

Fundamentos de Astronomia e Astrofísica

Cosmologia

Tibério B. Vale

O Universo em larga escala

Não vivemos no centro do universo!

No começo do século passado (1900) o homem teve que admitir que vivemos, em um planeta nada excepcional, próximos a uma estrela comum, localizada na periferia de uma galáxia normal, em um grupo de aglomerados, localizado na periferia de um grande cúmulo de aglomerados.

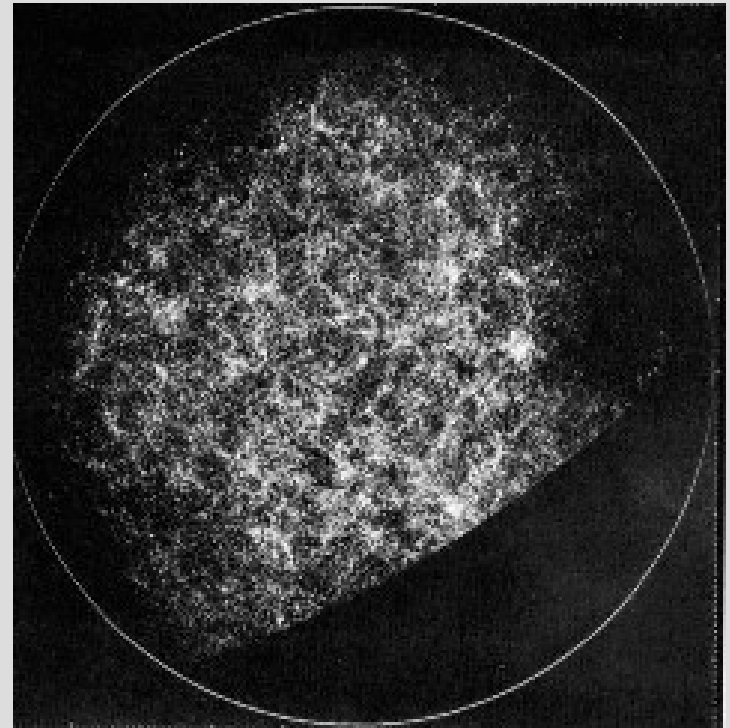
Este cúmulo (de Virgem) é pequeno se comparado com outros cúmulos (super aglomerados) do universo.

>>> Somos insignificantes frente ao universo!!! <<<

O Universo em larga escala



Aglomerado de Virgem



Universo em Grande Escala

O Universo em larga escala

Observação (Slipher , Hubble e Humason)

Slipher - Em 1912 estudou o espectro de M31 e concluiu que ela está se aproximando de nós com $v=300\text{km/s}$ (blueshift);

- Estudou + 41 galáxias (2 décadas) e concluiu que quanto mais fraca era a fonte (+ distante) maior era o redshift.

Hubble - Em 1929, medindo o redshift nas linhas espectrais das galáxias observadas por Humason (1891-1972), e medindo ele próprio suas distâncias.

- Descobriu que as galáxias estavam se afastando com velocidades proporcionais à sua distância, isto é, quanto mais distante a galáxia, maior sua velocidade de afastamento.

O Universo em larga escala



1929: primeira evidência para a expansão do Universo.

já predita:

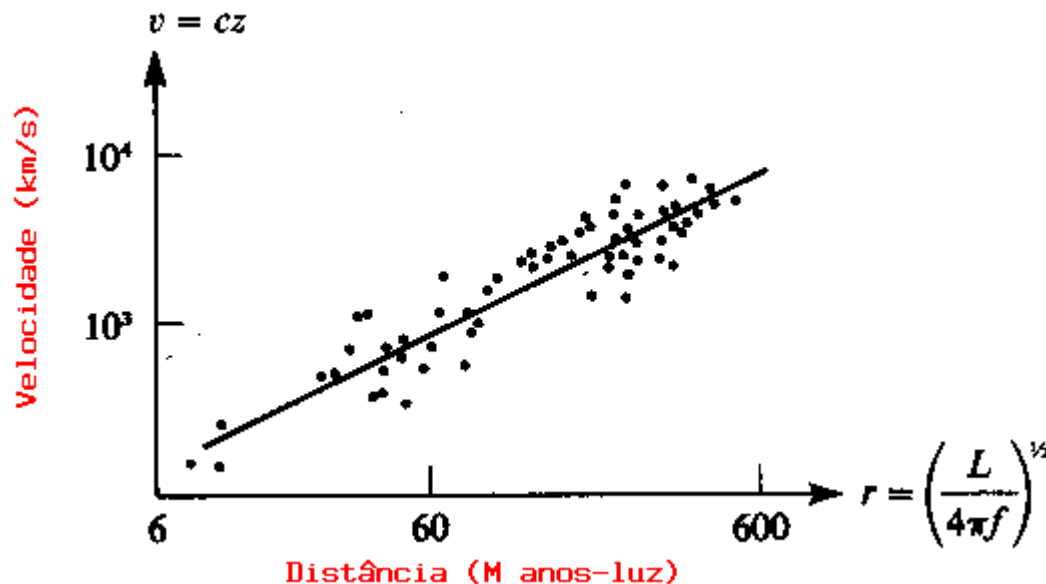
Pelo russo Alexander Friedmann (1888-1925) em dois artigos publicados em 1922 e 1924,

Pelo belga Georges-Henri Édouard Lemaître (1894-1966) em 1927.

O Universo em larga escala

Interpretação (Hubble, baseado no efeito Doppler)

A maioria das galáxias estão se afastando de nós, com velocidades proporcionais à sua distância.



$$v = H_0 d$$

O Universo em larga escala

$$v = H_0 d$$

v = velocidade de recessão em km/s

d = distancia em Mpc

H_0 = taxa de expansão atual (constante de Hubble) ~ 71 km/s/Mpc (a velocidade de recessão das galáxias aumenta 71 km/s a cada Mpc de distância)

galáxias a 1 Mpc têm velocidade de recessão de 71 km/s

galáxias a 10 Mpc têm velocidade de recessão de 710 km/s

galáxias a 11 Mpc têm velocidade de recessão de 780 km/s

galáxias a 100 Mpc têm velocidade de recessão de 7100 km/s

etc... Conclusão

O universo está em expansão!

O Universo em larga escala

Implicações do Universo em expansão:

- O universo não tem bordas
- O universo não tem centro

Princípio Cosmológico:

O Universo é **HOMOGÊNEO** e **ISOTRÓPICO**.

homogeneidade: não existe lugar especial no universo (em larga escala, a distribuição de galáxias é uniforme)

isotropia: não existe direção especial no universo. A aparência do universo é a mesma, em qualquer direção, para qualquer observador.

A constante de Hubble (H_0) e a idade do universo (t_0)

Como podemos estimar a idade do universo?

Seja: t_0 = tempo que as galáxias distantes, movendo-se à mesma velocidade de hoje, teriam levado para chegar aonde estão.

$$v = H \times d$$

Mas

$$v = d/t_0$$

$$t_0 = H^{-1}$$

A constante de Hubble (H_0) e a idade do universo (t_0)

H_0 está medido entre:

57 km/s/Mpc e 78 km/s/Mpc

$t_0 \leq 12$ a 17 bilhões de anos

$$t_0 = H^{-1}$$

Este valor é consistente com o valor derivado para anãs brancas de aglomerados globulares: 12 e 14 bilhões de anos

O Paradoxo de Olbers

Por que o céu é escuro à noite?

Num universo uniformemente populado com galáxias cheias de estrelas, e que seja:

homogêneo e isotrópico

é de se imaginar que seja infinito e invariável no espaço e no tempo.



O Paradoxo de Olbers

O Número de estrelas aumenta com a distância ($\propto R^2$)

O tamanho angular de uma estrela cai com a distância ($\propto R^{-2}$),

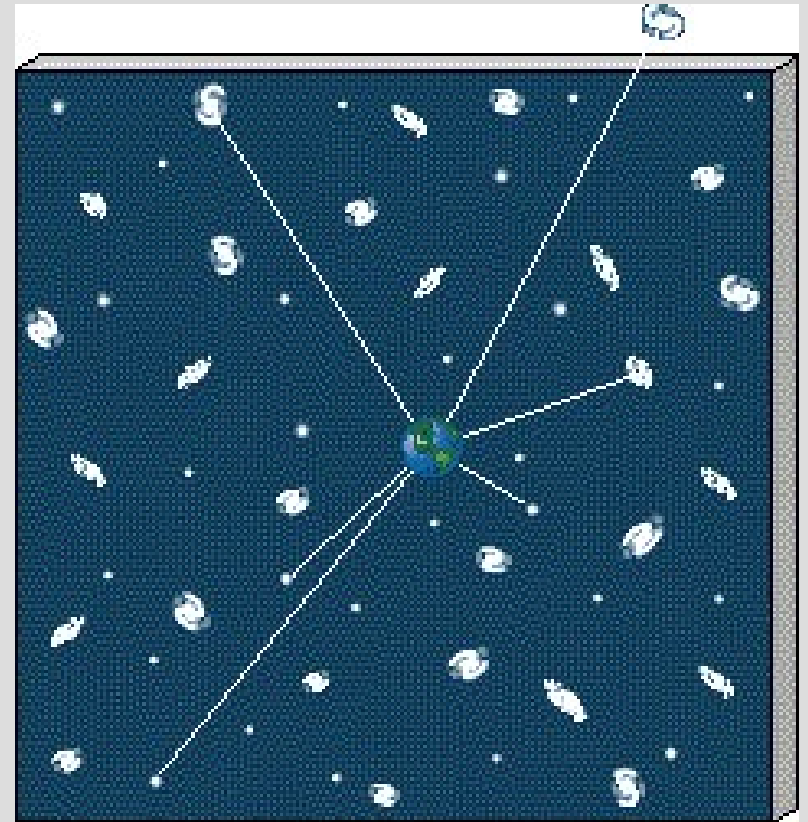
Assim, o céu deveria ser totalmente coberto de estrelas, sem espaços entre elas.



O Paradoxo de Olbers

À medida que um observador olha mais longe, vê um número de estrelas que cresce com o quadrado da distância

A linha de visada interceptaria uma estrela em qualquer direção que se olhasse!



O Paradoxo de Olbers



Analogia com a floresta:

De dentro da floresta, as árvores próximas estão espaçadas entre elas; as distantes não.

O Paradoxo de Olbers

Solução do paradoxo:

O universo é finito no tempo.

Mesmo se o universo fosse infinito no espaço, como a luz tem uma velocidade finita, a luz das estrelas mais distantes do que (idade do universo \times a velocidade da luz) não teria tempo de chegar até nós.

O Paradoxo de Olbers

Qual deveria ser o tamanho do Universo para o céu ser tão brilhante quanto a superfície do Sol?

O Paradoxo de Olbers

1) Quantidade de "sóis" necessários para encher o céu

A área angular do céu é a área que subtende o ângulo sólido de 4π radianos;

Lembrando que um ângulo sólido ω é definido como $\omega = \text{área}/r^2$, a área correspondente ao ângulo de 4π é $4\pi (1 \text{ rad})^2$

Lembrando ainda que $1 \text{ rad} = 360^\circ/2\pi = 57,3^\circ$;

$4\pi (1 \text{ rad})^2 = 4\pi \times (57,3^\circ)^2 = 41260^\circ$ (graus quadrados)

O tamanho angular do disco solar no céu é $2\pi(0,25^\circ)^2 = 0,4^\circ$ (graus quadrados)

Logo seriam necessários $41260/0,4 = 103150$ discos solares para encher o céu.

O Paradoxo de Olbers

2) Fluxo correspondente

O fluxo total correspondente seria o fluxo de 103150 sóis à distância de 1 unidade astronômica; como $\text{fluxo} = \text{luminosidade}/4\pi r^2$, passando unidade astronômica para anos-luz isso dá $\text{fluxo total} = 3 \times 10^{13} \text{ sóis}/(\text{ano-luz})^2$

3) Densidade de estrelas na vizinhança solar:

Considerando a distância média entre as estrelas como a distância da estrela mais próxima do Sol, que é 4 anos-luz, a densidade de estrelas na vizinhança solar é $1 \text{ estrelas}/(4/3)\pi(4\text{anos-luz})^3 = 0,004 \text{ estrelas}/(\text{ano-luz})^3$; assumindo que elas são similares ao sol, temos $0,004 \text{ sóis}/(\text{ano-luz})^3$

O Paradoxo de Olbers

Raio da esfera que contém tantos "sóis" tal que o fluxo total na Terra seja o de 3×10^{13} sóis/(ano-luz)²:

$$0,004 \text{ sóis}/(\text{ano-luz})^3 \times R = 3 \times 10^{13} \text{ sóis}/(\text{ano-luz})^2$$

$$\mathbf{R = 7,5 \times 10^{15} \text{ anos-luz}}$$

Se o universo tivesse esse tamanho e idade suficiente para vermos as estrelas mais distante, então o céu seria tão brilhante quanto a superfície do Sol; como o universo tem apenas 13 bilhões de anos, mesmo que ele tivesse um raio de $7,5 \times 10^{15}$ anos-luz, não poderíamos ver as estrelas mais distantes porque sua luz não teria chegado até nós, o que impediria que ele se tornasse brilhante.

O Paradoxo de Olbers

Conclusão:

Mantendo o princípio cosmológico, então:

- o universo é finito no espaço,
- o universo é finito no tempo
ou nenhum dos dois!

Modelos do Universo

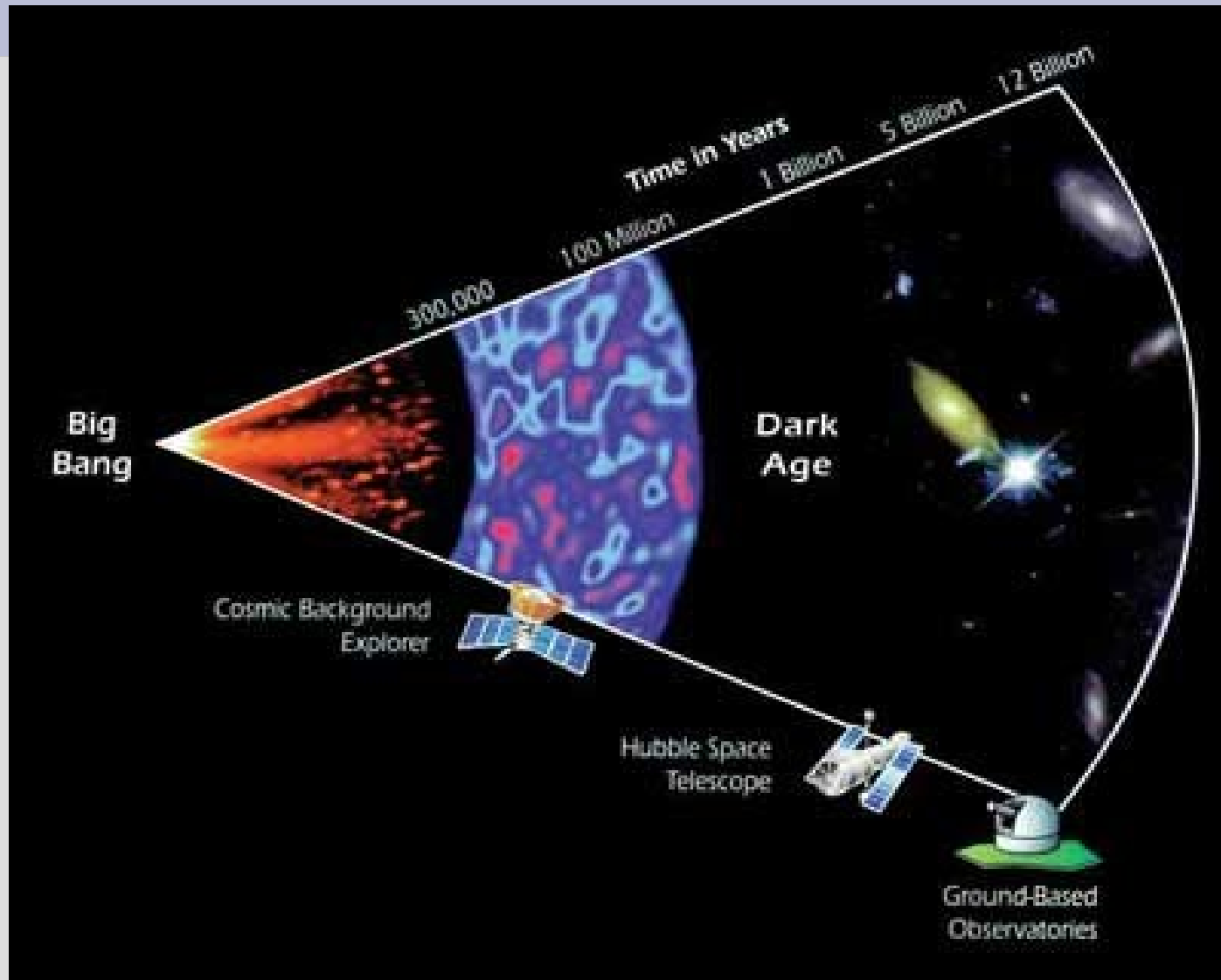
- **Universo estacionário** (imutável no tempo).
 - Herman Bondi (1919-2005),
 - Thomas Gold (1920-2004) e
 - Fred Hoyle (1915-2001).

- **Universo evolutivo** (teve uma origem no tempo).
 - Lemaître (1927) foi provavelmente o primeiro a propor um modelo específico para a origem do universo, a partir de um átomo primordial.

O Big Bang

- O universo iniciou a partir de um estado extremamente quente e extremamente denso, em que toda a matéria e toda a radiação estavam contidas num espaço infinitamente pequeno.
- Big Bang = flutuação quântica do vácuo (proposto por E. Tryon em 1973).
- Nos primeiros momentos do universo ele era tão quente que a colisão de fótons podia produzir partículas materiais.
- À medida que o universo se expande, ele esfria.
- Quanto menor a temperatura, menor a energia de radiação, e menor a massa das partículas que podem ser produzidas nas colisões de fótons.

O Big Bang



Evolução do Universo

Evolução do Universo

Idade cósmica	Temperatura	Eventos marcantes
< 10^{-44} segundos	> 10^{32} K	Big Bang. Unificação das 4 forças. Era de Planck.

Evolução do Universo

10^{-44} segundos	10^{32} K	Gravidade se separa das outras forças. Era das GUT's (teorias da grande unificação das forças nucleares forte e fraca e da força eletromagnética).
10^{-35} segundos	10^{28} K	Força nuclear forte se separa da força eletro-fraca
10^{-32} segundos	10^{27} K	Fim da era da Inflação. Universo se expande rapidamente.
10^{-10} segundos	10^{15} K	Era da radiação. Forças eletromagnéticas e fracas se separam.
10^{-7} segundos	10^{14} K	Era das partículas pesadas (era hadrônica). A colisão de fótons dá origem a prótons, antiprótons, quarks, e antiquarks.

Evolução do Universo

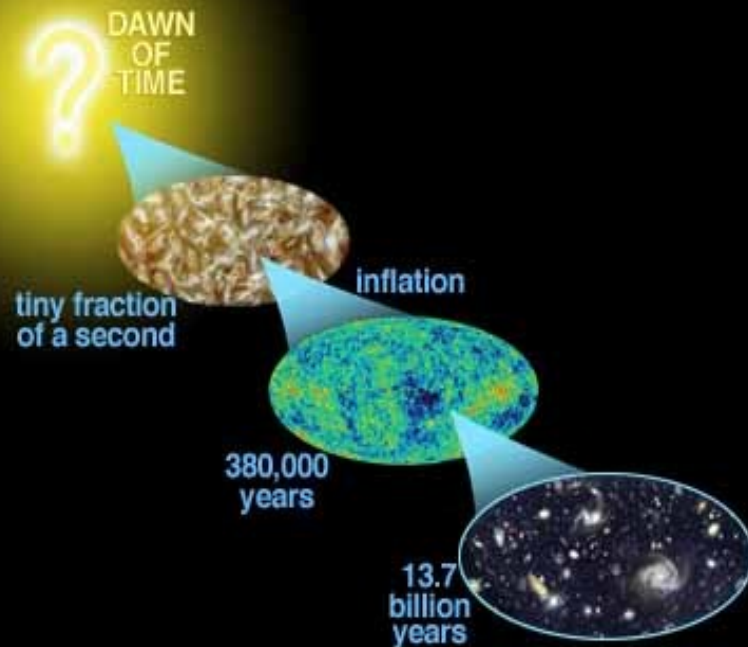
10^{-7} segundos	10^{14} K	Era das partículas pesadas (era hadrônica). A colisão de fótons dá origem a prótons, antiprótons, quarks, e antiquarks.
10^{-1} segundos	10^{12} K	Era das partículas leves (era leptônica). Fótons retêm energia suficiente apenas para construir partículas leves como elétrons e pósitrons.
3 minutos	10^{10} K	Era da nucleossíntese. Prótons e elétrons interagem para formar nêutrons. Prótons e nêutrons formam núcleos de deutério, hélio, e pequena quantidade de lítio e berílio. Todos os átomos encontram-se ionizados.
380 000 anos	10^3 K	Era da recombinação. Os elétrons se unem aos núcleos para formarem os átomos. A radiação pode fluir livremente pelo espaço. (O universo fica transparente.)
1×10^9 anos	20 K	Formação das galáxias .
10×10^9 anos	3 K	Era presente. Formação do sistema solar. Desenvolvimento da vida.

Evidências observacionais a favor do Big Bang

- 1. A expansão do universo (Lei de Hubble)
- 2. A escuridão da noite (paradoxo de Olbers)
- 3. A radiação cósmica de fundo
- 4. A abundância observada de hélio no universo:

A quantidade de Hélio formado no interior das estrelas corresponde a apenas 10% do total de hélio observado no universo (que tem basicamente 25% de hélio e 75% de hidrogênio). Isso diz que o hélio deve ter se formado no início, antes da formação de galáxias e estrelas. A teoria do Big Bang prevê que parte do hidrogênio inicial do universo deve ter se transformado em hélio durante a nucleossíntese inicial.

Radiação cósmica de fundo (CMB)



descoberta em 1963, por Arno Penzias e Robert Wilson (observação) e David Dick, James Peebles, Peter Roll e David Wilkinson (interpretação)

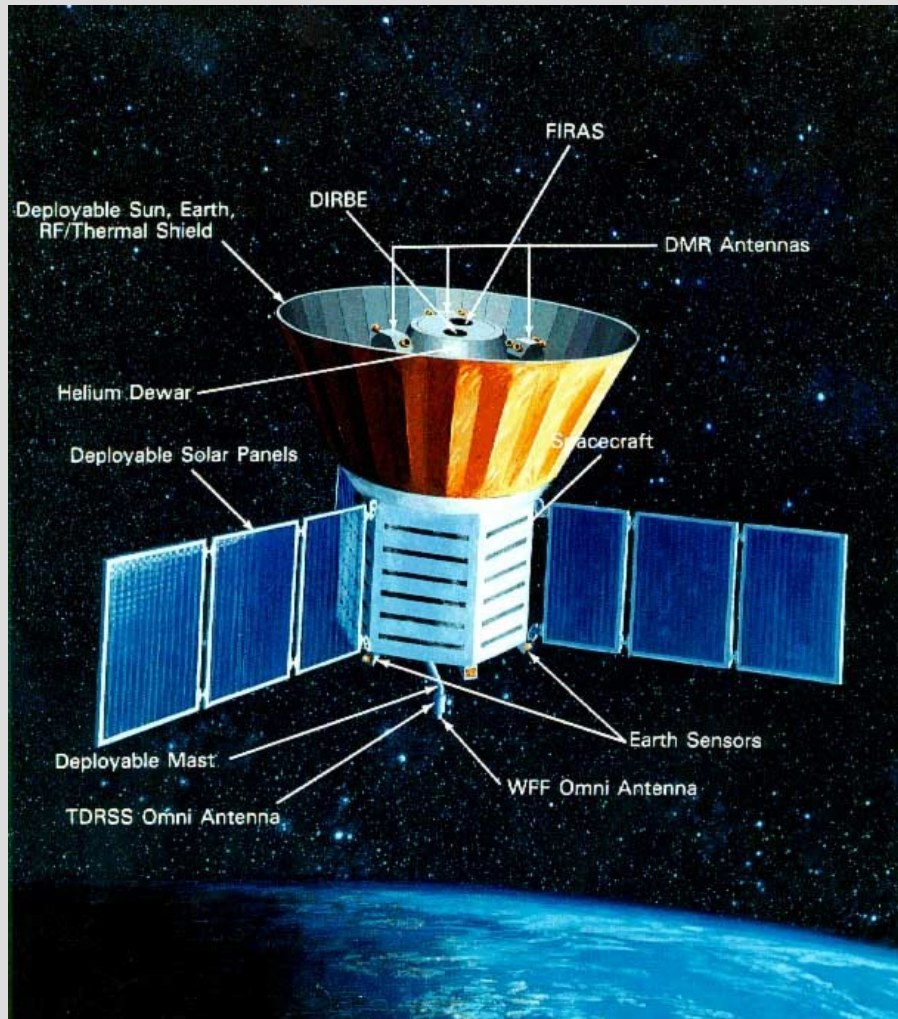
predita teoricamente em 1948, por Alpher, Herman e Gamow

temperatura de corpo negro de $\sim 3\text{K}$

gerada na época da recombinação (idade = 380.000 anos, temperatura = 3000K)

COBE (1989-1992)

Cosmic Background Explorer

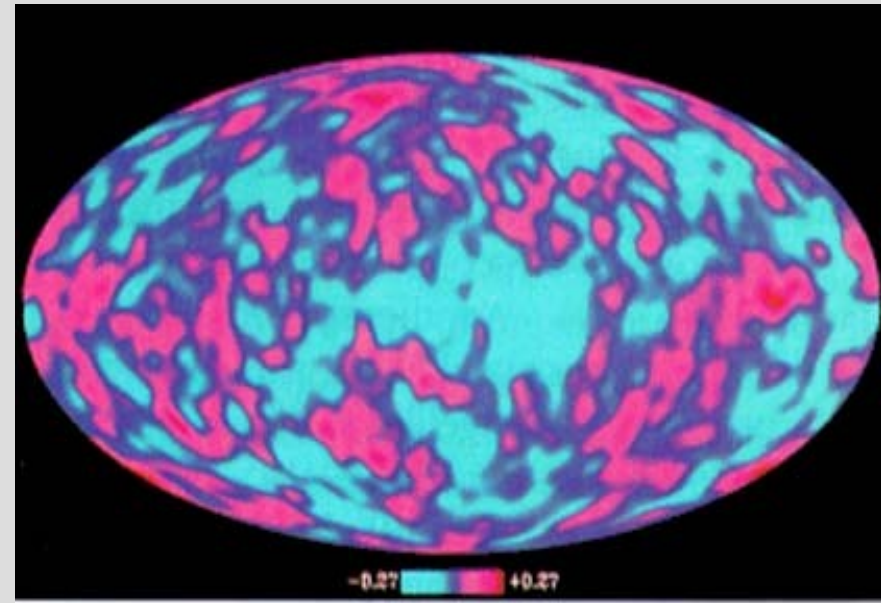
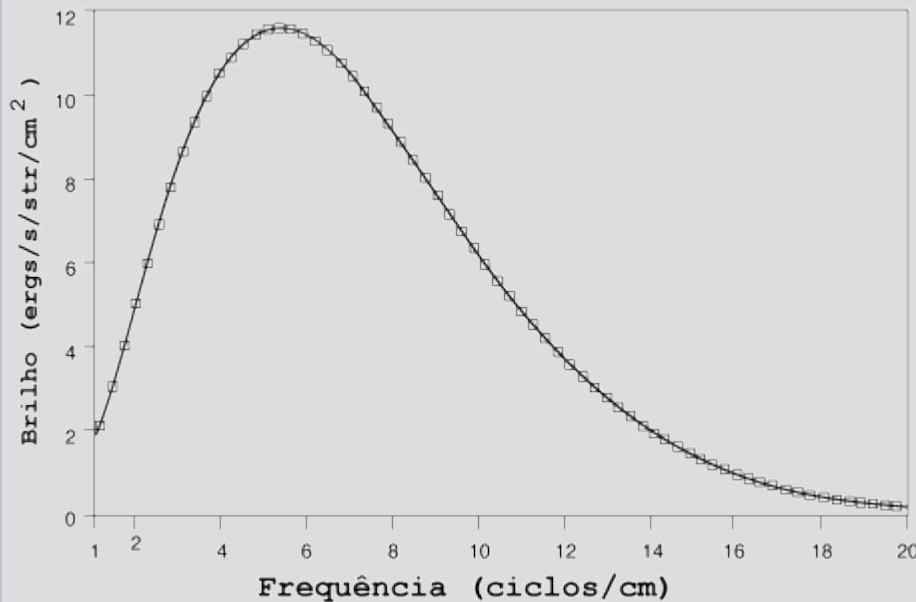


Operava na faixa de microondas com resolução angular de 7 graus

COBE

- temperatura de corpo negro de 2,7K

pequenas variações de temperatura → flutuações de densidades → formação de galáxias



CMB segue uma distribuição de Planck

Qual o futuro do universo?

- Depende da quantidade de energia total no universo:
- Energia total positiva ou nula → Expansão perpétua (universo aberto ou plano)
- Energia total negativa → Expansão interrompida, seguida de contração (universo fechado)

Big Bang: Perguntas não respondidas

- De onde surgiram as estruturas do Universo?

A formação de estruturas como galáxias exigem que houvessem flutuações de densidade nos primórdios do universo. Essas flutuações não existem no Big Bang padrão.

Big Bang: Perguntas não respondidas

Por que o universo em larga escala é tão homogêneo e isotrópico? (Problema do horizonte)

- Assim como o Big Bang padrão não prevê a existências das pequenas variações de densidade no início do universo, ele também não prevê a ausência de grandes variações de densidade que são observadas na radiação cósmica de fundo.
- A radiação cósmica de fundo apresenta uma grande isotropia; duas regiões opostas no céu têm a mesma aparência. Isso leva a crer que duas regiões opostas uma vez estiveram conectadas, de forma a transmitir energia uma para a outra. Mas, pelo modelo do Big Bang, quando essas regiões emitiram a radiação que agora está chegando a nós provinda delas, elas já se encontravam separadas por uma distância maior do que a luz poderia percorrer no tempo de existência que o universo tinha então. Ou seja, essas regiões estavam fora do "horizonte" uma da outra. Então, a menos que o universo tivesse iniciado perfeitamente homogêneo (e então nunca teriam se formado as galáxias), não existe razão para que ele seja tão homogêneo hoje.

Big Bang: Perguntas não respondidas

Por que a densidade do universo é tão próxima da densidade crítica? (Problema da Planicidade)

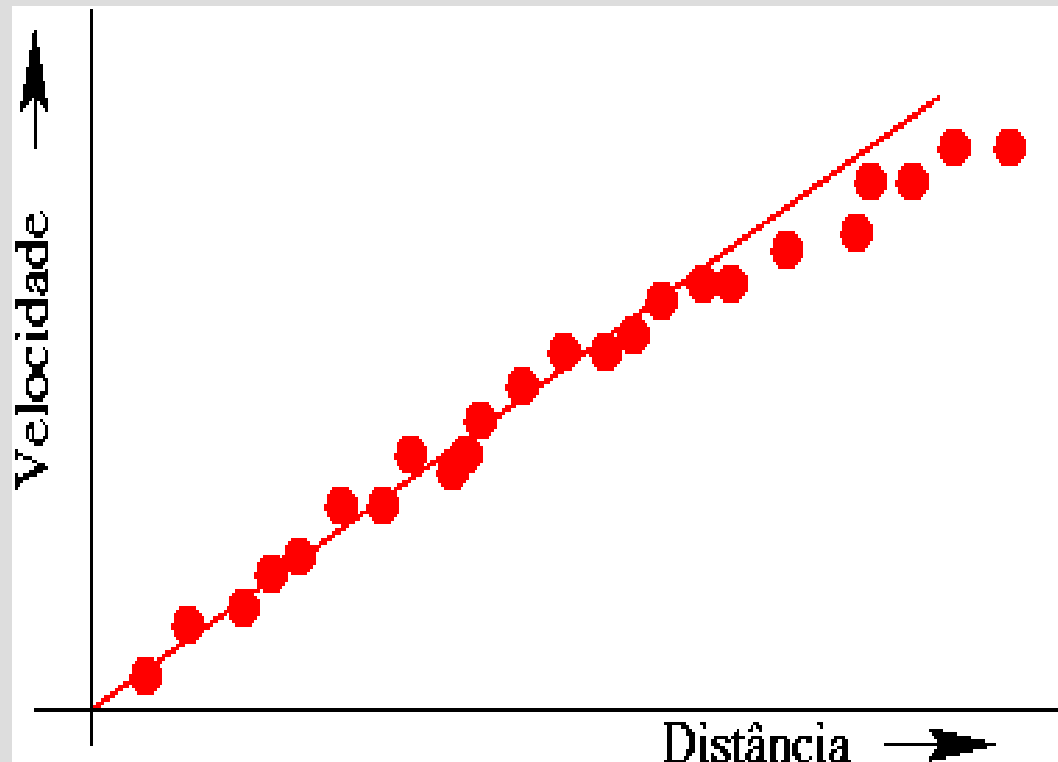
- A densidade de matéria no universo é de 20 a 100% da densidade crítica. Por que não é 1000% ou 0,001%? O fato de a densidade do universo ser hoje tão próxima da crítica, requer que no início essa densidade era diferente da densidade crítica por menos de uma parte em 10^{15} . O Big Bang padrão não diz nada a respeito de qual deve ser a densidade do universo.

O Big Bang com Inflação

- Por volta de 1980, o físico Alan Guth propôs a teoria da Inflação, que poderia responder essas perguntas.
- Basicamente, essa teoria diz que, no início do universo, quando a força forte se separou das outras forças, houve uma enorme liberação de energia que fez o universo se expandir por um fator de 10^{75} em menos de 10^{-36} s. Essa super expansão é chamada Inflação.
- A inflação teria tornado "desconectadas" duas regiões que eram anteriormente conectadas, respondendo assim ao "problema do horizonte", e resolve também o problema da planicidade, pois qualquer curvatura que o universo tivesse tido anteriormente ao período da inflação, essa curvatura teria "desaparecido" com a expansão hiper rápida.

Repulsão cósmica

- Observações de supernovas em galáxias distantes indicam que essas galáxias estão se movendo mais lentamente do que seria esperado para uma expansão constante → **a expansão está se acelerando!**



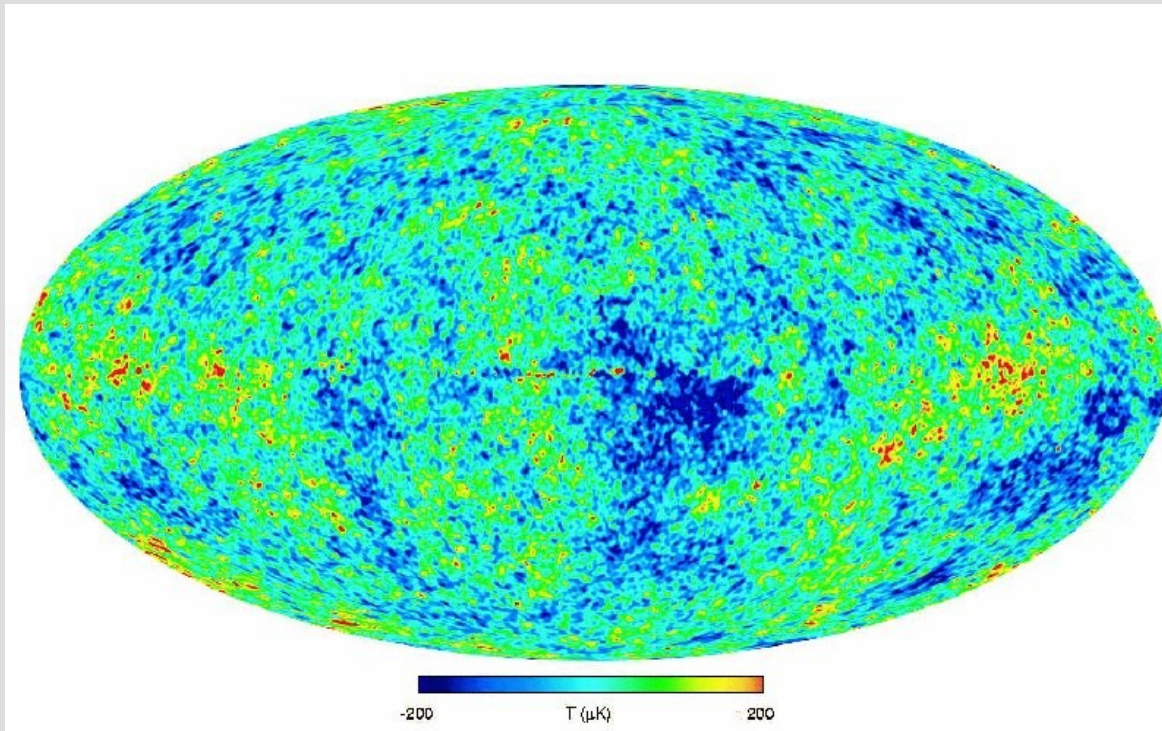
Repulsão cósmica

- **Energia escura**: uma espécie de força de "repulsão cósmica" que faz o universo se expandir aceleradamente. Essa energia constitui cerca de 70% do universo.

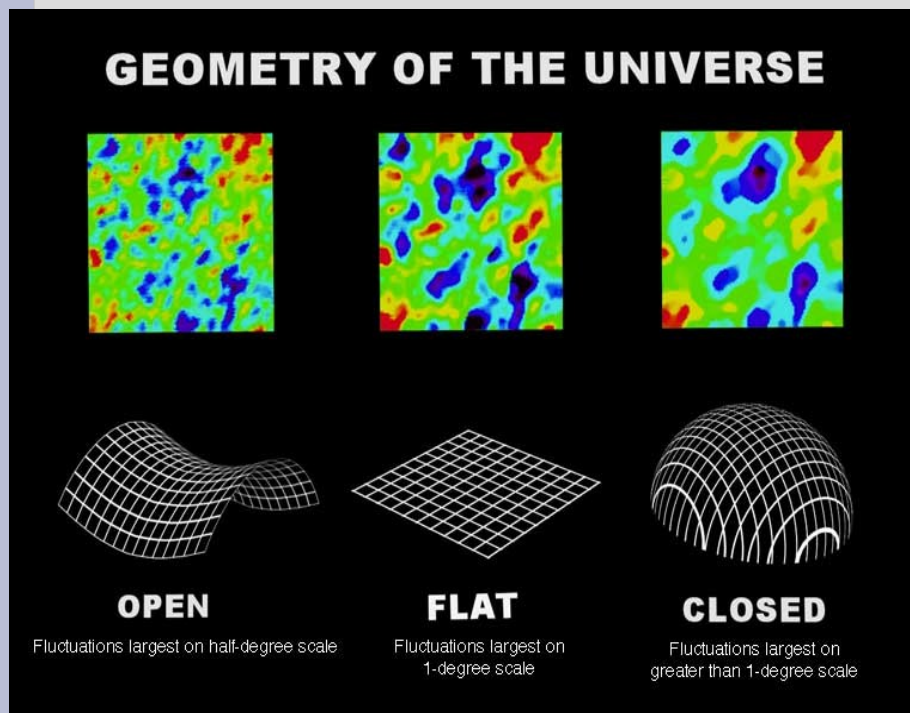
	Tipo	Porcentagem da densidade crítica
	Energia escura	73%
	Matéria escura	23%
	Matéria normal	4%
	Radiação	0,005%

WMAP - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe - 2001

- resolução angular de 0,21 graus em 93 GHz
- idade do universo = 13,7 +/- 2 bilhões de anos
- universo é plano



WMAP - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe - 2001



- **universo aberto:** linhas partindo de um mesmo ponto divergem, fazendo objetos distantes parecerem menores. As flutuações na radiação de fundo aparecerão maiores numa escala de 0,5 grau.
- **universo plano:** linhas partindo de um mesmo ponto permanecem paralelas; as flutuações na radiação de fundo aparecerão maiores numa escala de 1 grau.
- **universo fechado:** linhas partindo de pontos diferentes convergem, fazendo objetos distantes parecerem maiores: as flutuações na radiação de fundo aparecerão maiores numa escala maior do que 1 grau.

As quatro forças da natureza

- **1. Gravidade:** é a interação entre corpos devido à sua massa; é a força dominante no universo em escalas maiores do que a Terra.
- **2. Eletromagnetismo:** é a interação entre corpos devido à sua carga elétrica; é a força dominante em reações químicas e biológicas.
- **3. Força nuclear forte:** é a força responsável por manter os prótons e nêutrons confinados dentro dos núcleos atômicos. É a mais forte das quatro forças, mas tem alcance muito curto (10^{-14}m).
- **4. Força nuclear fraca:** é a força menos conhecida; é responsável pela emissão de radiação e de partículas por núcleos instáveis. Seu alcance é tão curto quanto o da força forte.