

A expansão do Universo

Roberto Ortiz
EACH/USP

O problema da distância

- O único método para se calcular a distância que é 100% confiável é a paralaxe trigonométrica.
- Problema: como $d = 1/p$, quanto mais distante estiver o objeto, menor (e mais difícil) medir sua paralaxe.
- Na prática, a paralaxe funciona apenas dentro de poucos quiloparsecs.
- Existem outros métodos para se calcular a distância que são calibrados a partir do método de paralaxe.
- O mais comum é utilizar um “padrão de distância”

Os “padrões de distância”

- Também chamados de “*standard candles*”, são objetos que possuem sempre o mesmo brilho intrínseco, não importando o lugar que estejam no universo.
- Portanto o brilho aparente dos padrões de distância depende somente da distância.
- Se eles tiverem ter brilho suficiente para serem detectados a grandes distâncias podem ser utilizados para se determinar a distância de outras galáxias.
- **Padrões de distância** mais comuns:
 - Em galáxias próximas: estrelas O, B; estrelas do ramo horizontal; estrelas tipo *cefeida*; estrelas tipo *nova*.
 - Em galáxias mais distantes: *supernovas*.

Exemplo:

Distância de uma galáxia distante

- Em 1987 uma supernova apareceu na Grande Nuvem de Magalhães, cuja distância é de 50 kpc . Ela foi visível a olho nu como uma estrela de magnitude aparente visual $m_v=3,5$.
- No ano seguinte, uma outra supernova apareceu em uma galáxia distante. Sua magnitude aparente visual, medida com um fotômetro, foi de $m_v=+13,5$. Vamos calcular a distância dessa galáxia.



Acima: Grande Nuvem de Magalhães



Acima: galáxias distantes, distância desconhecida.

- Solução:

- Já estudamos que o brilho de um objeto diminui com o quadrado da distância.

- Utilizamos a definição de magnitude:

$$m_v = - 2,5 \log F_*/F_0$$

$$+3,5 = - 2,5 \log F_{\text{GNM}}/F_0$$

$$+13,5 = - 2,5 \log F_*/F_0$$

- Subtraímos as 2 equações acima:

$$10,0 = - 2,5 \log F_*/F_0 - [-2,5 \log F_{\text{GNM}}/F_0]$$

$$10,0 = - 2,5 \log F_* + 2,5 \log F_{\text{GNM}}$$

$$10,0 = - 2,5 \log (F_*/F_{\text{GNM}})$$

- Lembramos também que o fluxo luminoso cai com o quadrado da distância, i.e.:

$$F_*/F_{\text{GNM}} = (d_*/d_{\text{GNM}})^{-2}$$

- Substituimos na relação no alto da página:

$$10,0 = - 2,5 \log (d_*/d_{\text{GNM}})^{-2}$$

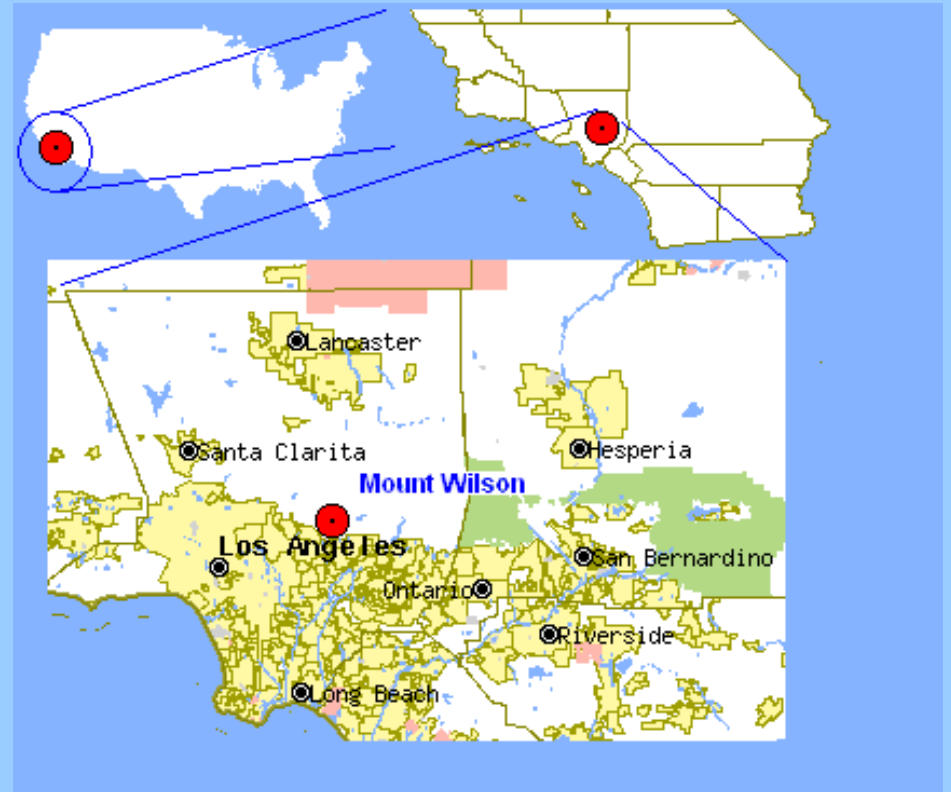
$$10,0 = +5 \log (d_*/d_{\text{GNM}})$$

$$\log(d_*/d_{\text{GNM}}) = +2,0$$

$$d_* = 100 * d_{\text{GNM}} = 100 * 50 \text{ kpc} = 5 \text{ Mpc}$$

A Lei de Hubble

- Em 1904, a Carnegie Institution (Washington) inaugurou o observatório de *Mount Wilson*, a noroeste de Los Angeles.
- Em 1917 foi inaugurado seu maior telescópio, de 2,5 m de diâmetro, o maior do mundo na época.
- Com este telescópio, E. Hubble obteve espectro de galáxias que ele acreditava estarem distantes.



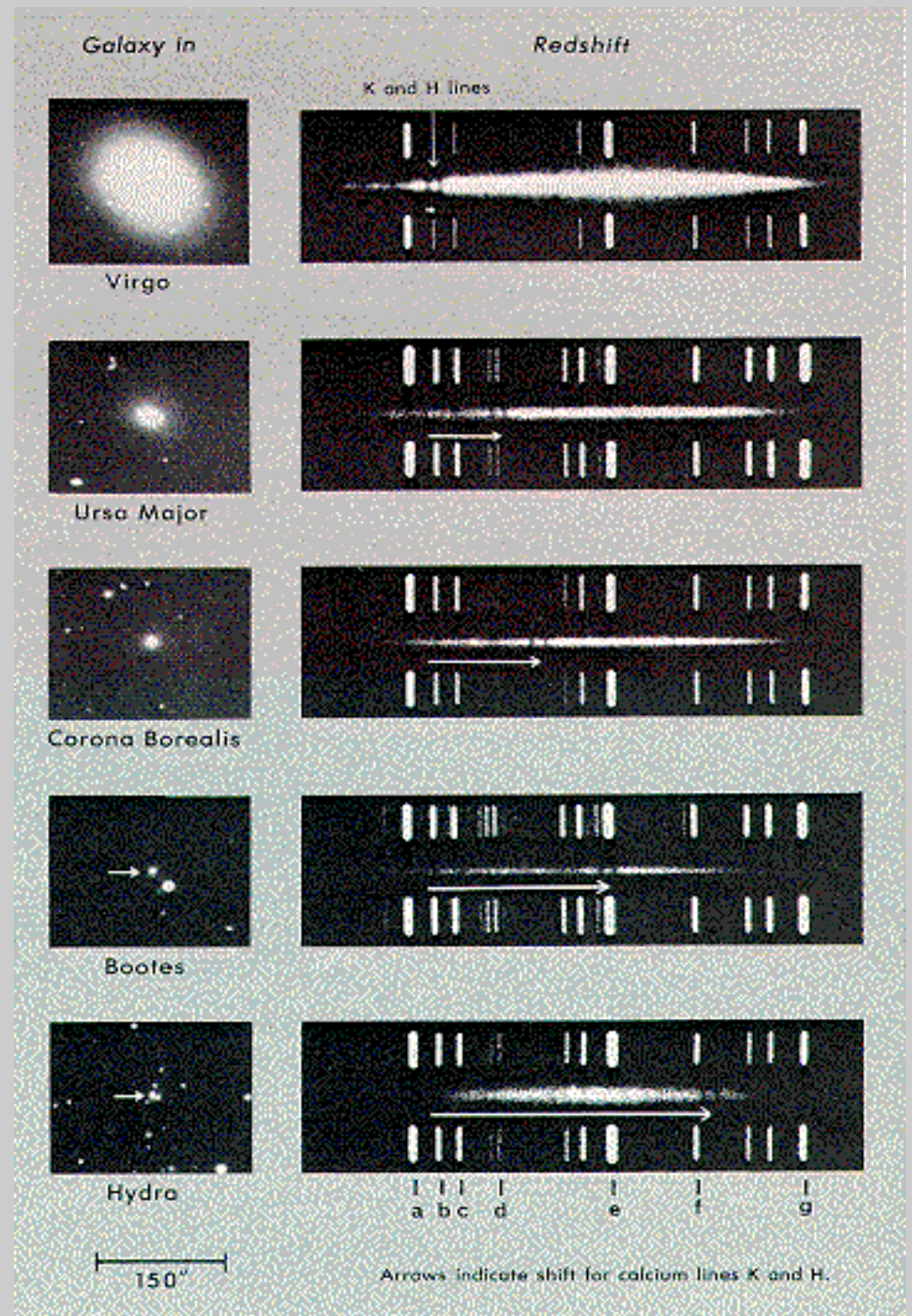
Transporte do espelho de 2.5 m - 1917



O telescópio “Hooker”
De 2,5 m de diâmetro



- Com o novo telescópio, *Edwin Hubble* obteve espectros de galáxias situadas a diversas distâncias.
- Quando ele não podia determinar a distância de uma galáxia com precisão, ele considerou uma magnitude absoluta média.
- Em seguida, com os dados obtidos por Vesto Slipher, observou que as linhas espectrais dessas galáxias eram todas desviadas para o vermelho (*redshift*).



- O desvio para o vermelho das galáxias é um fenômeno físico que ocorre quando a fonte de radiação se afasta do observador.
- O *Efeito Doppler* observado por *Slipher* e *Hubble* indicava que todas as galáxias estavam se afastando.
- O afastamento das galáxias foi interpretado como sendo devido à expansão do Universo.
- As velocidades de afastamento das galáxias (v) podem ser calculadas através da expressão abaixo, já conhecida:

Se $v \ll c$:

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

Exemplo:

- Qual é a velocidade de afastamento de uma galáxia cuja linha *K* do Call é vista em $\lambda = 3940$ Angstroms?
- Solução:
 - sabe-se que, em laboratório, o comprimento de onda dessa linha é $\lambda = 3933$ A.
 - Utilizamos a expressão:

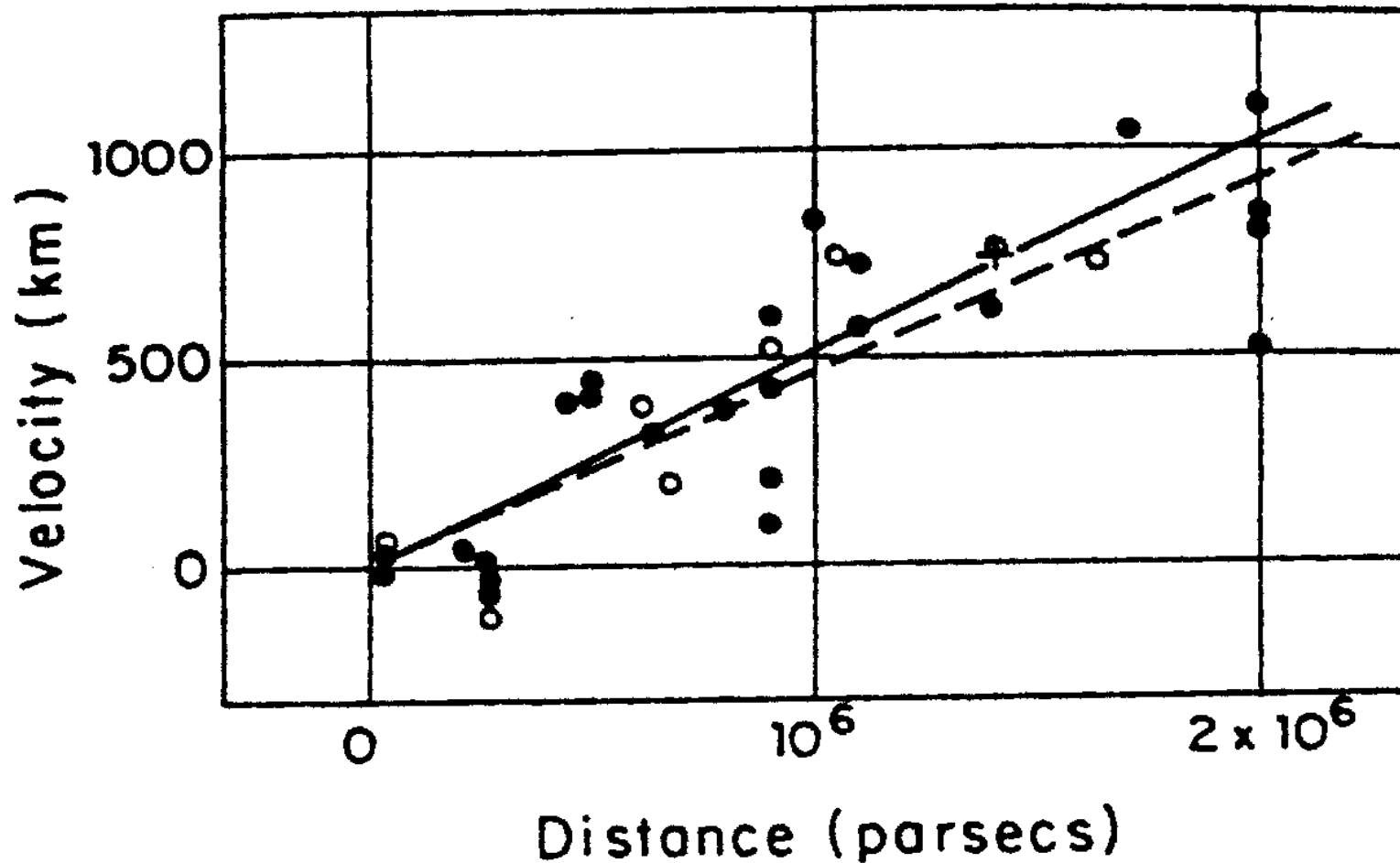
$$\Delta\lambda/\lambda = (3940 - 3933)/3933 = 0,00177$$

$$0,00177 = v / c$$

$$v = 0,00177 \times 300\,000 \text{ km/s}$$

$$v = 534 \text{ km/s}$$

- Comparando as velocidades de afastamento (v) com as distâncias calculadas (D), Hubble observou que existia uma relação linear entre a velocidade radial e a distância da galáxia:



A Lei de Hubble

- A lei de Hubble estabelece uma proporcionalidade entre a velocidade de afastamento de uma galáxia e sua distância.
- Galáxias mais distantes afastam-se mais rapidamente.
- A constante H , chamada *constante de Hubble*, tem sido determinada utilizando-se uma enorme variedade de técnicas. Seu valor atualmente aceito é de $71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

$$v = H D$$

- A constante de Hubble está relacionada com a idade do Universo.
- Suponhamos que o Universo tenha-se expandido com a mesma taxa relativa, desde o seu início. Considere D a distância entre nós e uma galáxia qualquer. Então temos que:

$$D = v \cdot t_H$$

- Onde t_H é o “tempo de Hubble”. D pode ser obtido a partir da lei de Hubble: $D = H^{-1} \cdot v$
- Substituimos:

$$H^{-1} \cdot v = v \cdot t_H$$

$$t_H = H^{-1}$$

$$t_H = 1/H$$

$$t_H = (71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})^{-1}$$

$$t_H = (71 \cdot 10^5 \text{ cm s}^{-1} (10^6 \times 3,08 \times 10^{18})^{-1} \text{ cm}^{-1})^{-1}$$

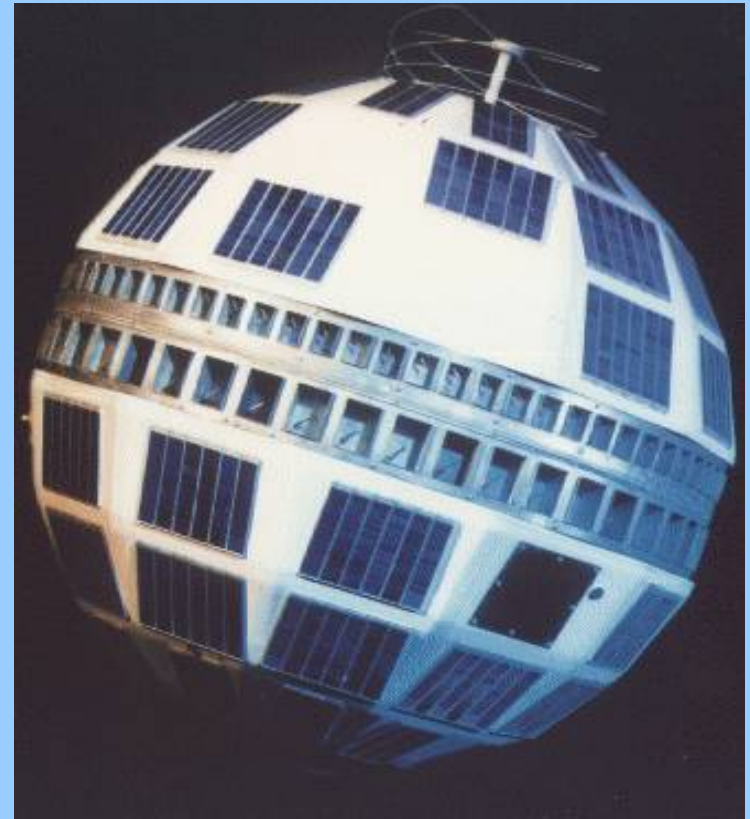
$$T_H = 4,3 \times 10^{17} \text{ s}$$

OU...

$$T_H = 13,7 \times 10^9 \text{ anos}$$

A descoberta da radiação cósmica de fundo

- A idéia de que o desvio para o vermelho das galáxias é causado pela expansão do Universo ganhou força na década de 1960.
- Em 1965, Arno Penzias e Robert Wilson eram dois engenheiros que trabalhavam para o Bell Laboratories (atualmente *American Telephone and Telegraph, AT&T*). A função deles era descobrir a origem da interferência que afetava as telecomunicações com o satélite de comunicações *Telstar*.



Acima: satélite *Telstar* (1962)

- Eles detectaram uma emissão persistente que interferia em transmissões de rádio na frequência de 4,080 MHz. A “interferência” parecia vir de todas as direções do céu.
- Antes disso, entre 1946 – 1948 o astrofísico russo-americano George Gamow trabalhava na teoria do *Big Bang*, inicialmente proposta pelo cosmólogo belga George Lemaitre.
- Segundo Gamow, após o *Big Bang* o Universo teria resfriado e teria atualmente entre 5 e 7 K de temperatura.
- A emissão rádio detectada por Penzias & Wilson provinha de todas as direções e tinha uma temperatura característica de cerca de 3 K.

- Em 1965, Penzias & Wilson publicaram os resultados de suas observações num artigo científico no *Astrophysical Journal* (Penzias & Wilson, 1965, *ApJ*, 142, 419).
- No mesmo número do *ApJ* (Dicke et al., 1965, *ApJ*, 142, 414), os físicos Dicke, Peebles, Wilkinson & Roll publicaram um artigo no qual interpretavam a emissão de 2,7 K como sendo um remanescente do Big-Bang.

COSMIC BLACK-BODY RADIATION*

One of the basic problems of cosmology is the singularity characteristic of the familiar cosmological solutions of Einstein's field equations. Also puzzling is the presence of matter in excess over antimatter in the universe, for baryons and leptons are thought to be conserved. Thus, in the framework of conventional theory we cannot understand the origin of matter or of the universe. We can distinguish three main attempts to deal with these problems.

1. The assumption of continuous creation (Bondi and Gold 1948; Hoyle 1948), which avoids the singularity by postulating a universe expanding for all time and a continuous but slow creation of new matter in the universe.

2. The assumption (Wheeler 1964) that the creation of new matter is intimately related to the existence of the singularity, and that the resolution of both paradoxes may be found in a proper quantum mechanical treatment of Einstein's field equations.

3. The assumption that the singularity results from a mathematical over-idealization,

* This research was supported in part by the National Science Foundation and the Office of Naval Research of the U.S. Navy.

$< 10^{-9}^{\circ}$ K. The contribution to the background due to the atmosphere is expected to be approximately 3.5° K, and this can be accurately measured by tipping the antenna (Dicke, Berlinger, Kyhl, and Vane 1946).

While we have not yet obtained results with our instrument, we recently learned that Penzias and Wilson (1965) of the Bell Telephone Laboratories have observed background radiation at 7.3-cm wavelength. In attempting to eliminate (or account for) every contribution to the noise seen at the output of their receiver, they ended with a residual of $3.5^{\circ} \pm 1^{\circ}$ K. Apparently this could only be due to radiation of unknown origin entering the antenna.

It is evident that more measurements are needed to determine a spectrum, and we expect to continue our work at 3 cm. We also expect to go to a wavelength of 1 cm. We understand that measurements at wavelengths greater than 7 cm may be filled in by Penzias and Wilson.

A temperature in excess of 10^{10}° K during the highly contracted phase of the universe is strongly implied by a present temperature of 3.5° K for black-body radiation. There are two reasonable cases to consider. Assuming a singularity-free oscillating cosmology, we believe that the temperature must have been high enough to decompose the heavy elements from the previous cycle, for there is no observational evidence for significant

$< 10^{-9}^{\circ} \text{K}$. The contribution to the background due to the atmosphere is expected to be approximately 3.5°K , and this can be accurately measured by tipping the antenna (Dicke, Beringer, Kyhl, and Vane 1946).

While we have not yet obtained results with our instrument, we recently learned that Penzias and Wilson (1965) of the Bell Telephone Laboratories have observed background radiation at 7.3-cm wavelength. In attempting to eliminate (or account for) every contribution to the noise seen at the output of their receiver, they ended with a residual of $3.5^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{K}$. Apparently this could only be due to radiation of unknown origin entering the antenna.

It is evident that more measurements are needed to determine a spectrum, and we expect to continue our work at 3 cm. We also expect to go to a wavelength of 1 cm. We understand that measurements at wavelengths greater than 7 cm may be filled in by Penzias and Wilson.

A temperature in excess of 10^{40}°K during the highly contracted phase of the universe is strongly implied by a present temperature of 3.5°K for black-body radiation. There are two reasonable cases to consider. Assuming a singularity-free oscillating cosmology, we believe that the temperature must have been high enough to decompose the heavy elements from the previous cycle, for there is no observational evidence for significant

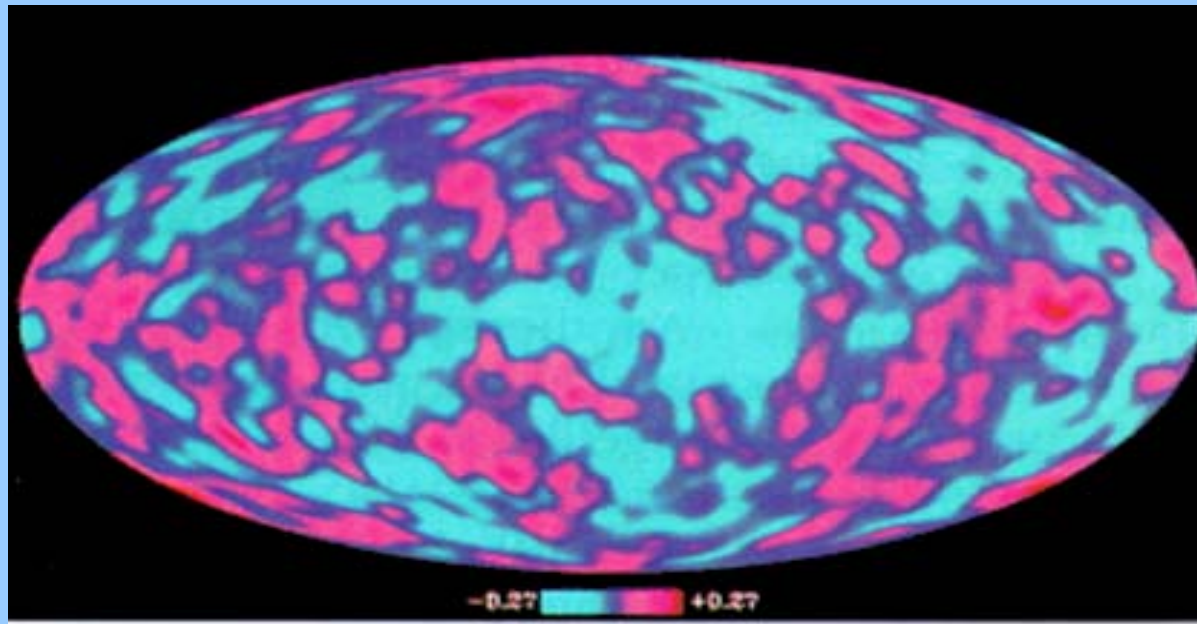


Arno Penzias e Robert Wilson, defronte ao radiotelescópio com o qual detectaram a radiação cósmica de fundo.

Eles ganharam o prêmio Nobel de Física em 1978 por essa descoberta.

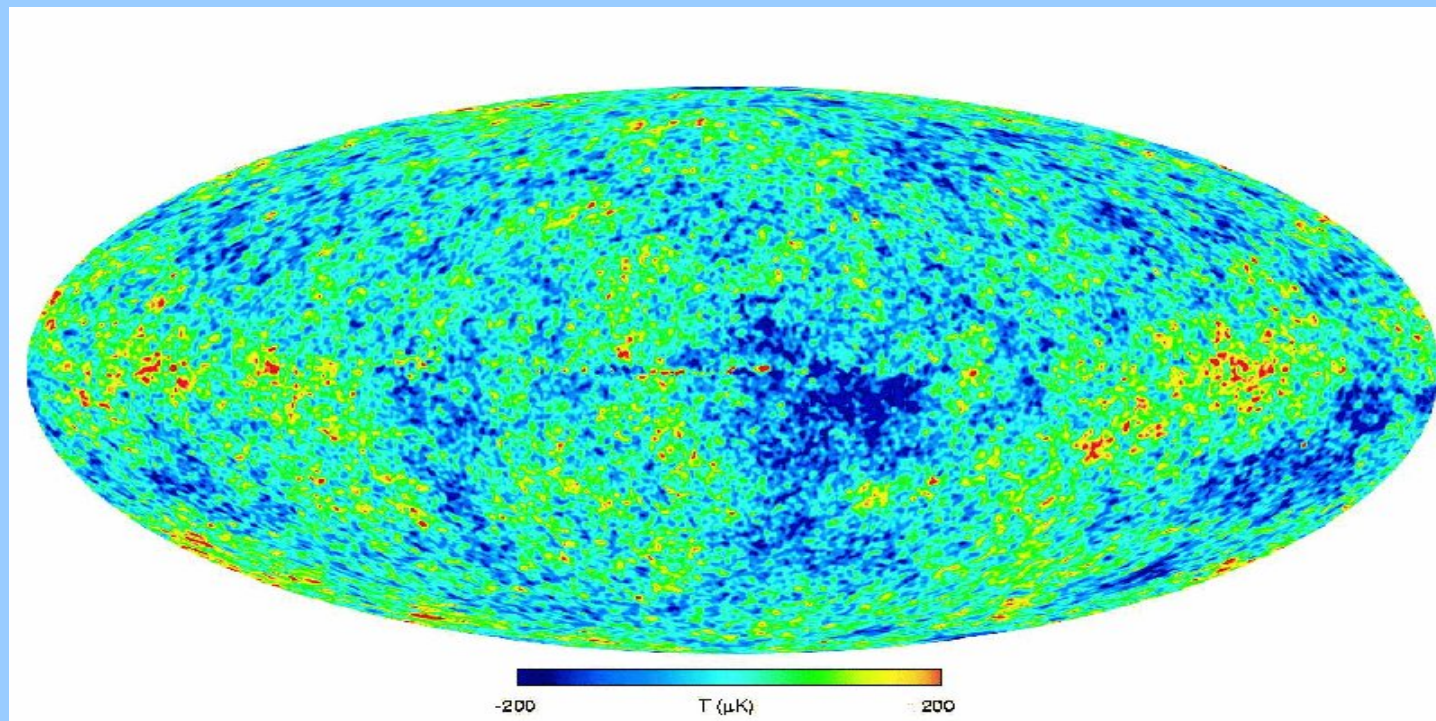
A anisotropia da radiação cósmica de fundo

- São flutuações de temperatura no Universo jovem, causada por “bolhas de densidade” de matéria. Algumas regiões são um pouco mais quentes devido a um pequeno excesso de densidade, comparado às regiões vizinhas.
- Essas regiões mais quentes e densas (em vermelho na figura abaixo) foram o embrião das primeiras protogaláxias.



Acima: emissão térmica do Universo observada pelo satélite *COBE* (1992).

- Em 2001, a NASA lançou o satélite *WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), operando na frequência de 93 GHz e que possuía melhor resolução espacial do que o *COBE*.
- O mapa abaixo ilustra as flutuações de temperatura (ou anisotropias), com amplitude de 200 μK .



Emissão térmica do Universo: *WMAP*

Evolução temporal do Universo (segundo modelos teóricos)

- O *Big Bang* representou o início de uma “inflação” ou expansão do Universo. Essa expansão dura até hoje.
- Segundo os modelos teóricos, durante o primeiro 10^{-27} segundo o volume do Universo aumentou até atingir um tamanho menor que o de um átomo.
- Após mais outro 10^{-27} segundo, o Universo já teria alcançado o tamanho de uma galáxia.
- Nessa época, havia *matéria* e *antimatéria*.
- A quantidade de *matéria* era ligeiramente superior à quantidade de *antimatéria*, na proporção de 1 para 1 bilhão.

- À medida que a quantidade de matéria superava a antimatéria, o Universo se expandia e resfriava.
- Após 10^{-5} (10 milionésimos) de segundo, a temperatura já tinha caído a cerca de 10^{12} K (1 trilhão de Kelvins).
- Após 10^{-3} (1 milésimo) de segundo as partículas fundamentais da natureza (quarks & gluons) formaram os primeiros prótons e neutrons.
- Após 1 segundo (e à temperatura de 10^9 K), prótons e neutrons formaram os primeiros núcleos atômicos.
- Após 3 minutos, colisões entre essas partículas formaram os primeiros elementos químicos: H, He e traços de Li e Be (a nucleosíntese primordial).

- Após 350 mil anos, elétrons foram capturados pelos núcleos atômicos, formando átomos... e a temperatura caía a 3000 K.
- Com os elétrons retidos em torno dos núcleos atômicos, o Universo tornou-se transparente à radiação.
- Após 350 milhões de anos, as flutuações de densidade do gás (principalmente H e He) formaram as protogaláxias (detectadas pelo *COBE* e *WMAP*).
- Nas galáxias recém-formadas, nasceram as primeiras estrelas: pontos luminosos no Universo.
- As galáxias se agruparam em estruturas maiores: grupos, aglomerados e filamentos...

Para saber mais...



- *Hubble: a expansão do Universo*, Augusto Damineli Neto, Odisseus editora.
- *No coração das galáxias*, Sueli M.M. Viegas
- *No reino dos astrônomos cegos*, Ulisses Capozzoli, cap. 1
- *Astronomia & Astrofísica*, S.O. Kepler & M.F. Saraiva
- *Os três primeiros minutos*, Steven Weinberg, Gradiva