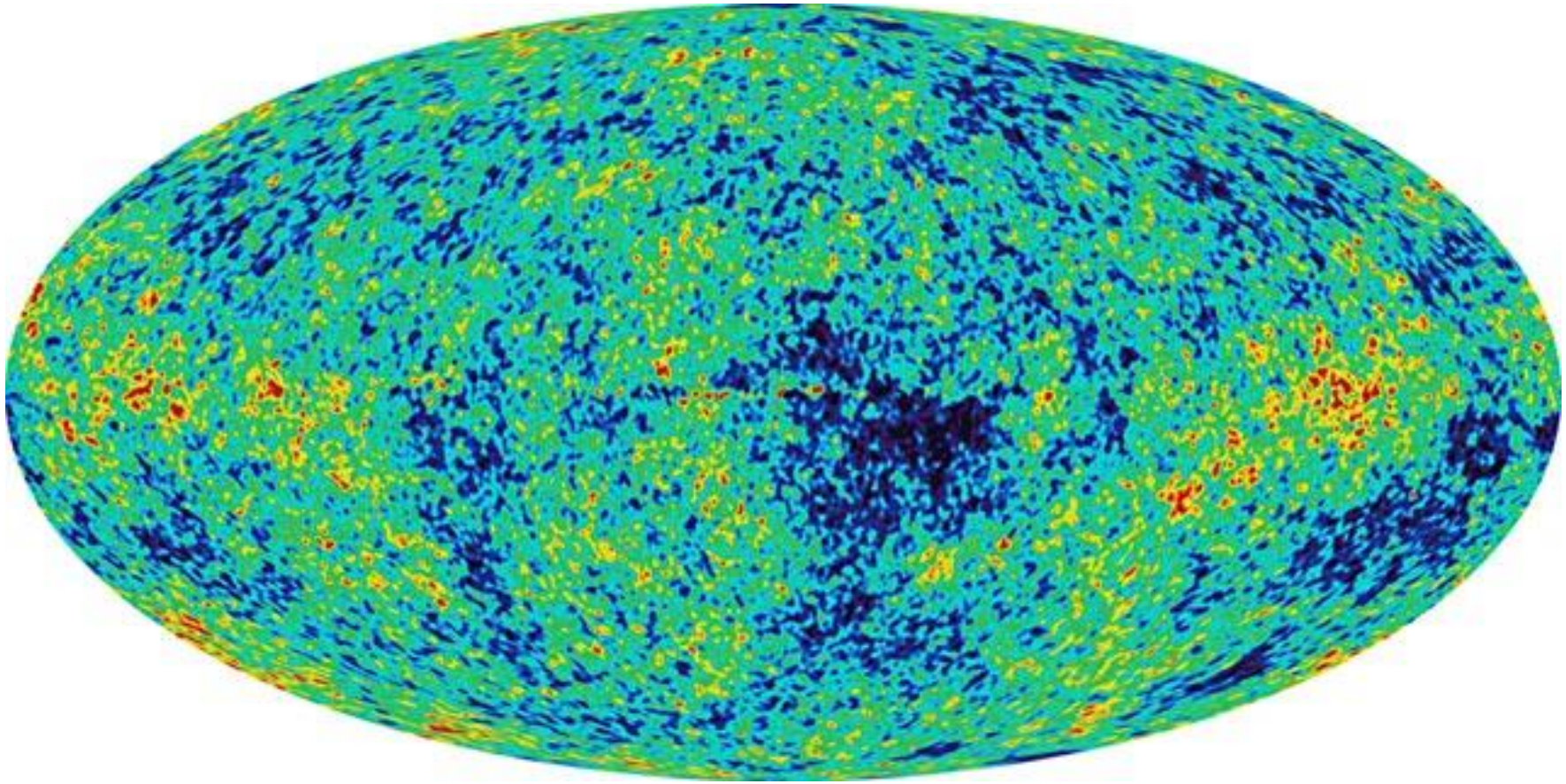
1996 (quatro anos)

Satélite WMAP

Lançamento: 2002

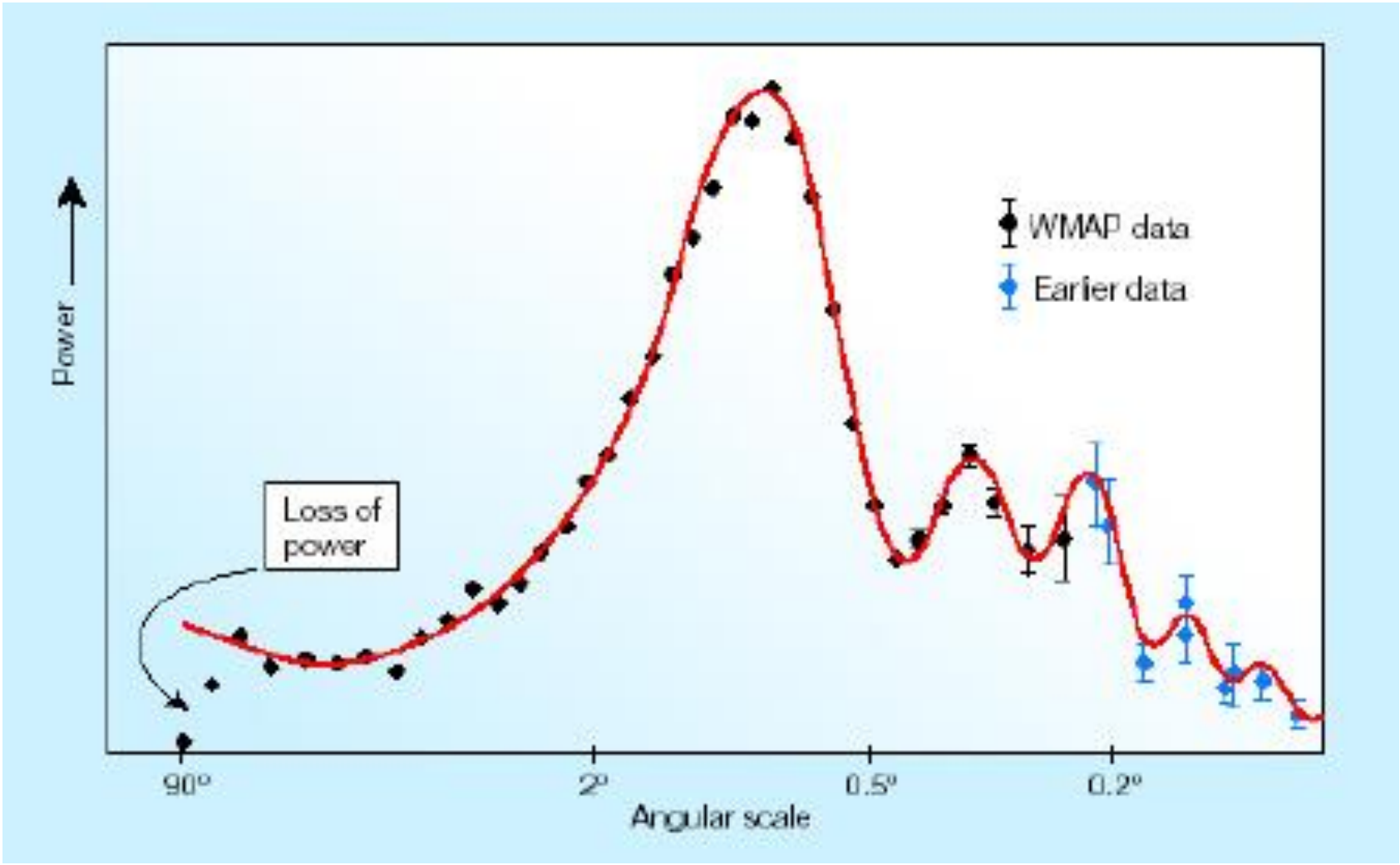


Resultados do WMAP

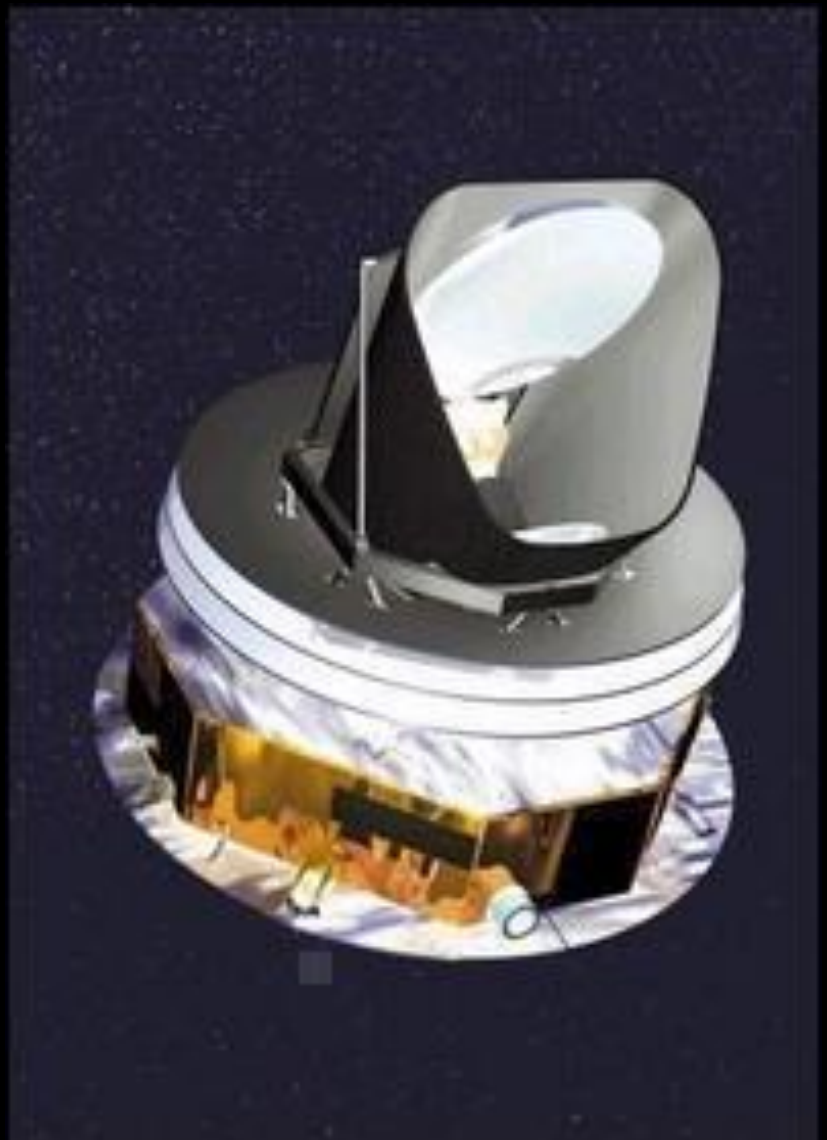


2003 (1 ano)

WMAP Anisotropy MAP

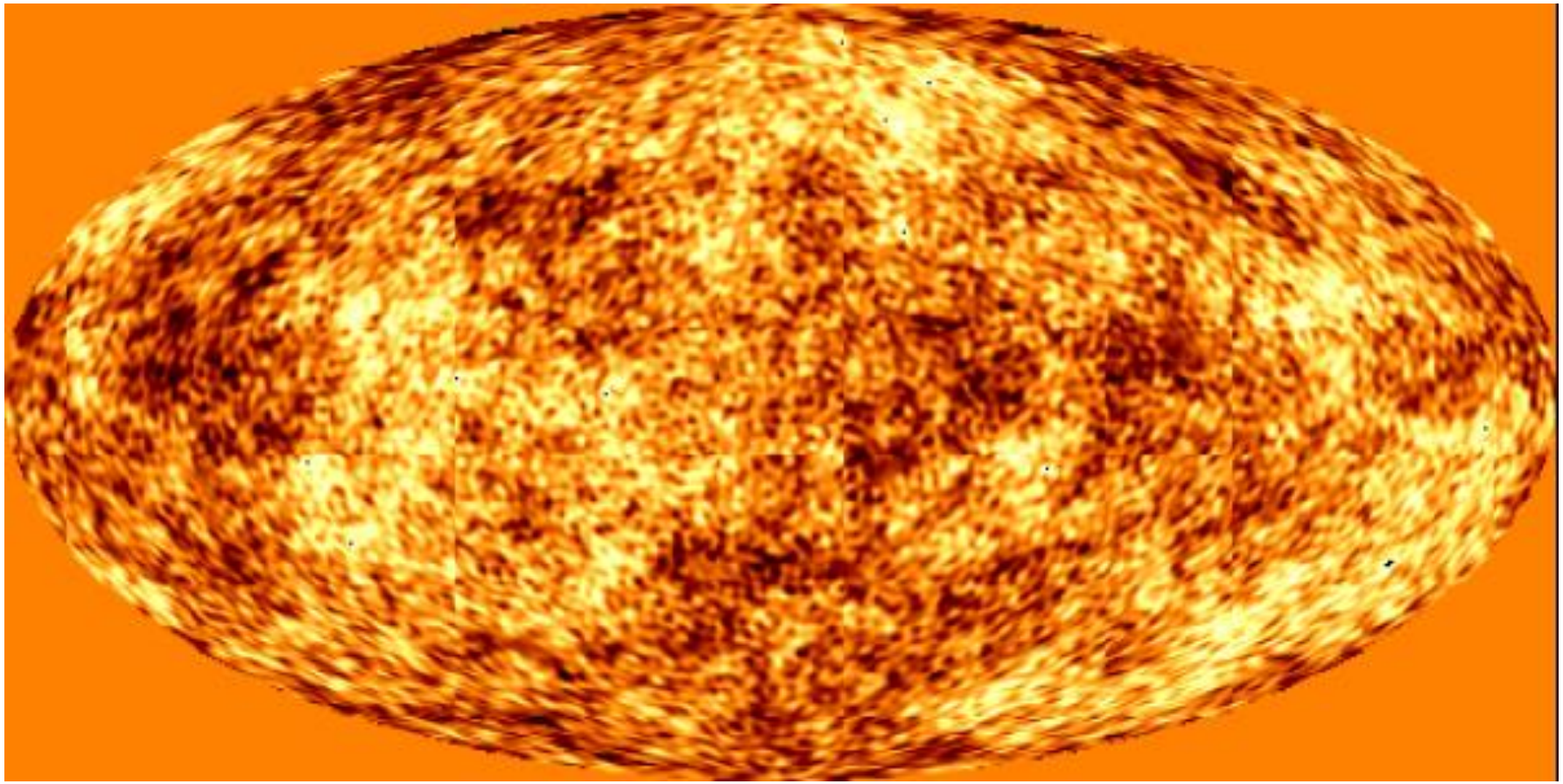


Satélite Planck



Lançamento: 2009

Resultados esperados do Planck



arXiv:astro-ph/0302207v3 5 Jun 2003

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 $k_0 = 0.05$ Mpc^{-1})[c]	A	0.833	0.086	0.083
Scalar spectral index (at $k_0 = 0.05$ Mpc^{-1})[c]	n_s	0.93	0.03	0.03
Running index slope (at $k_0 = 0.05$ Mpc^{-1})[c]	$dn_s/d\ln k$	-0.031	0.016	0.018
Tensor-to-scalar ratio (at $k_0 = 0.002$ 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 ($^\circ$)	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

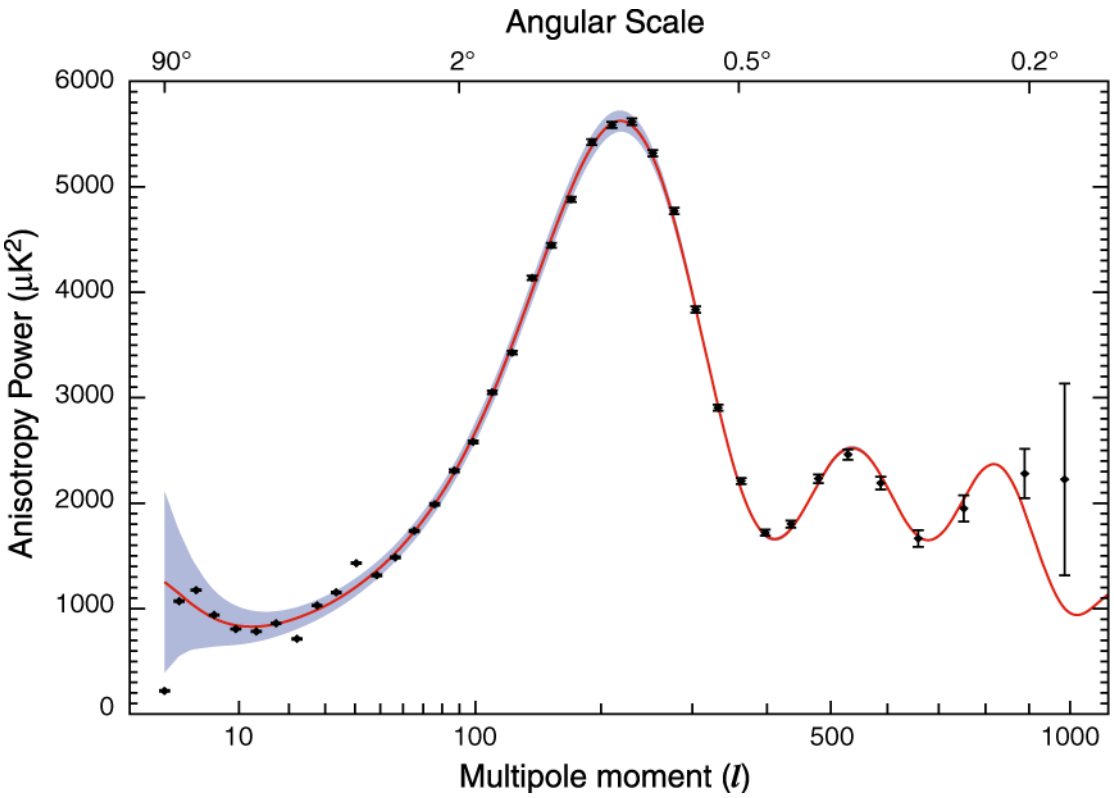
[a] from *COBE* (Mather et al. 1999)

[b] derived from *COBE* (Mather et al. 1999)

[c] $l_{eff} \approx 700$

[d] $\ell_A \equiv \pi \theta_A^{-1} \quad \theta_A \equiv r_s \, d_a^{-1}$

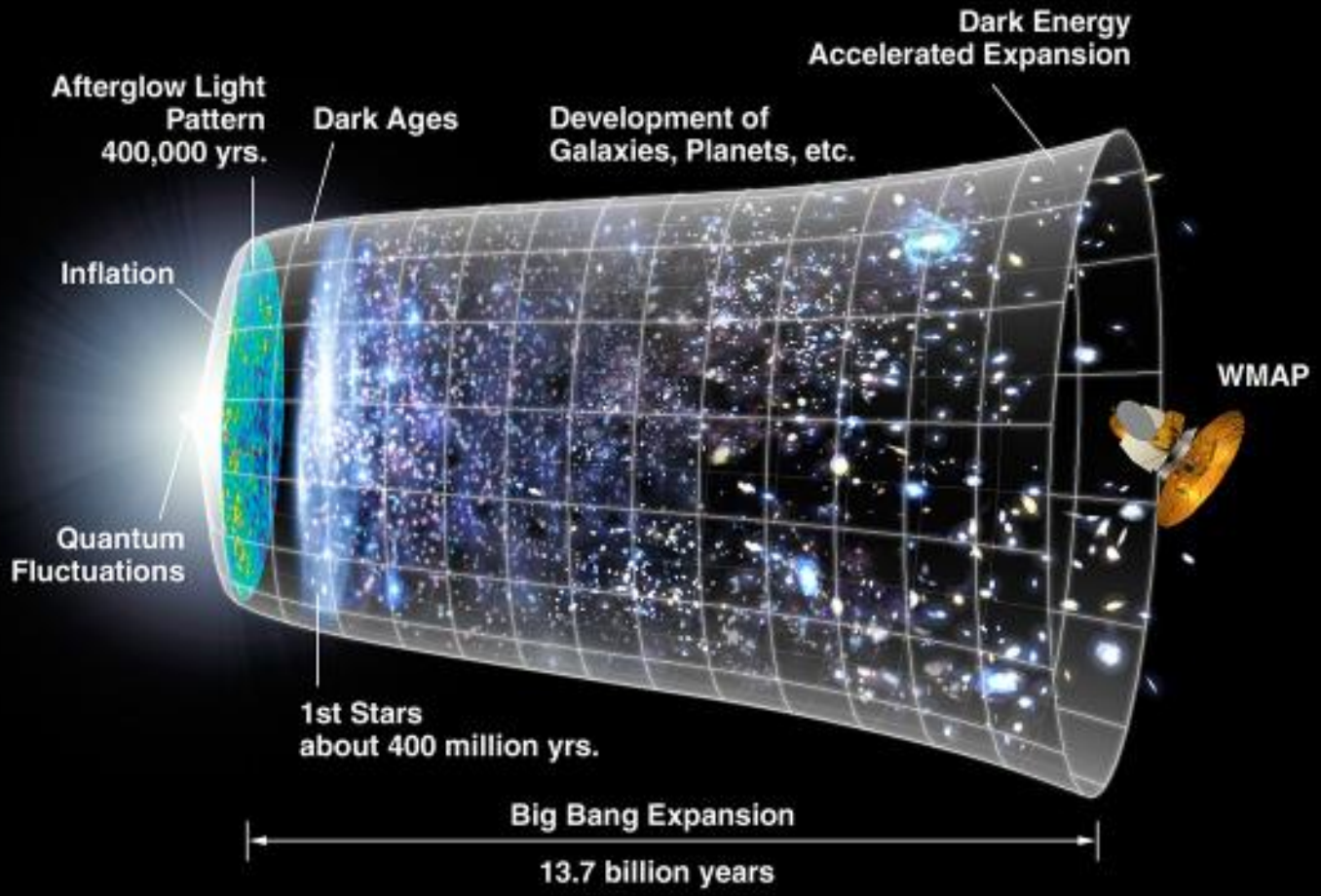
O Timbre do Universo



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 tranqüilos. 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 pessoínhas, que no fiim das contas também somos ecos daquele remoto pranto do universo recém nascido.



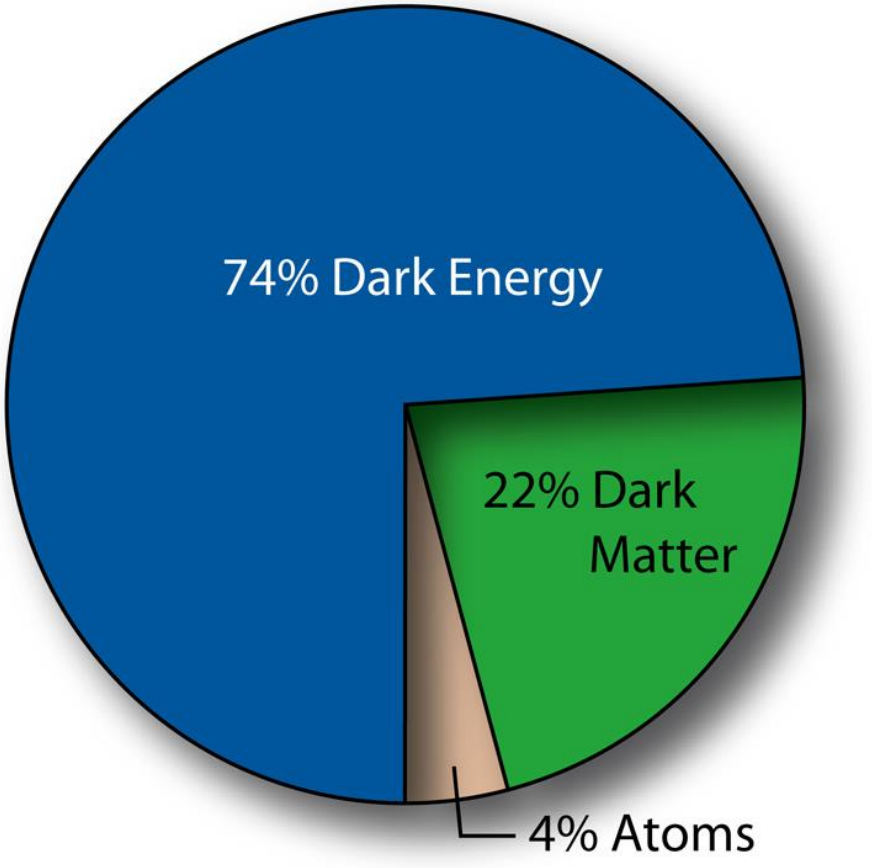
NASA/WMAP Science Team

Why Questions

- *Por que há algo em vez de nada?*
- *Por que existimos?*
- *Por que este conjunto particular de leis e não outro?*

Do que é feito o Universo?

A Receita do Universo



O Universo é peso pesado?

- Equações da Relatividade Geral
- Suposições:
  - Universo homogêneo
  - Universo isotrópico
- Densidade crítica: $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$

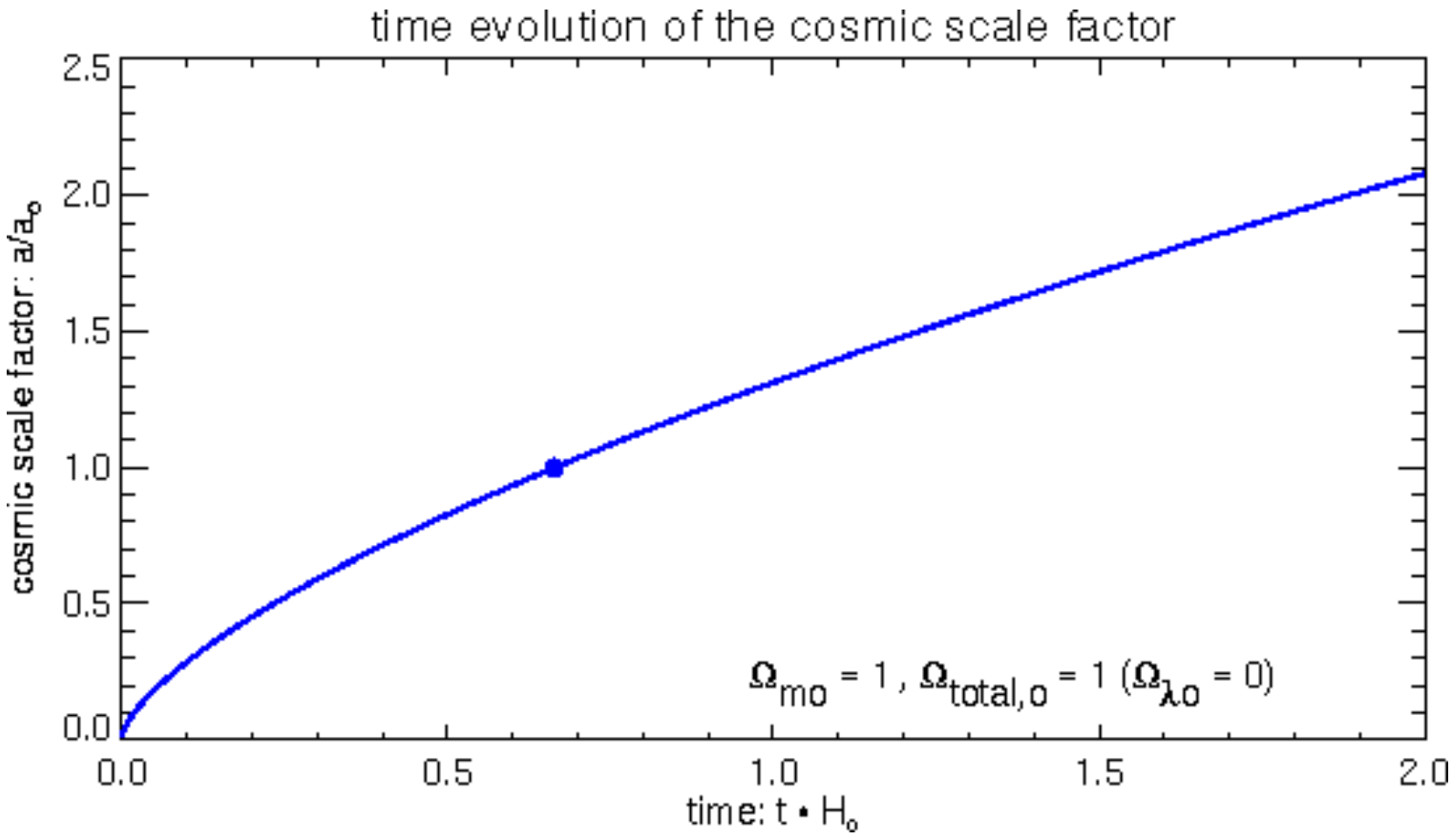
  $\rho_c = 2.3 \times 10^{-30}$ g/cm^3 (1.4 átomos de H por m^3)

  para $H_0 = 70$ km/s/Mpc
- Parâmetro de densidade: $\Omega = \rho / \rho_c$

  $\Omega < 1$ espaço hiperbólico

  $\Omega = 1$ espaço plano

  $\Omega > 1$ espaço esférico


time evolution of the cosmic scale factor
cosmic scale factor: a/a$_o$
time: t • H$_o$
Ω_{mo} = 1 , $\Omega_{total,o}$ = 1 ($\Omega_{\lambda o}$ = 0)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5

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

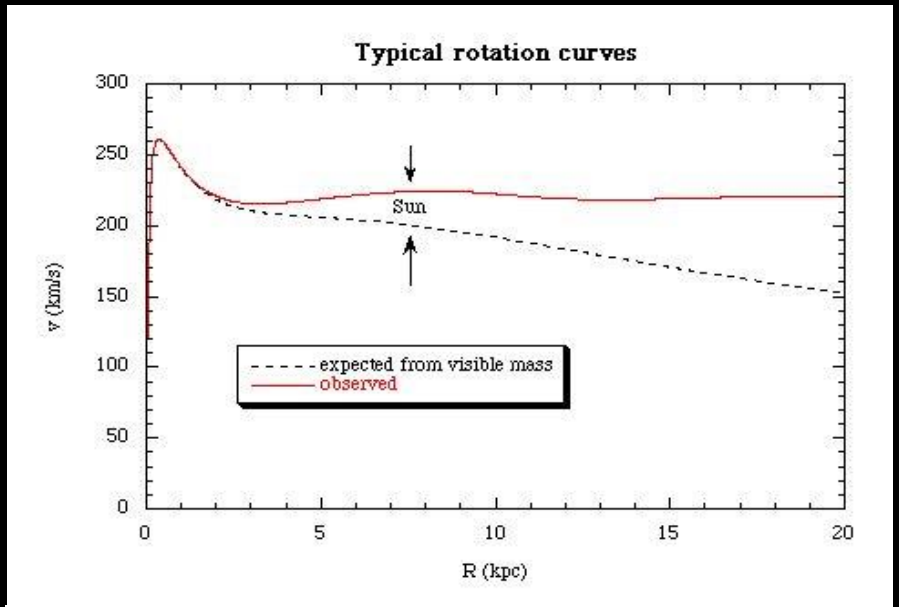
- Galáxias espirais:

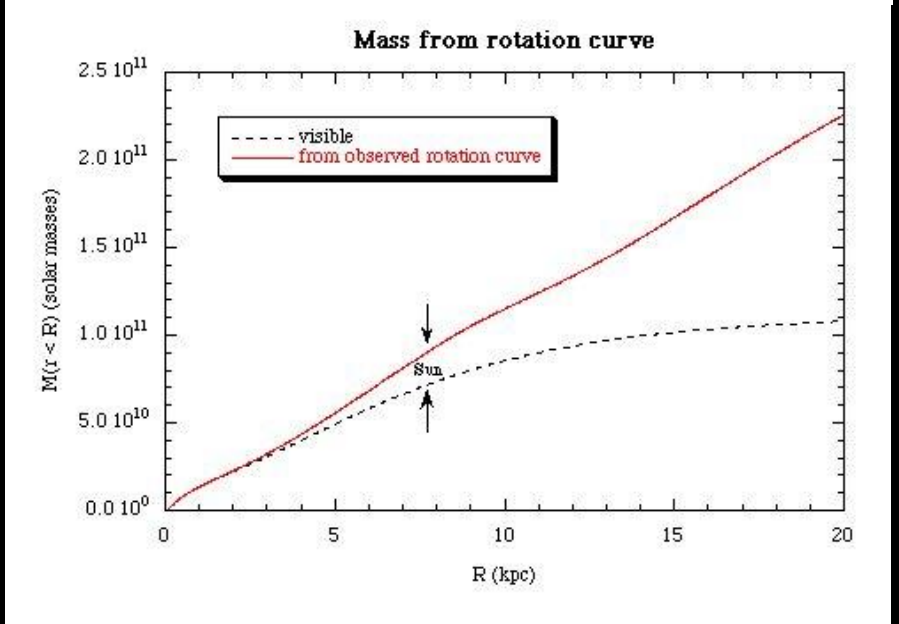
  Lei de Kepler:

  $GM/r^2=v^2/r$
- Ao se englobar a massa visível, a velocidade decresceria
- Mas a curva de rotação é plana!

  $\Rightarrow$ Halo Escuro
- Massa escura

  = 10 $\times$ massa luminosa





Aglomerados de Galáxias

- Primeira Evidência (Zwicky 1933)
- Teorema do Virial

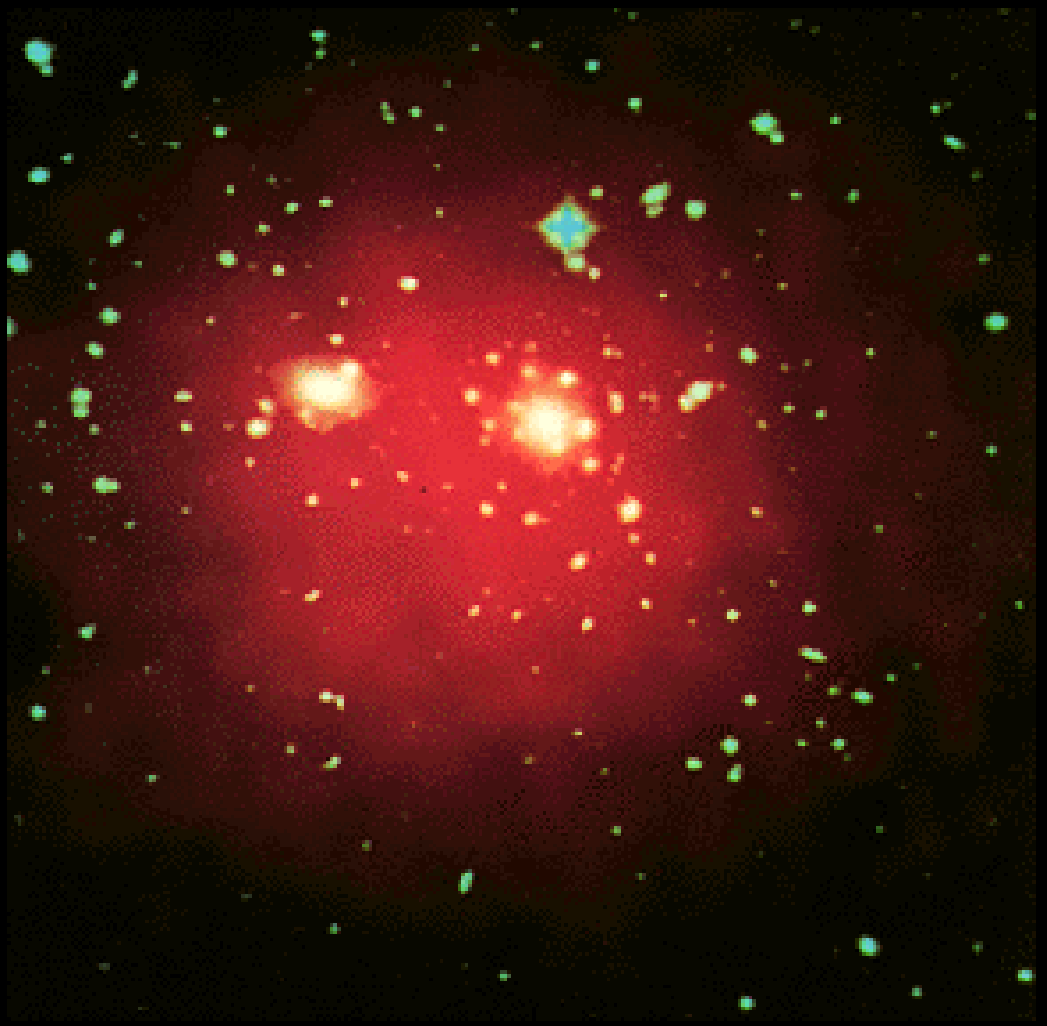
  $2KE+PE=0$

  onde

  $KE=1/2M\langle V^2\rangle$

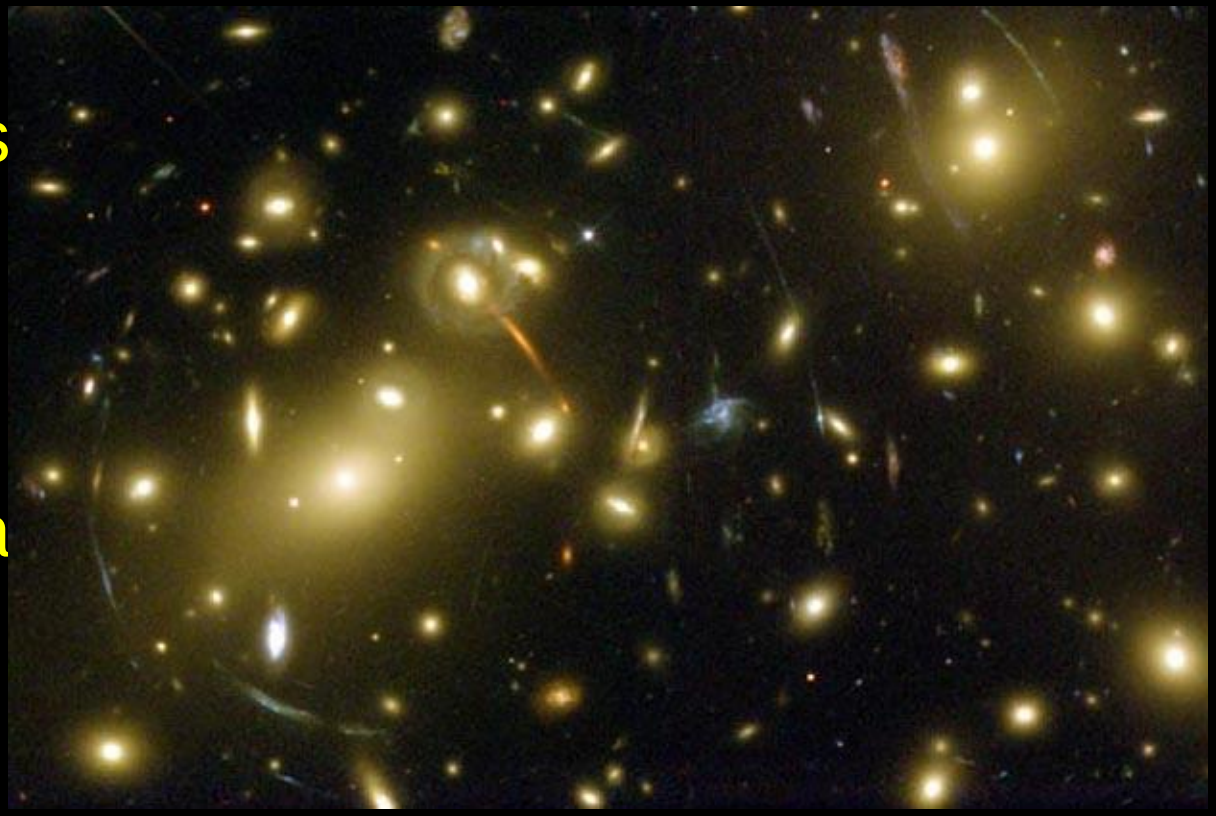
  $PE=GM\langle 1/R\rangle$
- Massa escura =

  60 × 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

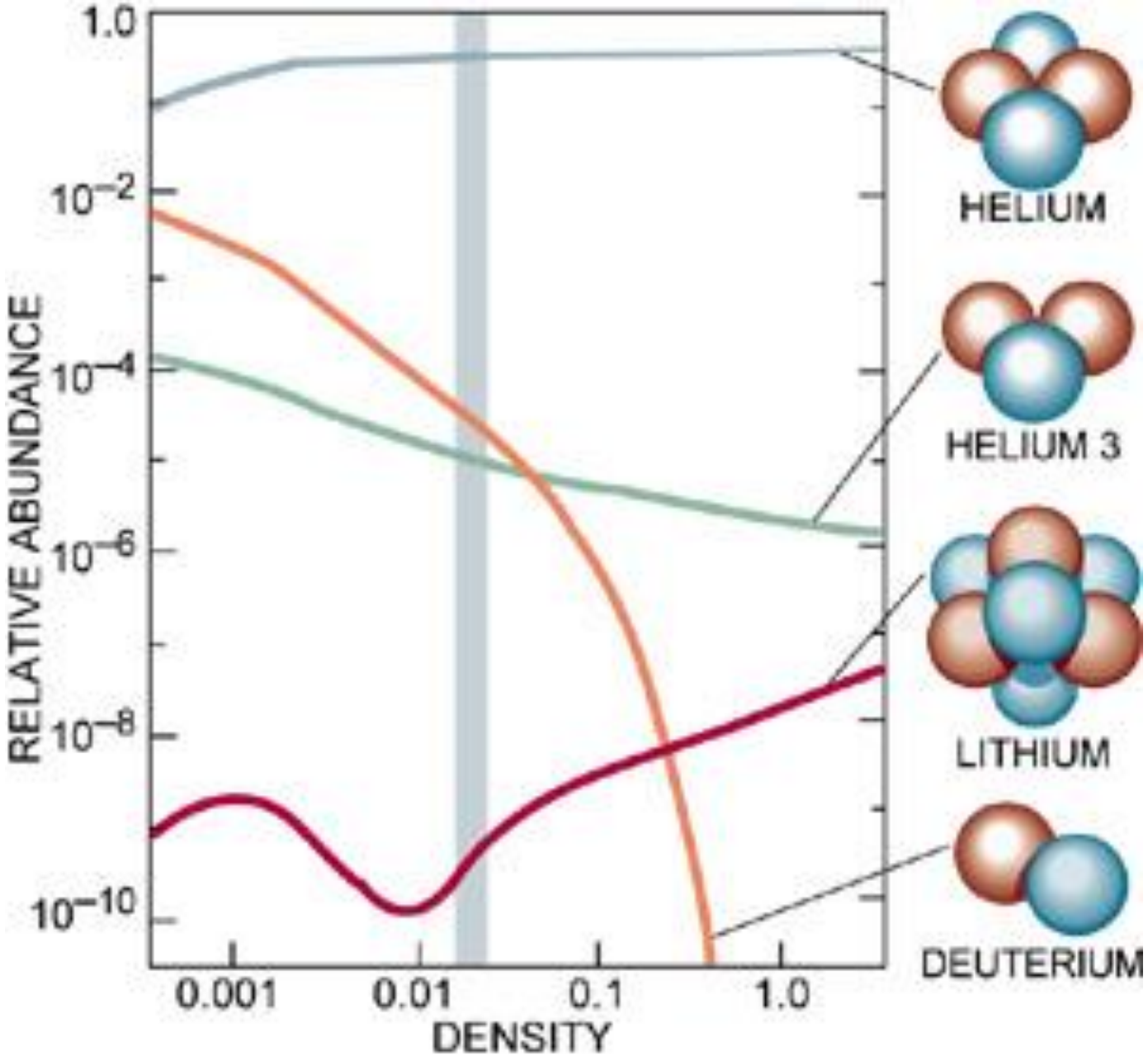
- Determinações globais:
  - Expansão do universo
  - Nucleo-síntese primordial
- Procedimentos:
  - Objetos individuais (espirais, aglomerados…)
  - Propriedades globais do Universo
  - Radiação de fundo cósmica
- Componentes de Ω

$$\Omega_{tot} = \Omega_{b} + \Omega_{dm} + \Omega_{\Lambda} = \Omega_{mat} + \Omega_{\Lambda}$$

- Inflação $\Rightarrow \Omega_{tot} = 1$

Pesando o Universo com a Nucleossíntese Primordial

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


1.0
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
RELATIVE ABUNDANCE
0.001
0.01
0.1
1.0
DENSITY
HELIUM
HELIUM 3
LITHIUM
DEUTERIUM

Qual a natureza da Matéria Escura?

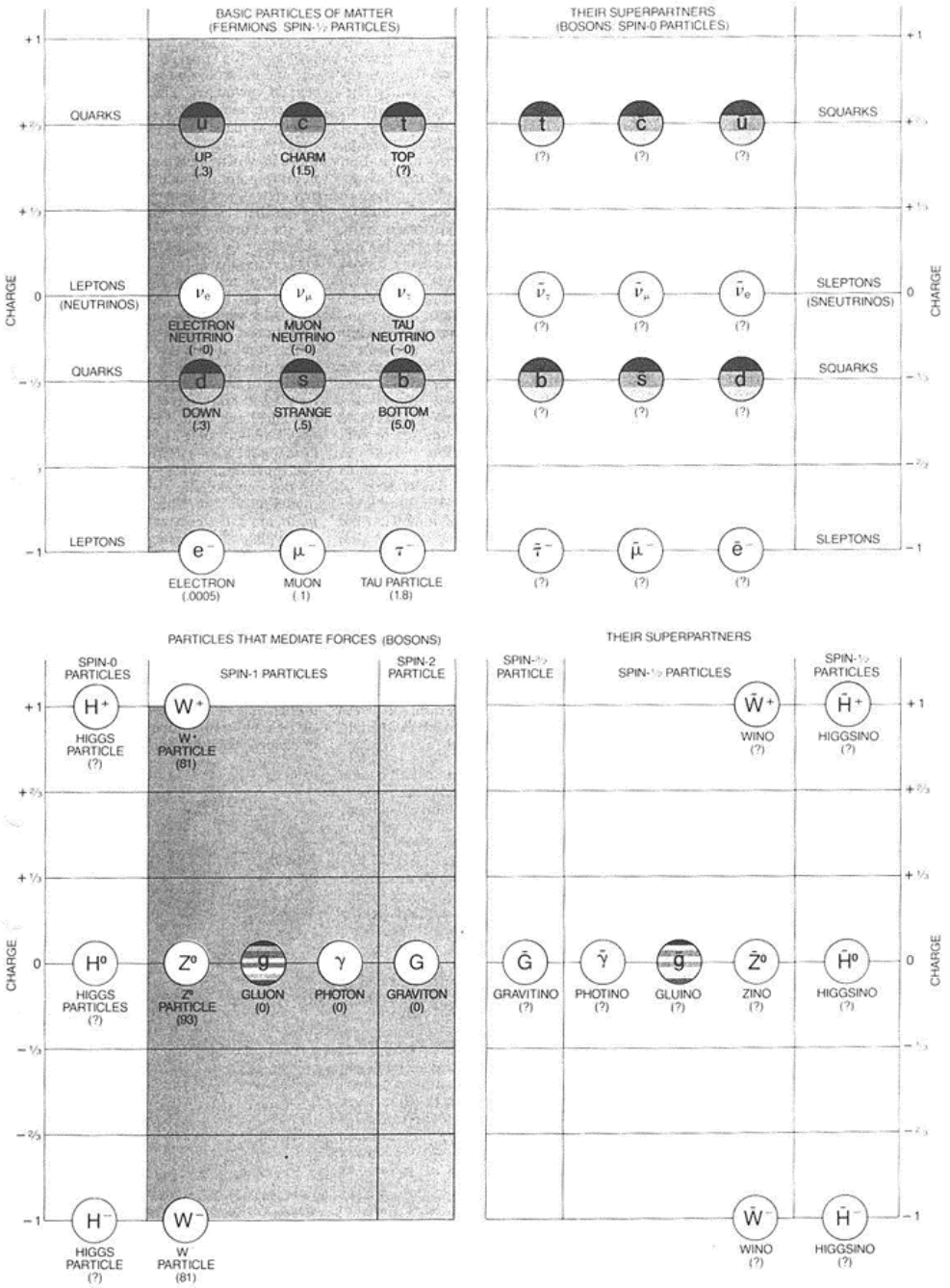
- A contribuição bariônica é diminuta
- Matéria escura fracamente interagente
  - Matéria escura quente (m < 100 eV)
  - Matéria escura fria (m > 1 GeV)
- Matéria escura quente: neutrinos

  não podem ser dominantes $\Rightarrow$ estruturas de grande escala
- Matéria escura fria: WIMPs

  (weakling interacting massive particles)

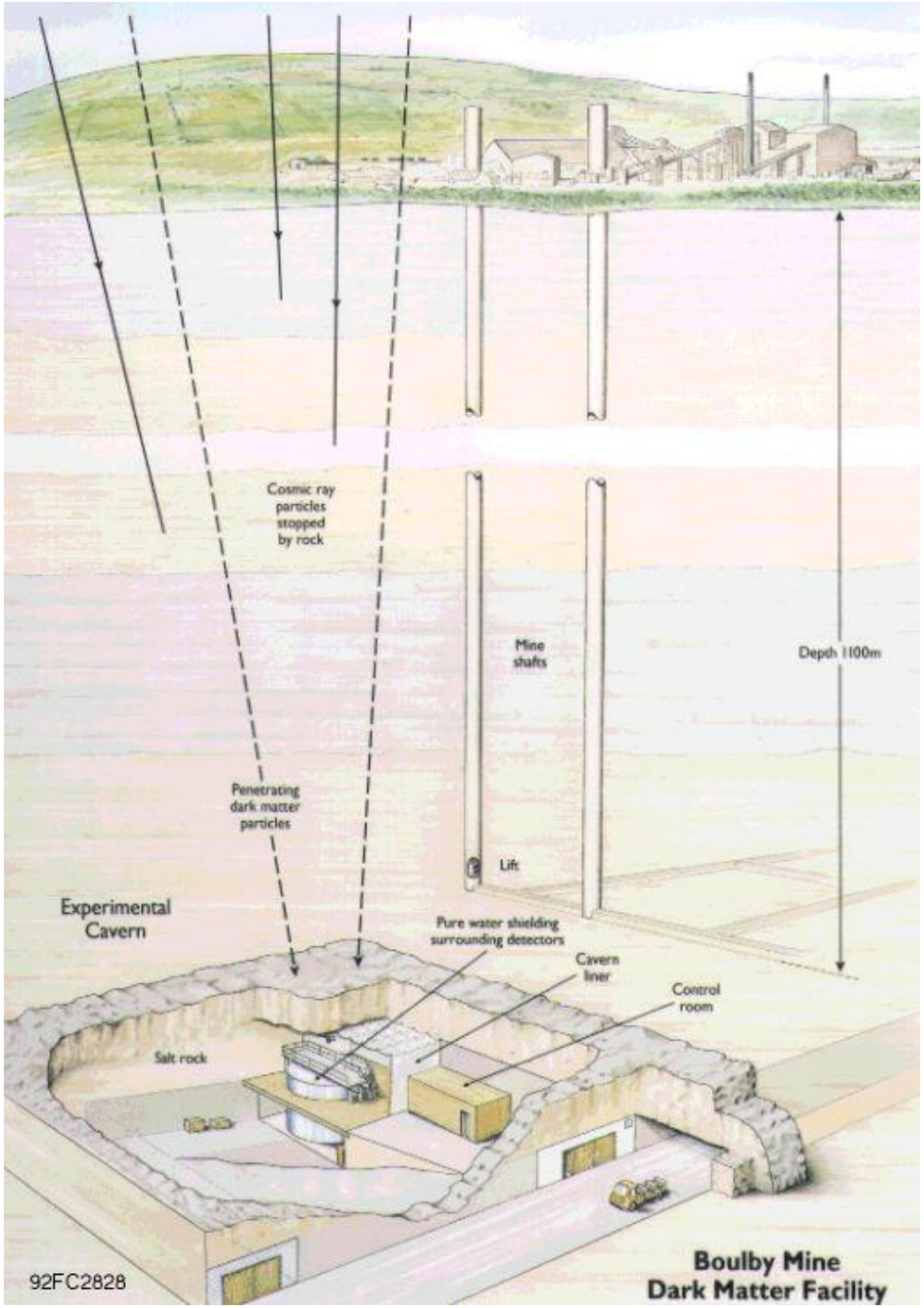
  candidatos de SUSY (supersymmetric theories)

Supersimetria (SUSY)

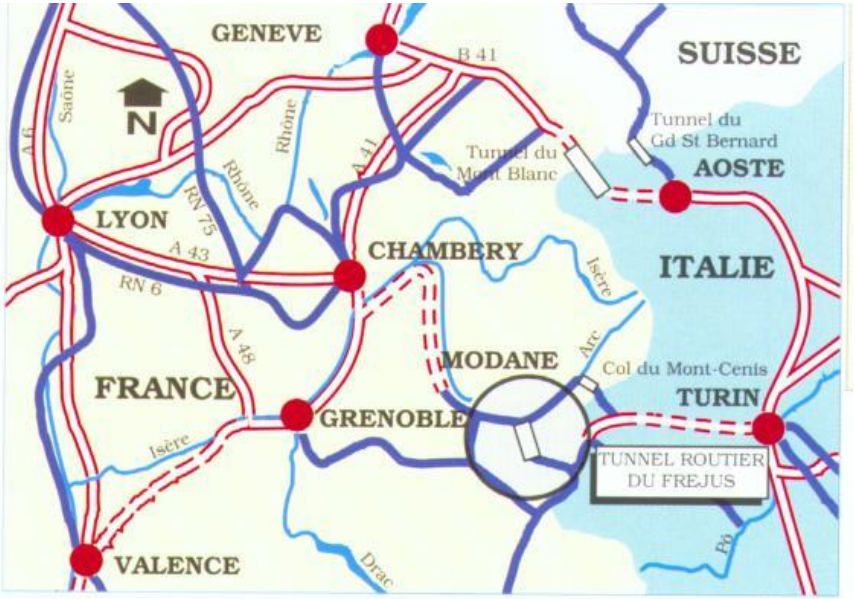


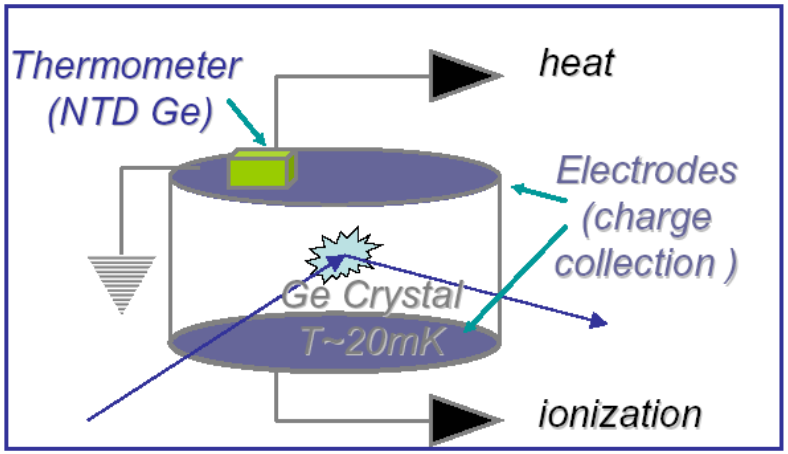
Astronomia Subterrânea: Detecção Direta dos WIMPs

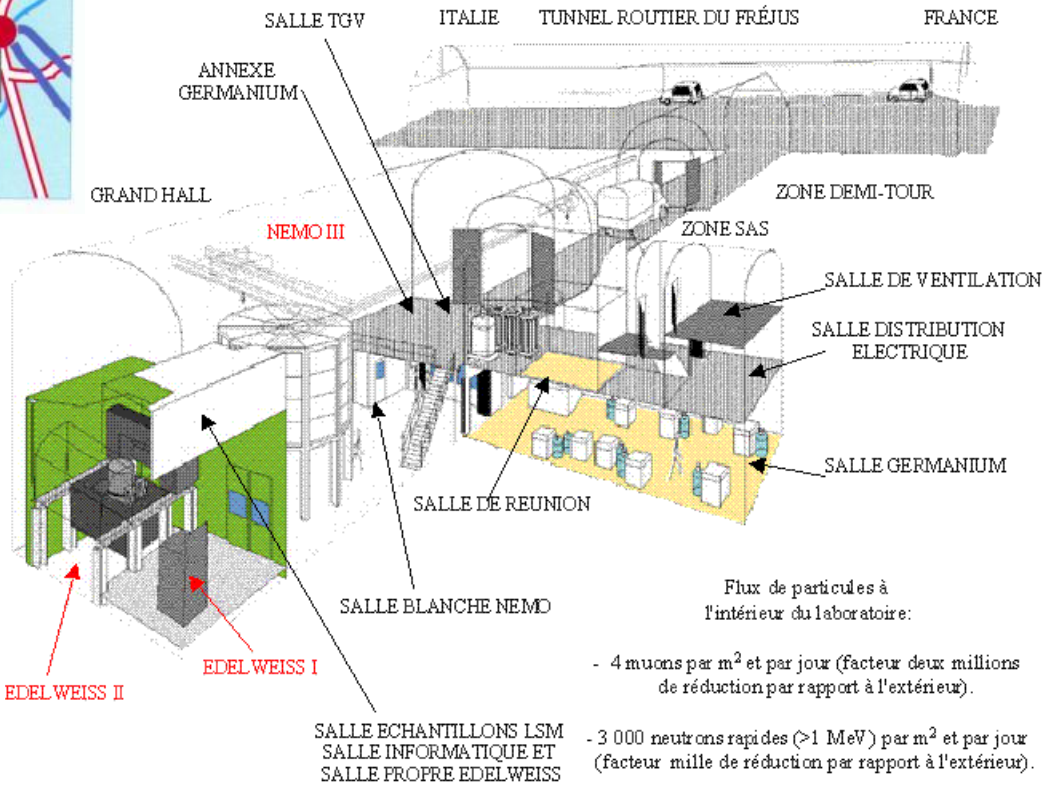
- IGEX (International GErmanium eXperiment)
- CMDS (Cryogenic Dark Matter Search)
- EDELWEISS (Expérience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain)
- CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometer)
- ROSEBUD (Rare Objects Search w. Bolometers UnDerground)
- DAMA (DArk MAtter)
- UKDMC (United Kingdon Dark Matter Collaboration)


Cosmic ray particles stopped by rock
Mine shafts
Depth 1100m
Penetrating dark matter particles
Lift
Experimental Cavern
Pure water shielding surrounding detectors
Cavern liner
Control room
Salt rock
92FC2828
Boulby Mine
Dark Matter Facility

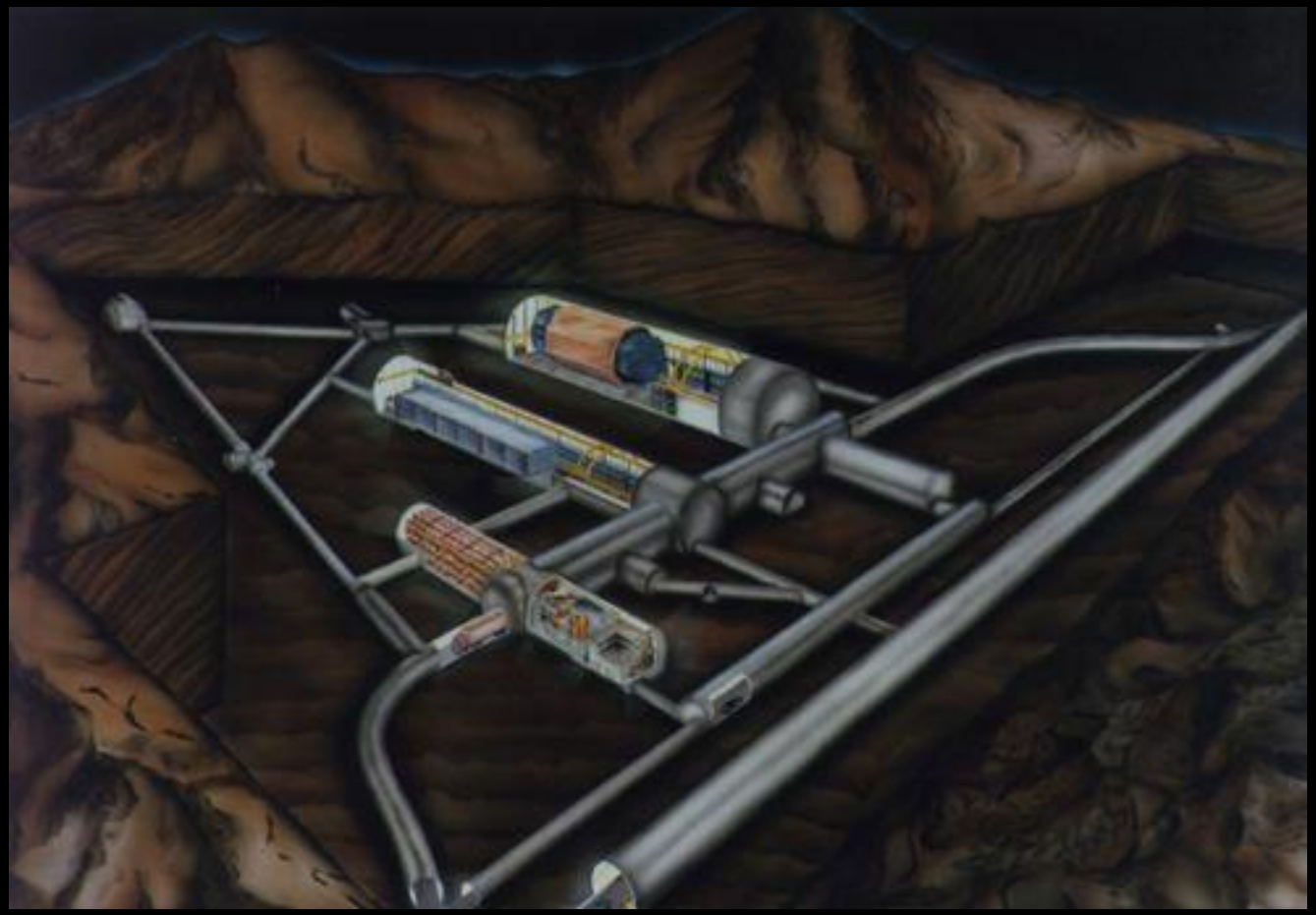
Mont Fréjus: EDELWEISS







DAMA (ITÁLIA)



arXiv:0804.2741v1 [astro-ph] 17 Apr 2008

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 ton$\times$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 ton$\times$yr), the presence of Dark Matter particles in the galactic halo is supported at 8.2 σ C.L..

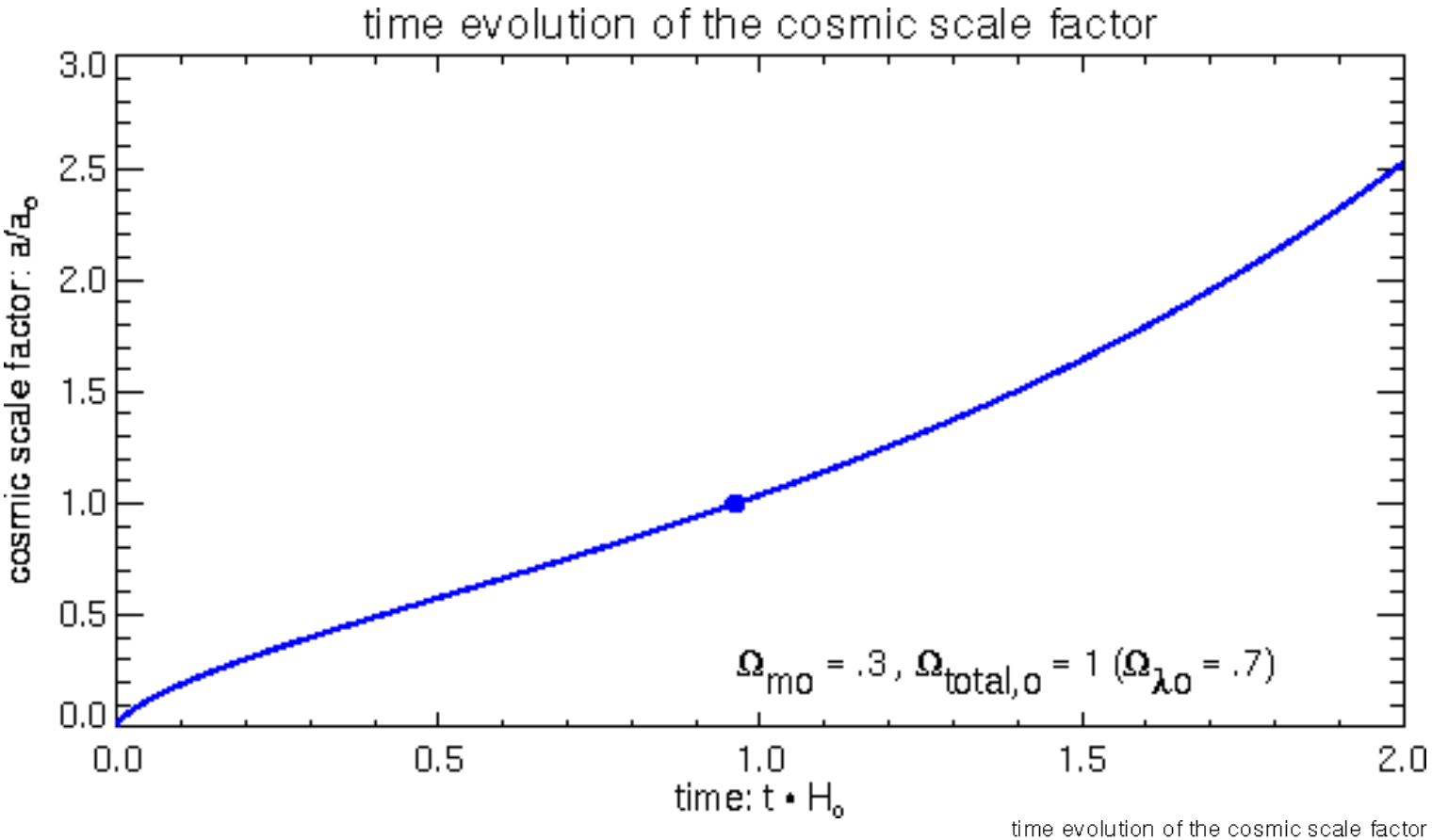
Do que é feito o Universo?
Continua faltando alguma coisa:
Energia Escura

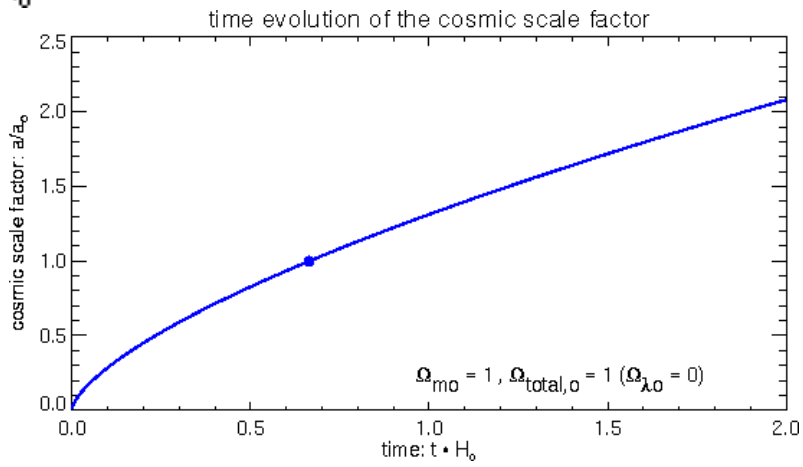
- Matéria
  - Bariônica (Estrelas, Gás, Raios cósmicos)
  - Radiação
  - Escura (quente, fria)

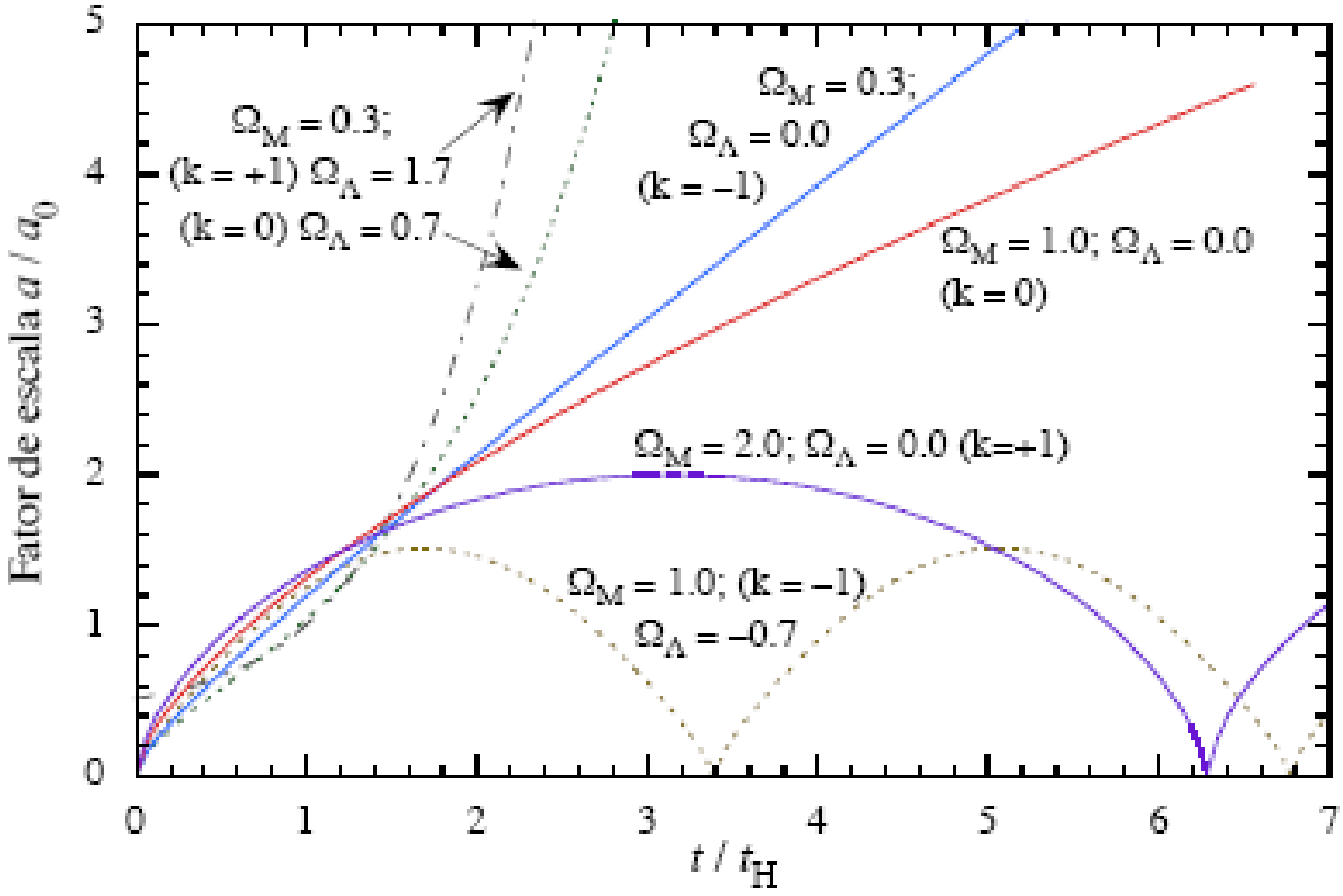
    Sempre Atrativa $\Omega_{\mathbf{mat}}$
- Evidências da energia escura:
  - Expansão do Universo (Supernovas Ia)
  - Lentes Gravitacionais
  - Radiação de Fundo Cósmica
  - Aglomerados de galáxias (Raios-X)

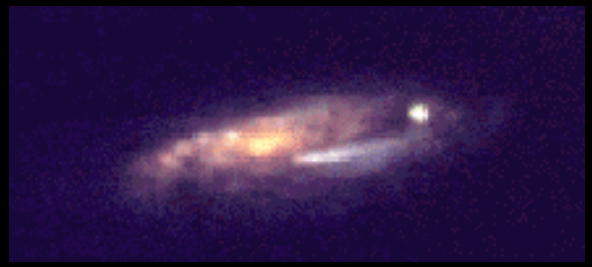
    Força repulsiva universal

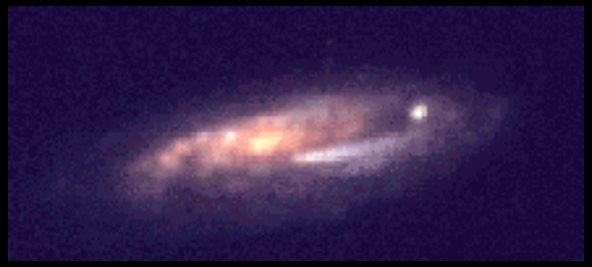
    Ω_Λ **Constante Cosmológica**

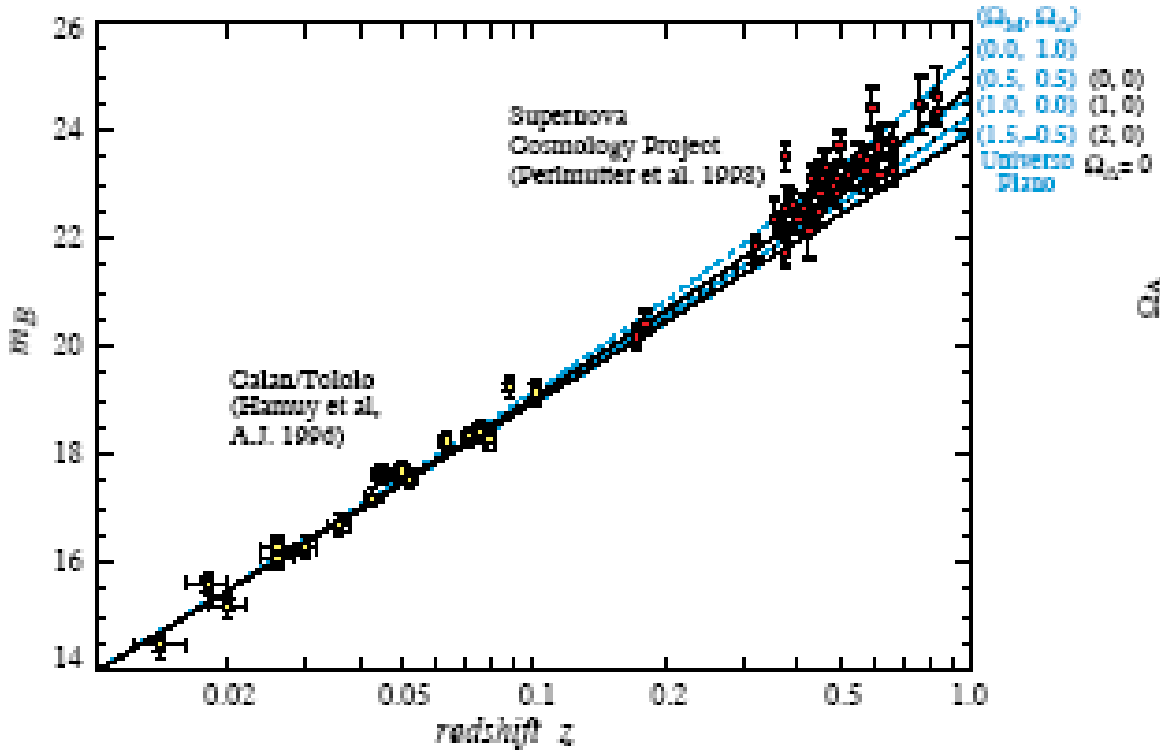

time evolution of the cosmic scale factor
cosmic scale factor: a/a$_o$
time: t • H$_o$
Ω_{mo} = .3 , $\Omega_{total,o}$ = 1 ($\Omega_{\lambda o}$ = .7)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0

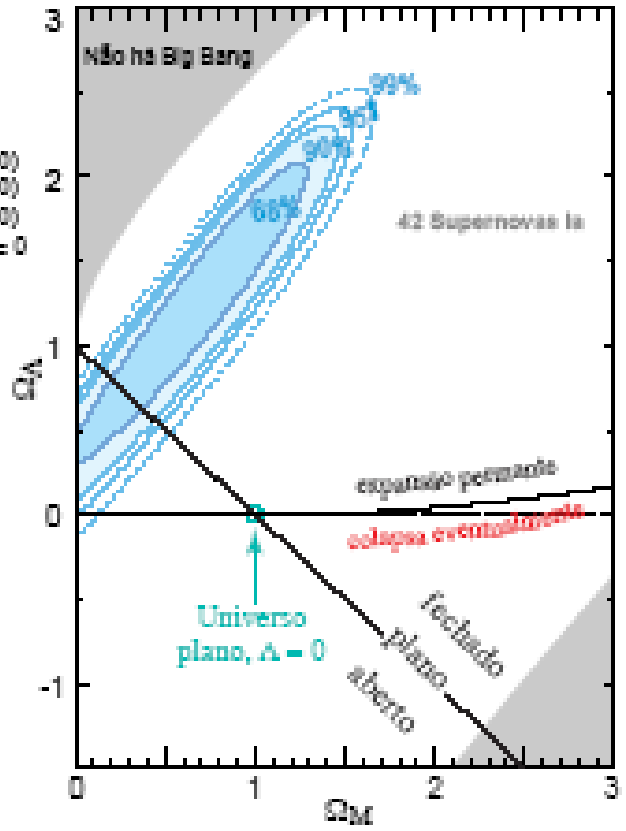

time evolution of the cosmic scale factor
cosmic scale factor: a/a$_o$
time: t • H$_o$
Ω_{mo} = 1 , $\Omega_{total,o}$ = 1 ($\Omega_{\lambda o}$ = 0)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5


Fator de escala a / a_0
t / t_H
$\Omega_M = 0.3$;
(k = +1) $\Omega_\Lambda = 1.7$
(k = 0) $\Omega_\Lambda = 0.7$
$\Omega_M = 0.3$;
$\Omega_\Lambda = 0.0$
(k = –1)
$\Omega_M = 1.0$; $\Omega_\Lambda = 0.0$
(k = 0)
$\Omega_M = 2.0$; $\Omega_\Lambda = 0.0$ (k=+1)
$\Omega_M = 1.0$; (k = –1)
$\Omega_\Lambda = -0.7$
0
1
2
3
4
5
6
7

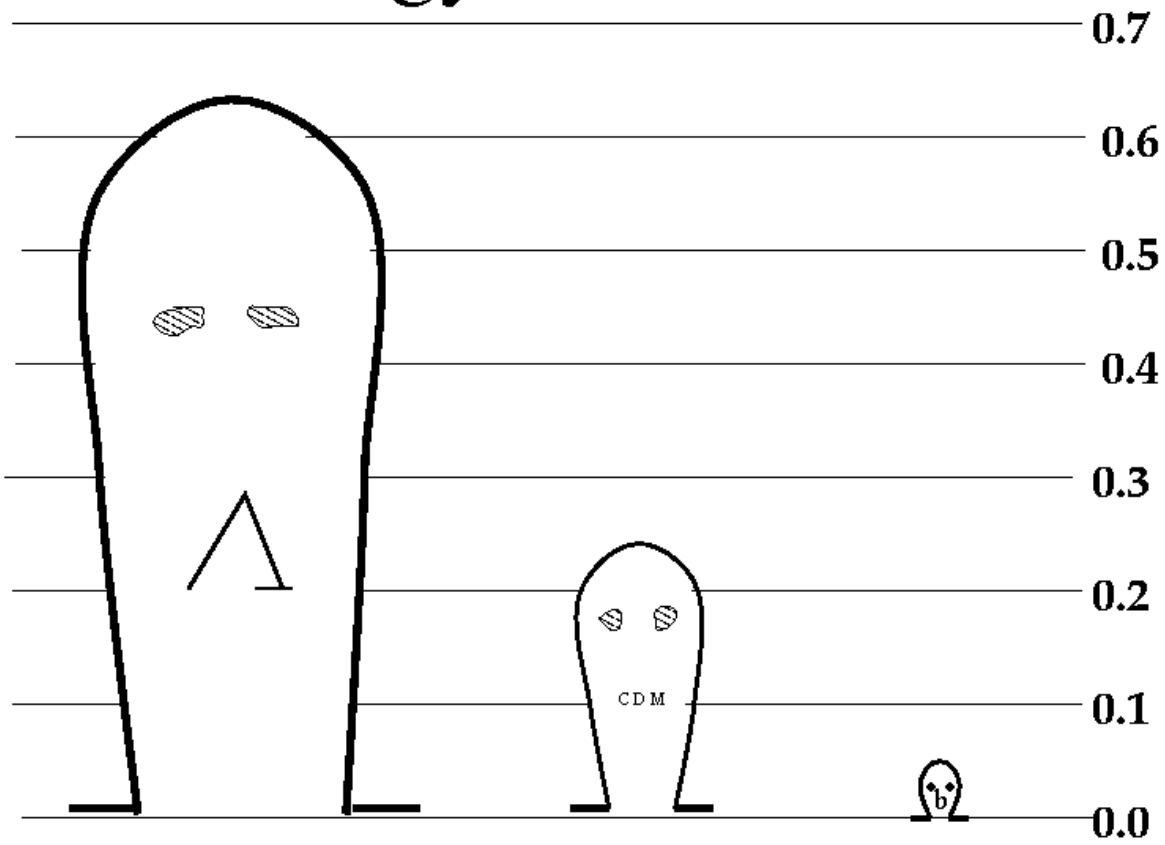





Supernova
Cosmology Project
(Perlmutter et al. 1998)
Calan/Tololo
(Hamuy et al,
A.J. 1996)
(ΩM, ΩΛ)
(0.0, 1.0)
(0.5, 0.5) (0, 0)
(1.0, 0.0) (1, 0)
(1.5,-0.5) (2, 0)
Universo Plano ΩM = 0
m_B
redshift z
26
24
22
20
18
16
14
0.02
0.05
0.1
0.2
0.5
1.0

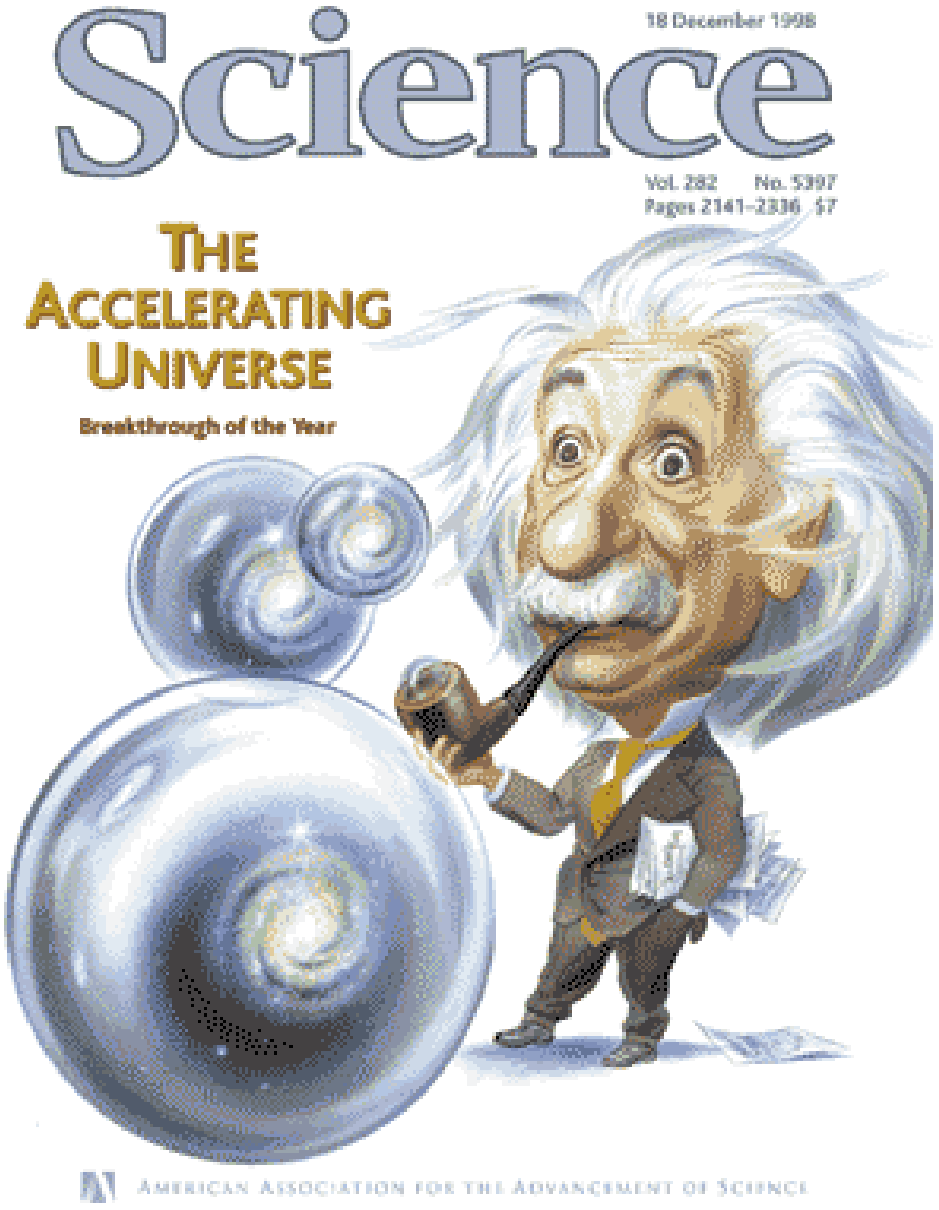

Não há Big Bang
99%
95%
90%
68%
42 Supernovas Ia
ΩΛ
ΩM
expansão permanente
colapso eventualmente
Universo
plano, Λ = 0
fechado
plano
aberto
3
2
1
0
-1
0
1
2
3

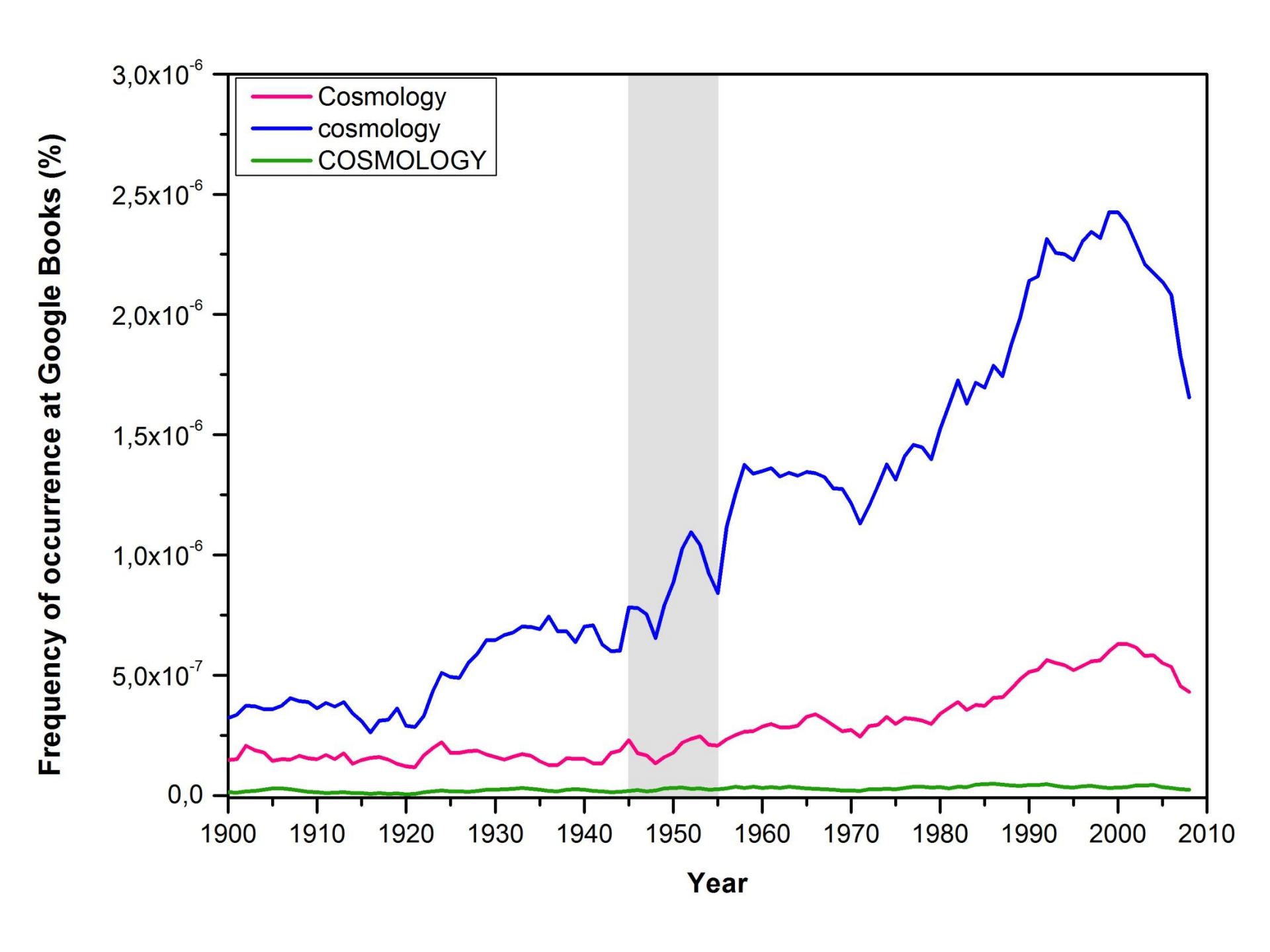
Cosmology's Most Wanted

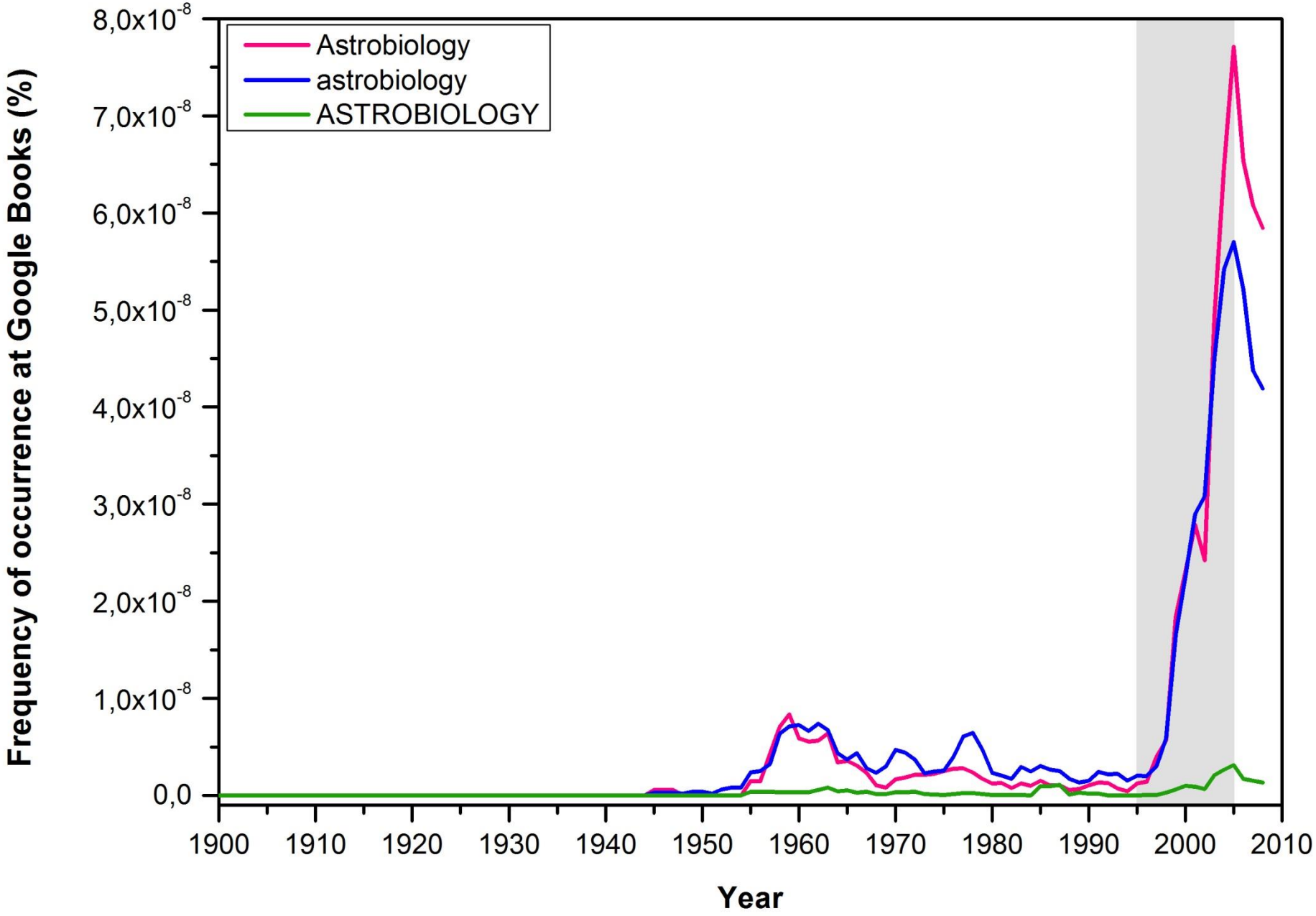


Ω_Λ	Ω_{CDM}	Ω_b
cosmological constant energy of the vacuum He never clumps His evil plan is to blow up the Universe	cold dark matter He likes to clump but has never been detected directly His evil plan is to make the Universe collapse	normal baryonic matter a pawn in the cosmic game who just follows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

Surprise, Surprise! 1998




Cosmology
cosmology
COSMOLOGY
Frequency of occurrence at Google Books (%)
3,0x10-6
2,5x10-6
2,0x10-6
1,5x10-6
1,0x10-6
5,0x10-7
0,0
1900
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
Year


Astrobiology
astrobiology
ASTROBIOLOGY
Frequency of occurrence at Google Books (%)
8,0x10-8
7,0x10-8
6,0x10-8
5,0x10-8
4,0x10-8
3,0x10-8
2,0x10-8
1,0x10-8
0,0
1900
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
Year