



Universidade Federal do ABC

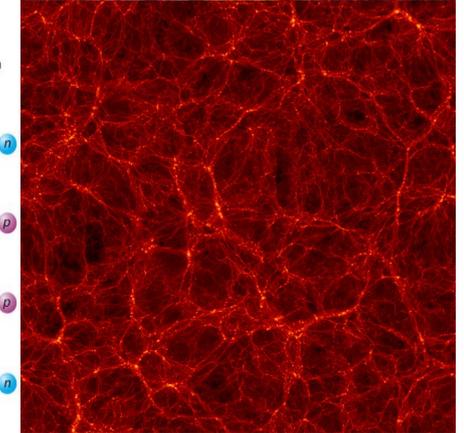
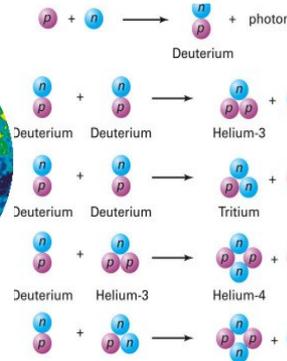
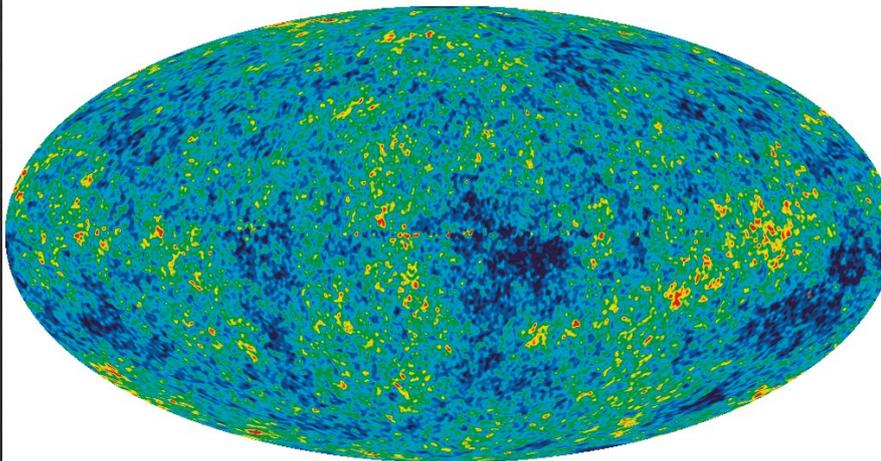
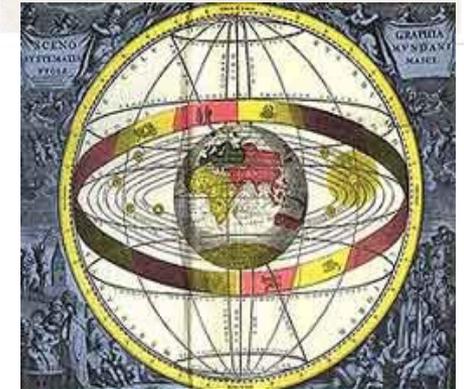
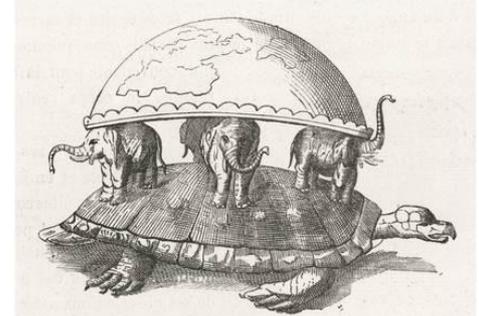
# Astrobiologia

## Origem do Universo - Cosmologia

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/>



# A Origem do Universo

## Cosmologia

wikipedia: Cosmologia (do grego κοσμολογία, κόσμος = "cosmos"/"ordem"/"mundo" + -λογία = "discurso"/"estudo") é o ramo da **astronomia** que estuda a **origem, estrutura e evolução do Universo** a partir da aplicação de **métodos científicos**.

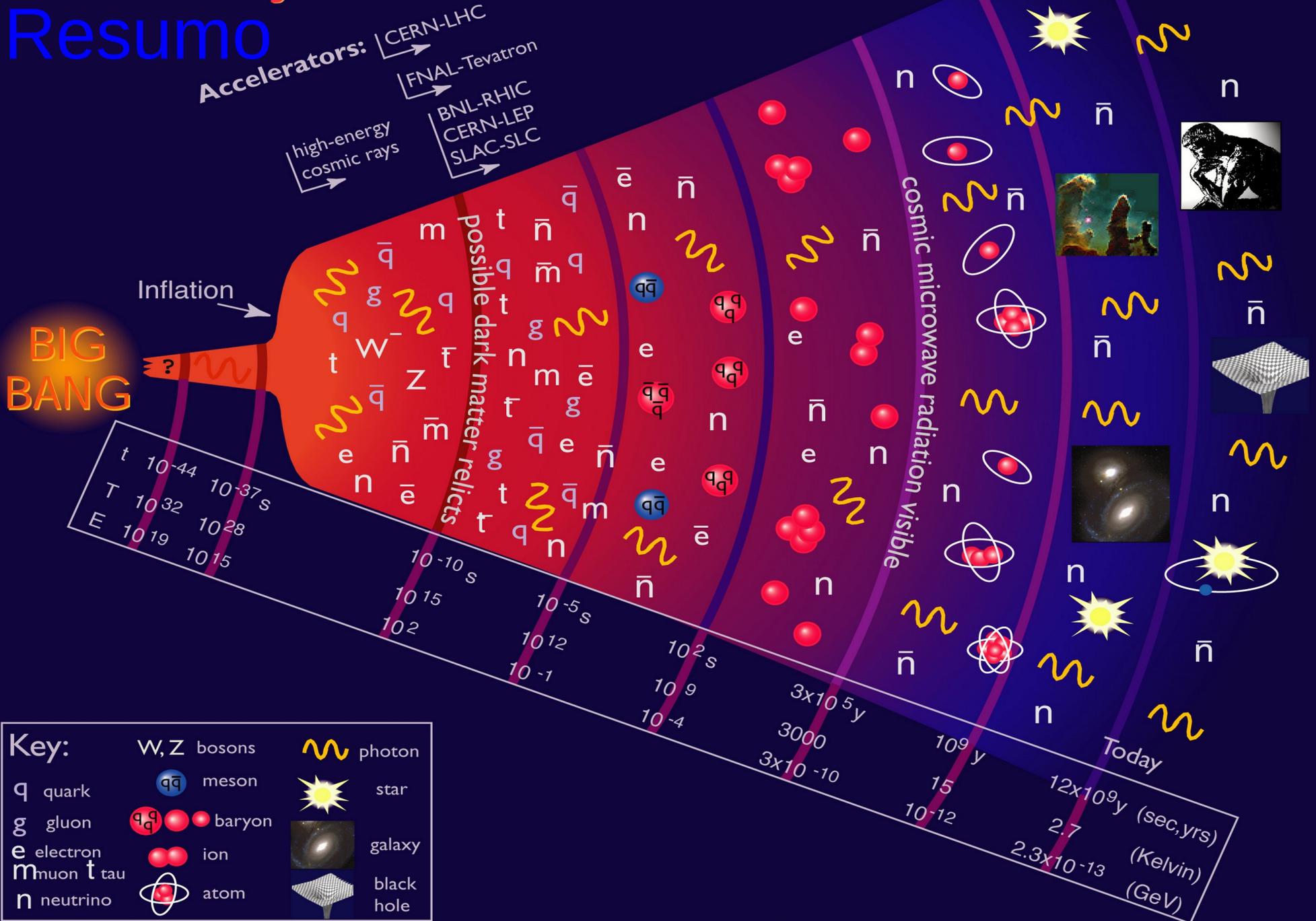
O modelo cosmológico mais aceito hoje em dia é a teoria do ***Big Bang***.

# Teoria do *Big Bang*

O termo *Big Bang* foi criado em 1948 pelos astrofísicos Bondi, Gold e Hoyle para zoar a proposta, de que o Universo teria nascido de uma singularidade inicial.

# History of the Universe

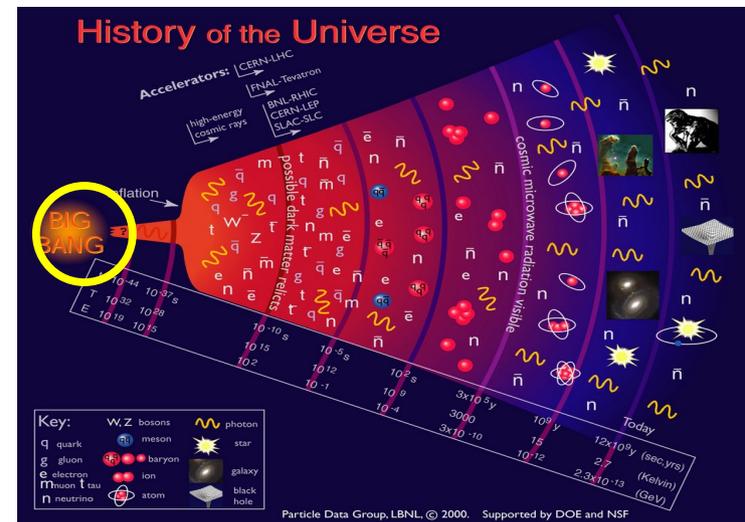
## Resumo



# Teoria do *Big Bang*

0:

**Big Bang**, começo do tempo. O Universo “nasce” de uma singularidade inicial, q. d. um estado de densidade e temperatura infinitas.



Desde então: **Expansão, redução da temperatura.**

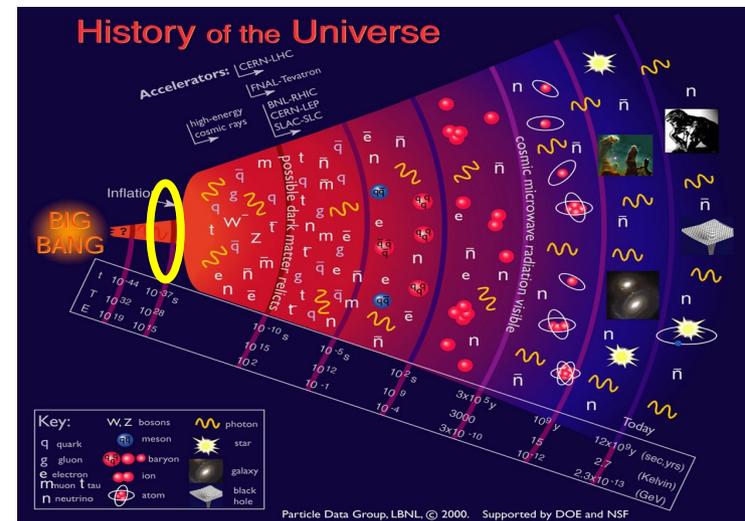
até  $\sim 5 \cdot 10^{-44}$  sec ( $T \geq 10^{32}$  K):

Época de **Planck**: densidade e temperatura altas demais para ser tratada pela física que conhecemos hoje.

# Teoria do *Big Bang*

$5 \cdot 10^{-44}$  s -  $10^{-36}$  s:  $T \geq 10^{28}$  K:

Época da **GUT** (*Grand Unified Theory*, “Grande Teoria Unificada”): As forças **eletromagnética**, **nuclear forte** e **fraca** eram **unificadas** em uma.



O Universo consistia de uma “sopa” primordial de **quarks** (os constituintes dos prótons e dos nêutrons) e **partículas transportadoras de forças** (fótons, grávitons, gluons, ...).

**Matéria** e **anti-matéria** se formavam e aniquilavam constantemente.

# Teoria do *Big Bang*

$10^{-36}$  s -  $10^{-34}$  s ( $T \sim 10^{28}$  K):

**Inflação:** aumento exponencial do tamanho do Universo por um fator  $\geq 10^{43}$  em  $< 10^{-34}$  s.

A “sopa” primordial continuou, mas parte das **partículas** virtuais (aquelas que estavam se formando e aniquilando) se tornaram **reais**.

Nesta época devem ter sido emitidas intensas **ondas gravitacionais**.

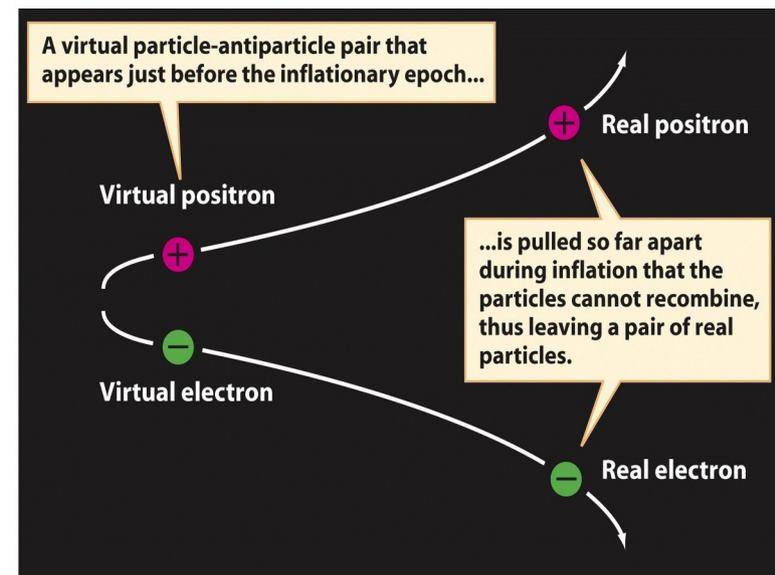
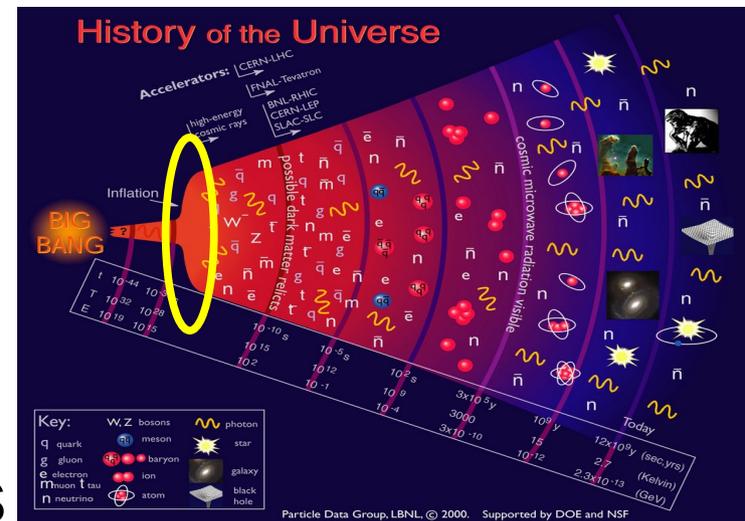


Figure 27-10  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Teoria do *Big Bang*

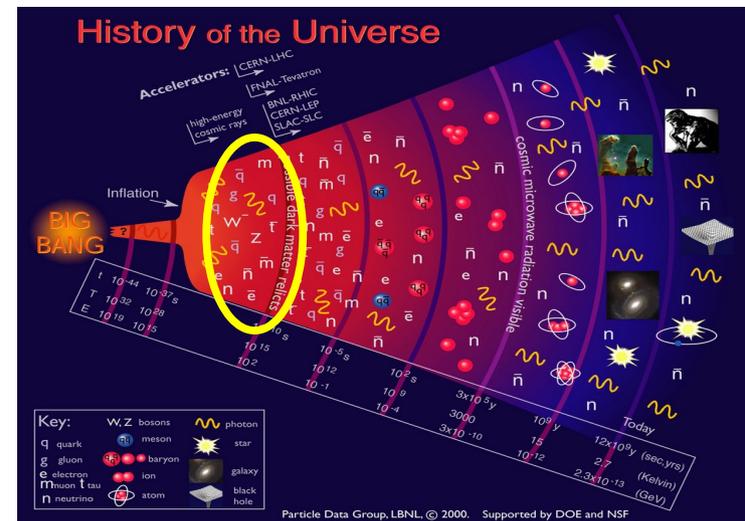
$10^{-34}$  s -  $10^{-11}$  s:

$10^{28}$  K  $\geq T \geq 10^{15}$  K:

Época **Eletrofraca**: As forças **eletromagnética** e **fraca** ainda eram **unificadas** em uma, a força **eletrofraca**, enquanto a força **forte** já era uma força **distinta**.

A “sopa” primordial continuou.

Esta época é, às vezes, chamada de “grande deserto”, por que não houve formação de partículas novas.



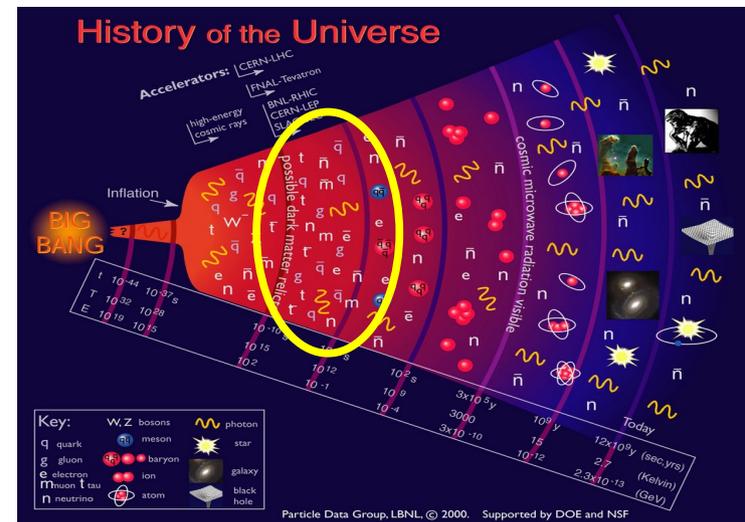
# Teoria do *Big Bang*

$10^{-11}$  s - 1 ms:

$10^{15}$  K  $\geq T \geq 10^{12}$  K:

Época das **Partículas**:

As forças **eletromagnética** e fraca se “**desacoplaram**”, q. d., se tornaram duas forças **distintas**.



**Bariogênese**: A “sopa” primordial se tornou **prótons** e **nêutrons** (bárions, 3 quarks) e mésons (pares quark-antiquark), sobrando de um pequeno **desequilíbrio** entre matéria e anti-matéria  $10^{9+1} : 10^9$ .

São os mesmos prótons e nêutrons que constituem a matéria hoje.

# Teoria do *Big Bang*

1 ms - ~5 min:

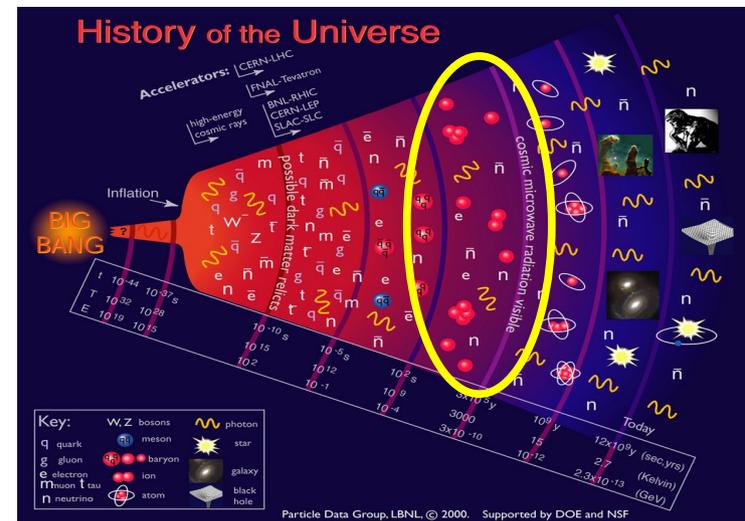
$10^{12} \text{ K} \geq T \geq 10^9 \text{ K}$ :

Época da Núcleossíntese:  
Fusão nuclear dos prótons e  
nêutrons, formando núcleos  
de **hélio** e um pouquinho de  
deuterio, lítio e berílio.

=> composição química primordial do Universo:

**H** (~76 %), **He** (23 a 24 %), D (0.01 %), Li (< 0.01 %).

~98 % dos átomos de hoje (=> próxima aula)



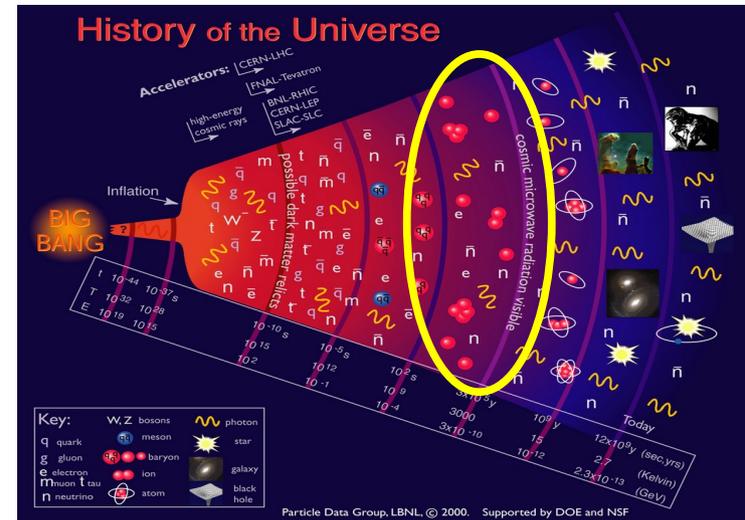
# Teoria do *Big Bang*

4 min - ~378 000 anos:

$10^9 \text{ K} \geq T \geq 3000 \text{ K}$ :

Época dos **Núcleos**:

Núcleos e elétrons interagindo constantemente com fótons (“partículas de luz”).



# Teoria do *Big Bang*

~378 000 anos,  $T = \sim 3000$  K:

Final da Época dos Núcleos

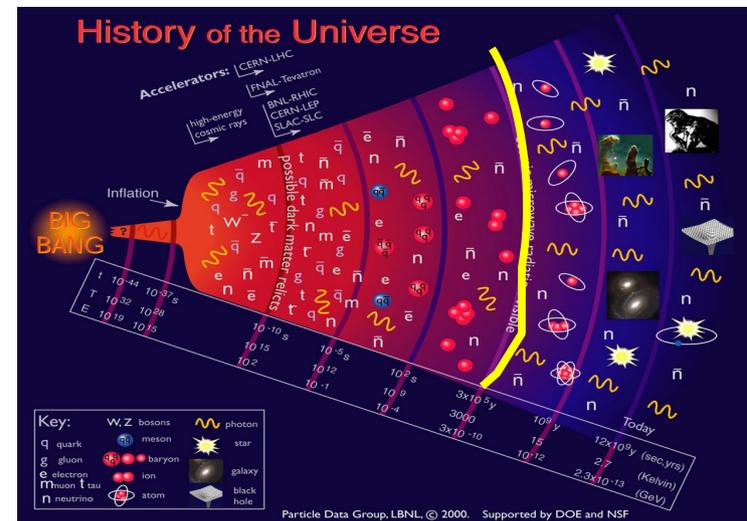
“**Re-combinação**”: **núcleos** e **elétrons** formando **átomos**: **elétricamente neutros**

=> **não interagem** mais com os **fótons**

=> Desde então, a luz pode viajar livremente pelo espaço, “o Universo se tornou transparente”.

A luz emitida/espalhada pouco antes, na “superfície de última difusão” (ou de último espalhamento) ainda está permeando o Universo e pode ser observada como

**Radiação Cósmica de Fundo** (=> em breve).



# Teoria do *Big Bang*

após alguns 100 mi. de anos  
( $T \sim 15$  K):

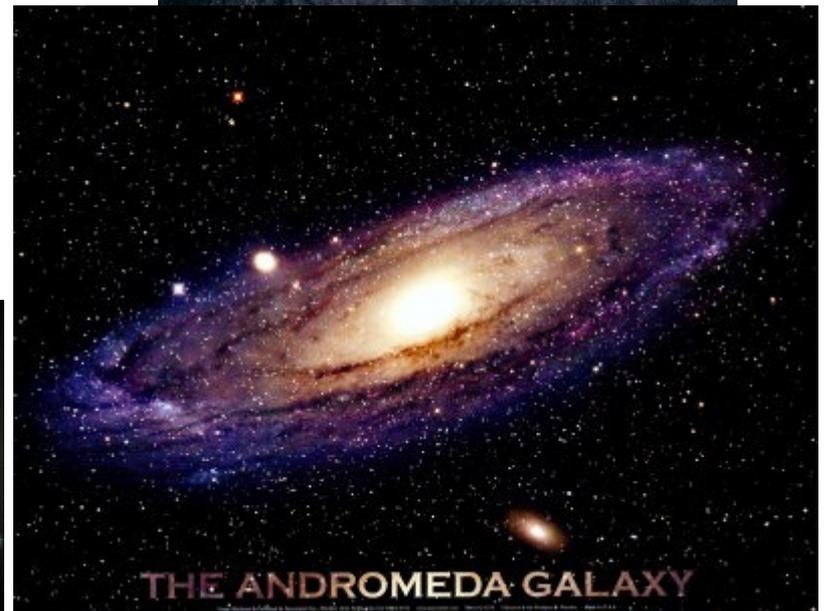
Formação de estrelas e galáxias

A partir  $\sim 1$  bi. de anos até hoje:  
Época das galáxias

Galáxias: “ilhas de estrelas”,  
p. e. a Via Láctea,

a Galáxia de Andrômeda

e outras



# Teoria do *Big Bang*

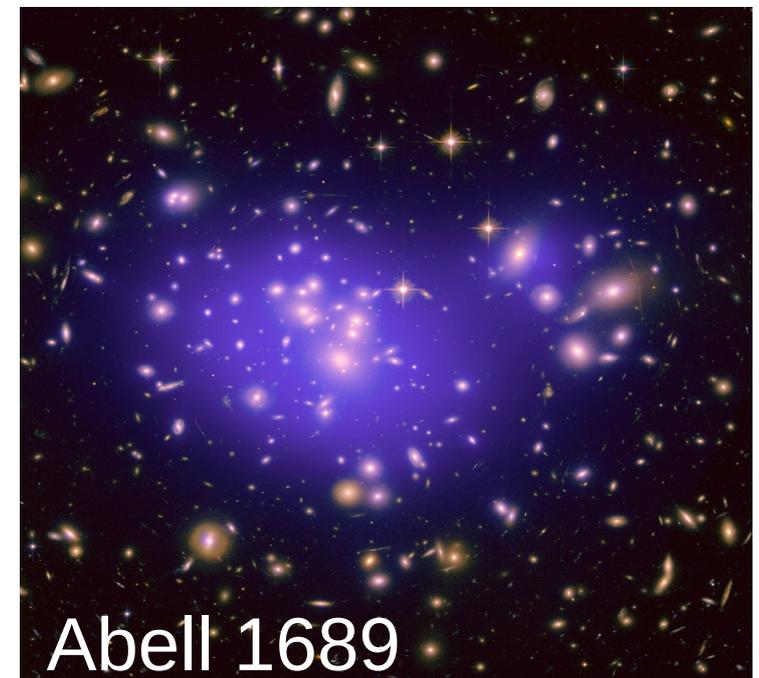
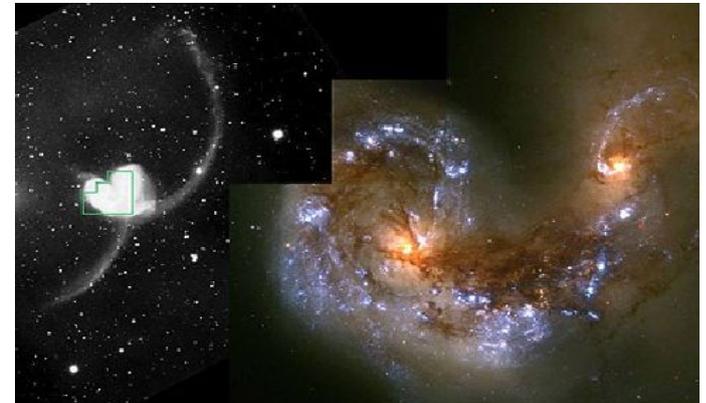
Desde então:

**Galáxias** fusionando para formarem **galáxias maiores**,

se juntando para formarem **Aglomerados** de galáxias,

e **Super-Aglomerados**, que são “aglomerados de Aglomerados”.

=> As estruturas se formam os menores primeiro, os segundo-menores depois, etc., às vezes chamado ***bottom-up***, (“de baixo para cima”).

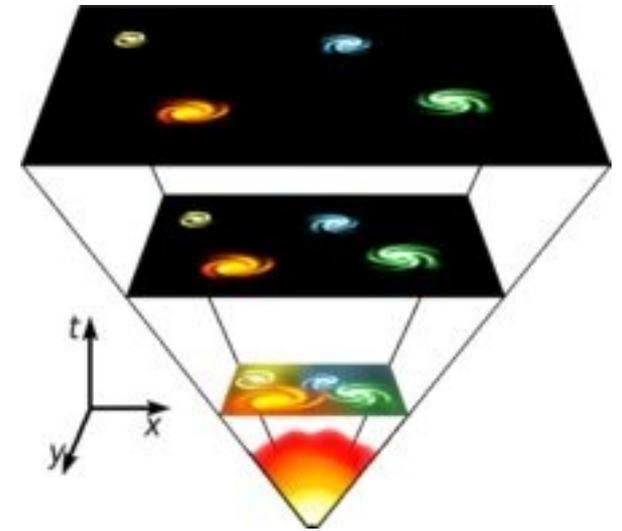


Abell 1689

# Teoria do *Big Bang*

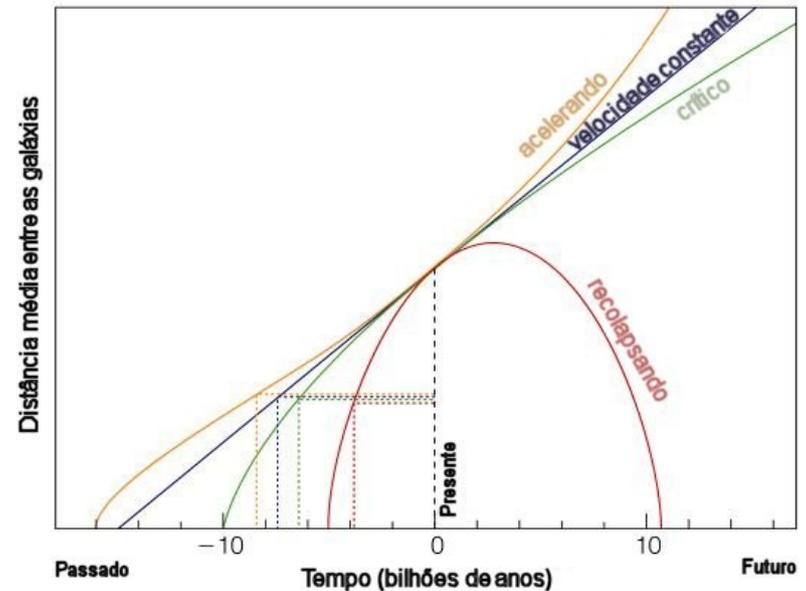
Enquanto isto, o Universo continua expandindo, q. d. as **distâncias** entre as galáxias e entre os Aglomerados de galáxias **umentam**.

As próprias galáxias são sistemas gravitacionalmente ligadas, os seus **tamanhos não aumentam**.



# Teoria do *Big Bang*

Medindo a **taxa** desta **expansão**, pode-se estimar o tempo decorrido desde que o Universo tinha tamanho zero, ou seja, o tempo decorrido desde o *Big Bang*, ou seja, a **Idade do Universo**.



As medidas mais recentes indicam uma idade de **13,8 bilhões de anos** ( $13.8 \cdot 10^9$  a ou 13.8 Gyr).

# Teoria do *Big Bang*

Esta expansão vai continuar por sempre?

Isto depende do balanço entre vários fatores:

- A **taxa** da **expansão**.

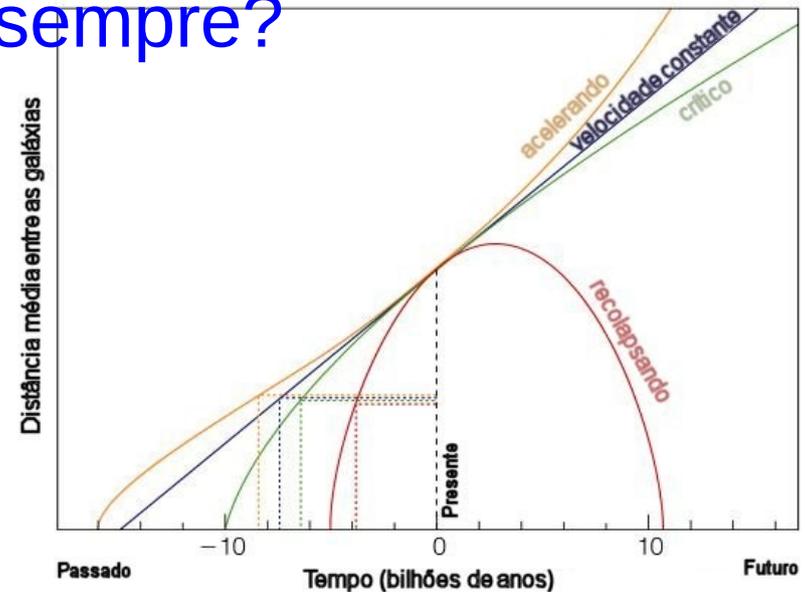
- A **densidade** da **matéria**:

A atração gravitacional da matéria **freia** a expansão.

A partir de uma certa densidade, a **densidade crítica**, a gravitação consegue parar e reverter a expansão, resultando no **recolapso** do Universo (*Big Crunch* ou, citando Douglas Adams, *Gnab Gib*).

- A “**Energia Escura**”, relacionada à constante cosmológica  $\Lambda$ , uma grandeza que surge da teoria da Relatividade, e que tende a **acelerar** a expansão.

Até recentemente, os cientistas acreditavam que  $\Lambda$  era 0.

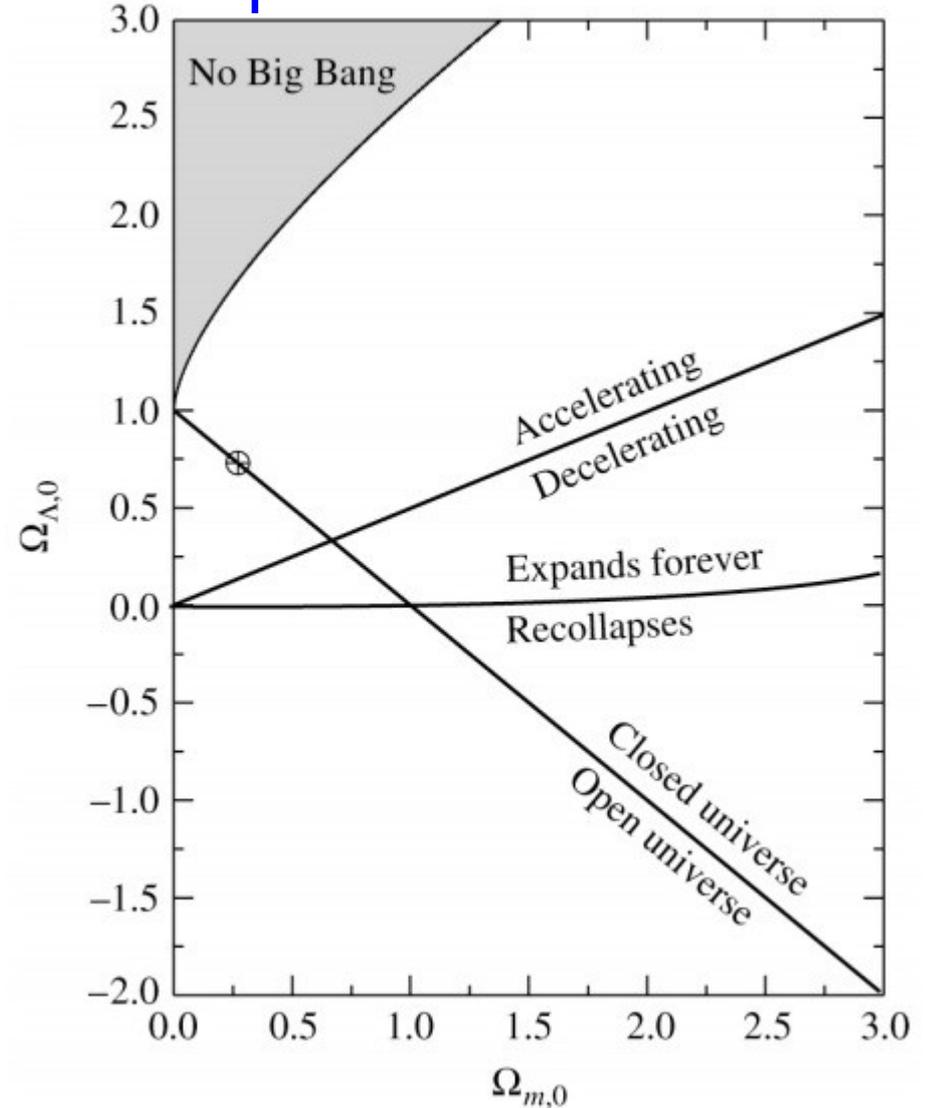


# Teoria do *Big Bang*

Esta expansão vai continuar por sempre?

Podemos fazer um **diagrama** dos **possíveis destinos** do **Universo** em função das **densidades** de **matéria** e **Energia Escura**,  $\Omega_{m,0}$  e  $\Omega_{\Lambda,0}$ .

( $\Omega$  é usado para densidades em unidades da densidade crítica, que depende da taxa de expansão, ou vice-versa; O “0” no subscrito significa valor atual)



# Teoria do *Big Bang*

Esta expansão vai continuar por sempre?

Medidas recentes (=> mais pra frente nesta aula) indicam que:

- A **matéria** no Universo **não** chega nem perto da **densidade** necessária para parar e reverter a expansão.

A matéria “comum” (átomos), também chamada de **bariônica**, equivale a apenas **5 %** da **densidade crítica**.

Além dela, parece existir uma matéria invisível, de outra natureza (p. e. partículas elementares ainda não detectadas), em quantidade **5 ou 6 vezes maior** do que a bariônica, a **Matéria Escura** não-bariônica.

Juntas, as matérias bariônica e Escura não-bariônica equivalem a apenas da ordem de **31 %** da **densidade crítica**.

=> **O Universo continuará expandindo**

# Teoria do *Big Bang*

Esta expansão vai continuar por sempre?

- Além disso, a **Energia Escura** não é nada zero.

Ela é da ordem de **69 %** da **densidade crítica**.

=> O Universo não só continuará expandindo, a **expansão** está **acelerando!**

Juntas, as matérias bariônica e não-bariônica e a Energia Escura equivalem à densidade crítica.

=> **95 % do Universo são de natureza desconhecida !!!**

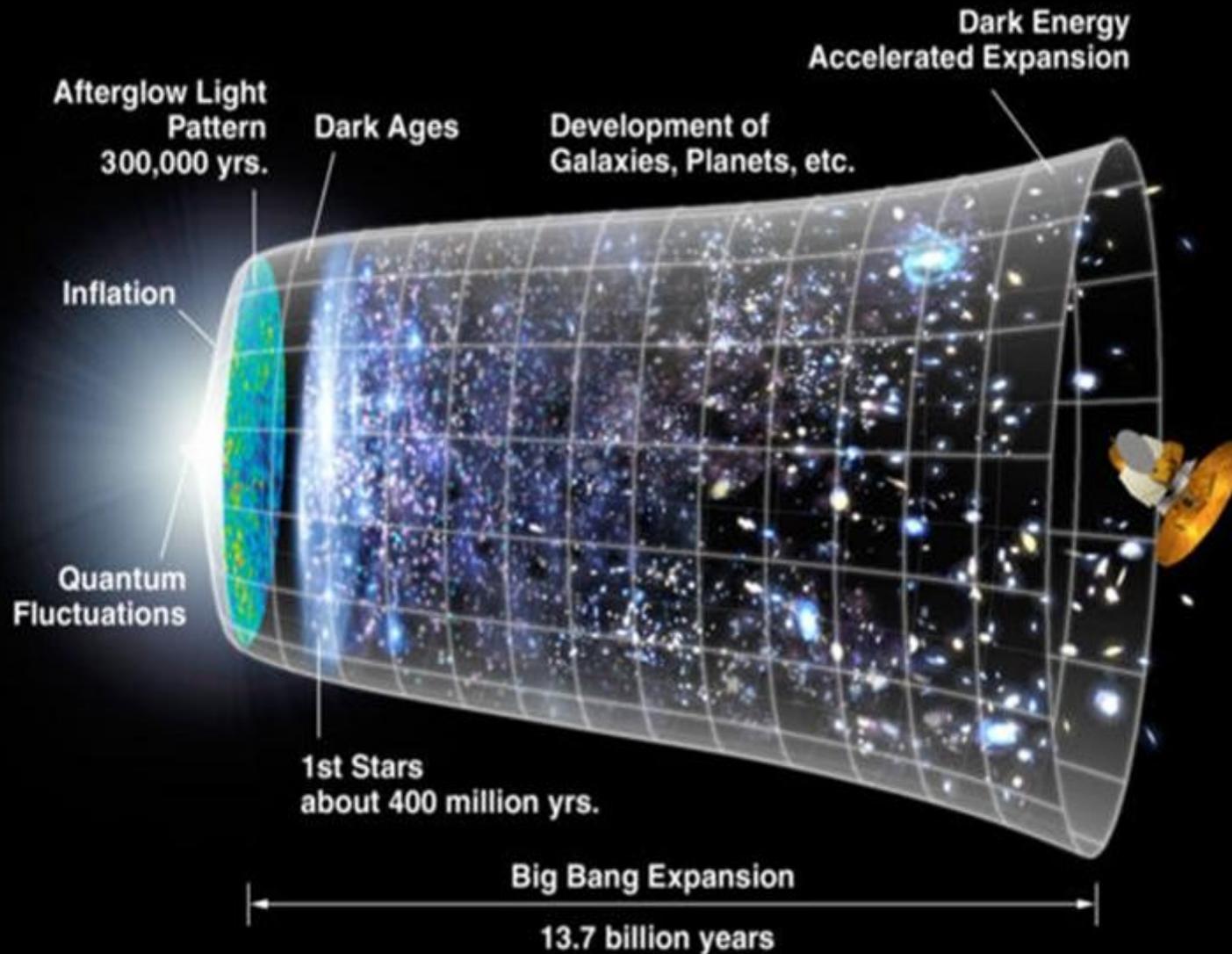
quer dizer: Matéria Escura e Energia Escura

O **modelo cosmológico** que contém todos estes ingredientes se chama  **$\Lambda$ CDM** (do inglês “ $\Lambda$  Cold Dark Matter”), ou **modelo padrão**.

Composição do Universo



# Resumo

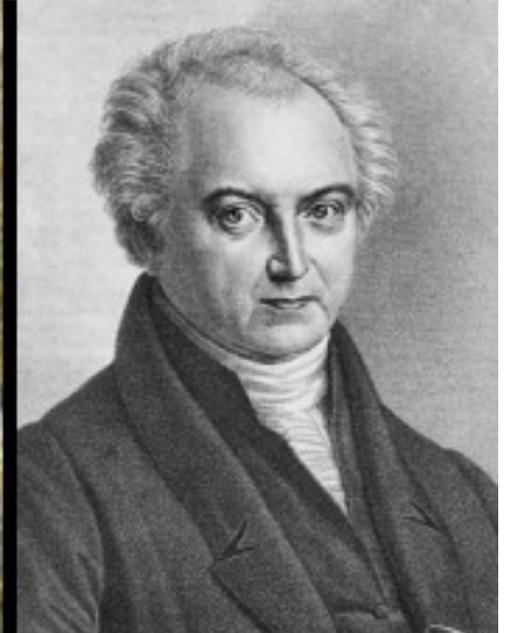


Isto tudo parece papo de maluco.

De onde tiraram isto?

# Paradoxo de Olbers (1823)

Análogo a uma floresta de extensão infinita:



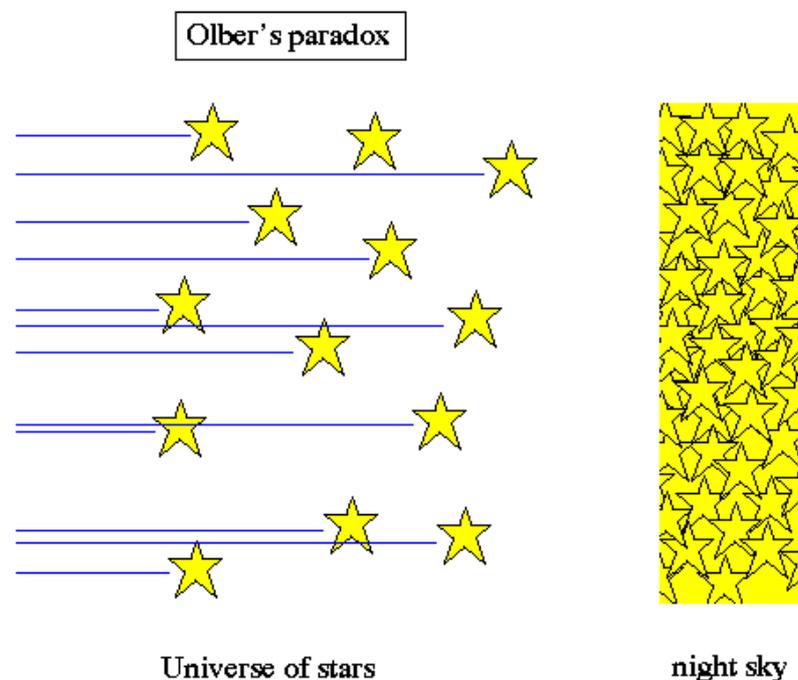
Heinrich W. M. Olbers  
1758-1840

Médico e Astrônomo

Descobridor de vários  
cometas e asteróides

# Paradoxo de Olbers

Se o Universo é infinito e existe "desde sempre", então em qualquer direção que se olha deveria ter uma estrela.  
=> O céu deveria estar tão brilhante quanto a superfície de uma estrela.



Já que o **céu** de noite é **escuro**, um dos dois (ou ambos), o tamanho ou a idade do Universo, deve ser **finito** (hoje sabemos que pelo menos a idade é finita).

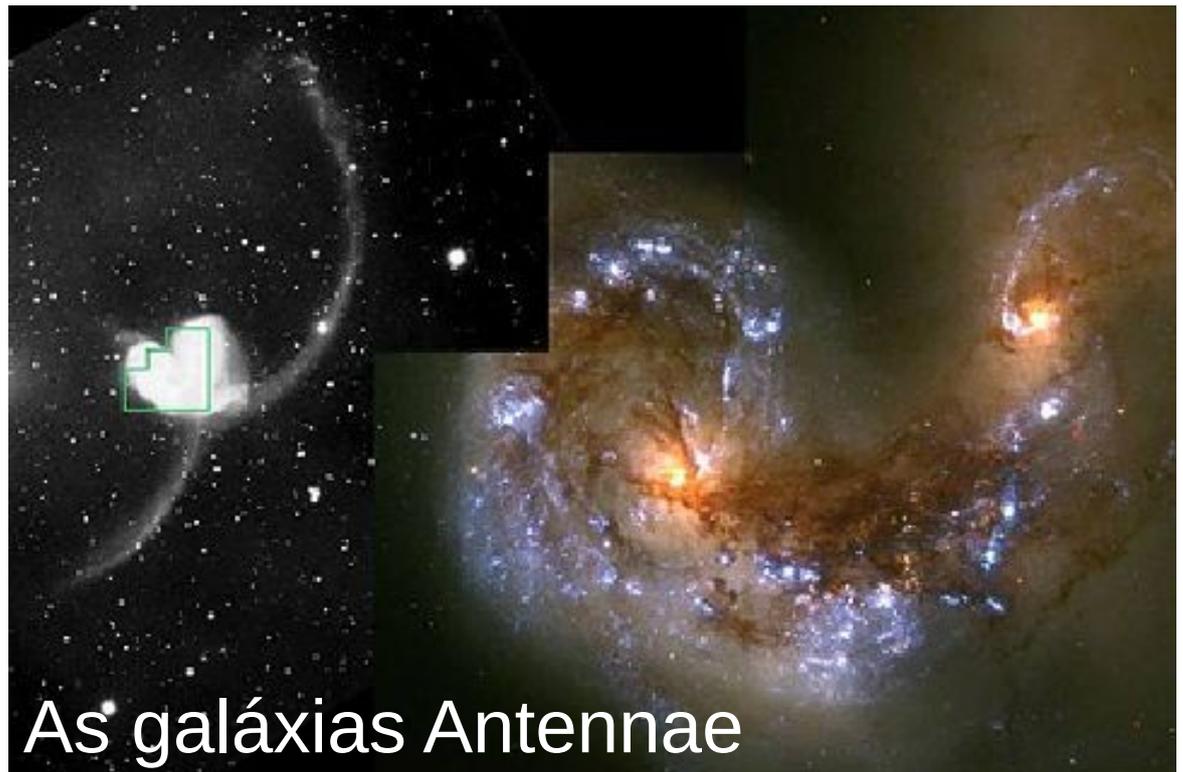
Thomas Digges (1546-1595), Kepler (1571-1630), Halley (1656-1742), Cheseaux (1718-1751), Edgar Allan Poe (1809-1849) e Lord Kelvin (1824-1907) já tinham chegado a esta conclusão.

# Evidências

Evidência para o fato, de que vivemos numa época, em que galáxias estão fusionando, ...

Estes processos estão sendo **observados**

- Aqui perto:
- A Via Láctea está engolindo as galáxias anãs na vizinhança
- A Via Láctea e a galáxia de Andrômeda estão se aproximando e colidirão em poucas bilhões de anos  
=> “Lactômeda”
- e na distância:
- p. e. nas galáxias Antennae

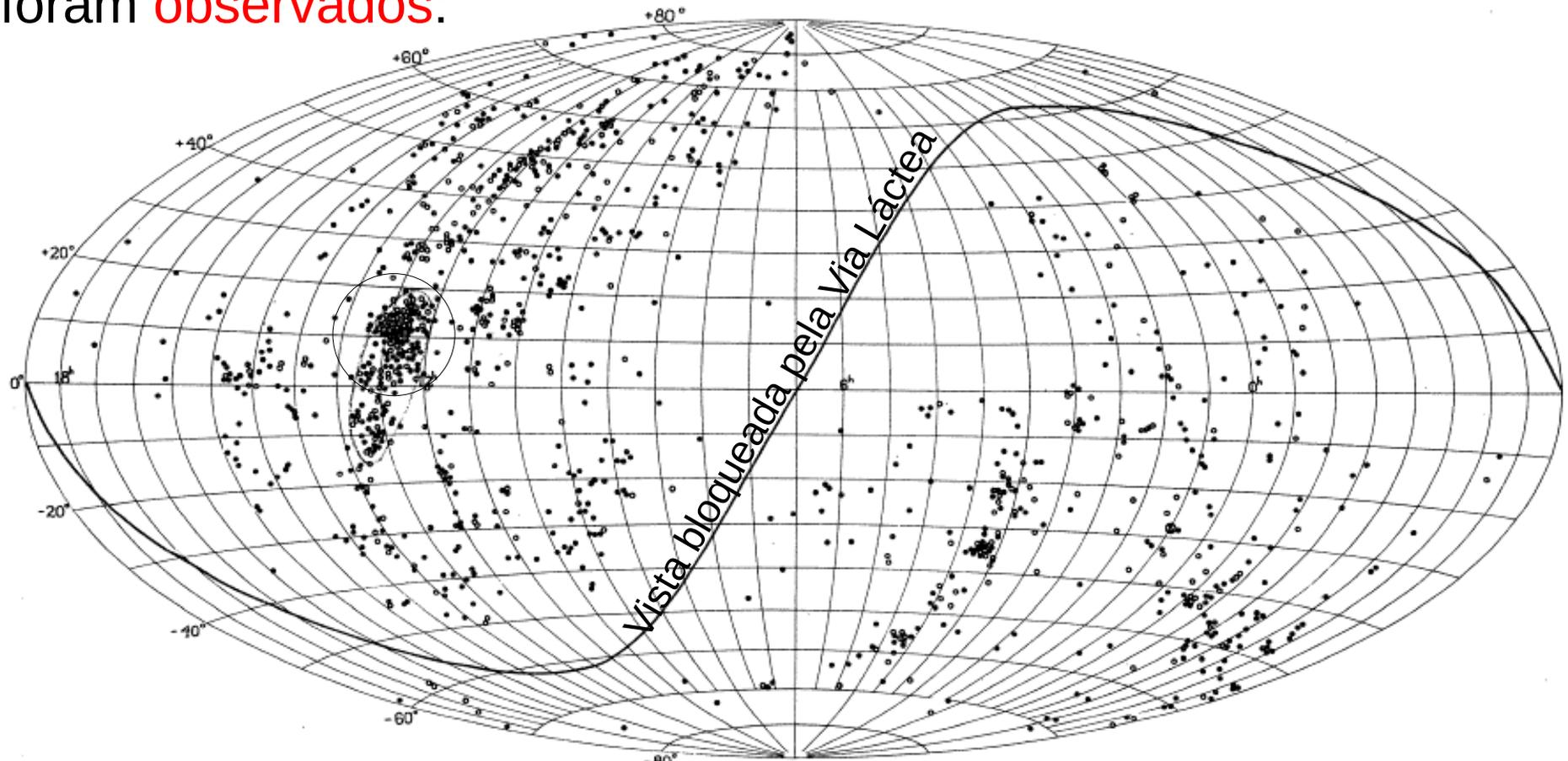


As galáxias Antennae

# Evidências

..., para a existência de Aglomerados de galáxias, ...

foram **observados**:

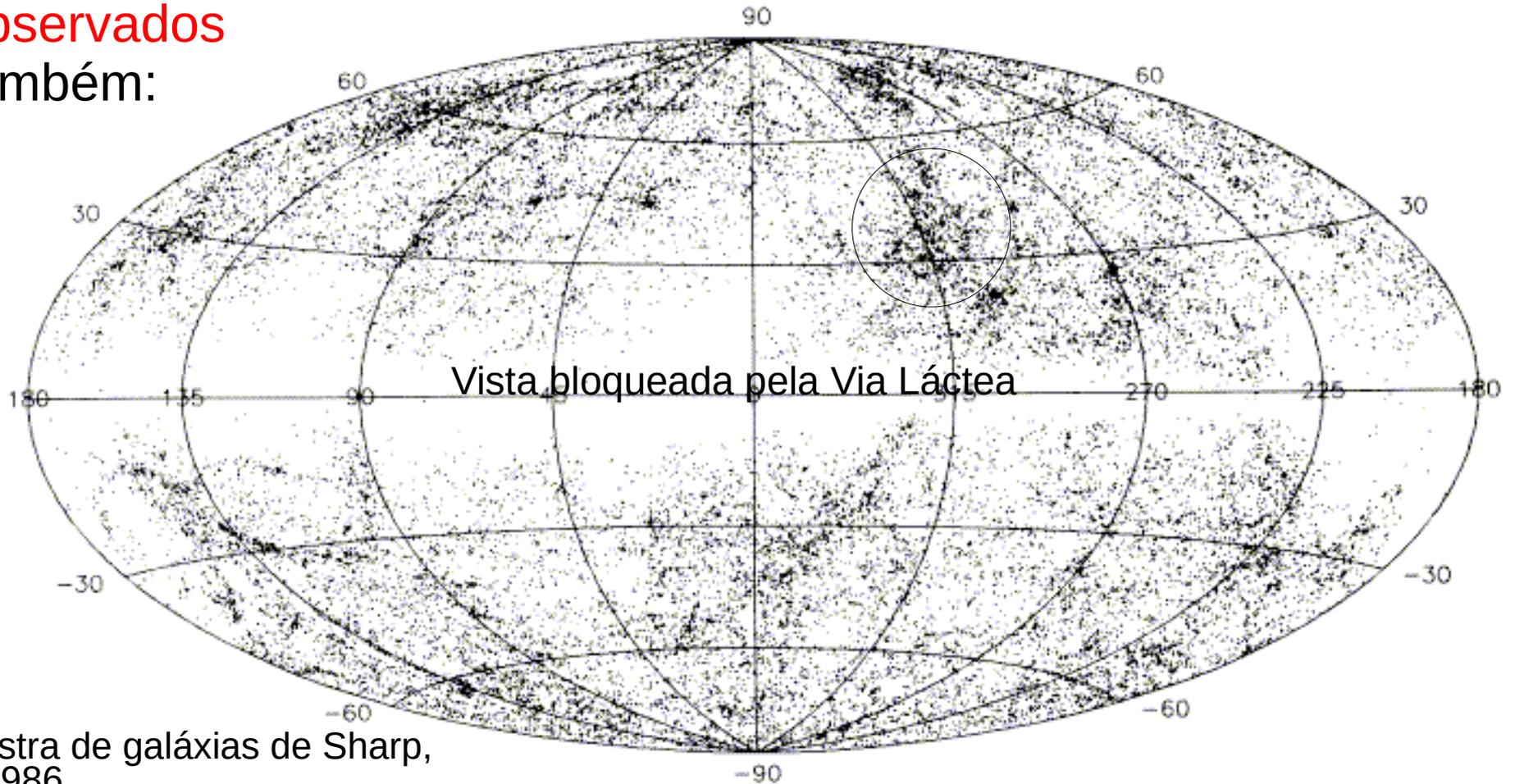


Amostra de galáxias de Shapley e Ames,  
1932

# Evidências

... ,e de Super-Aglomerados

observados  
também:



# Evidências

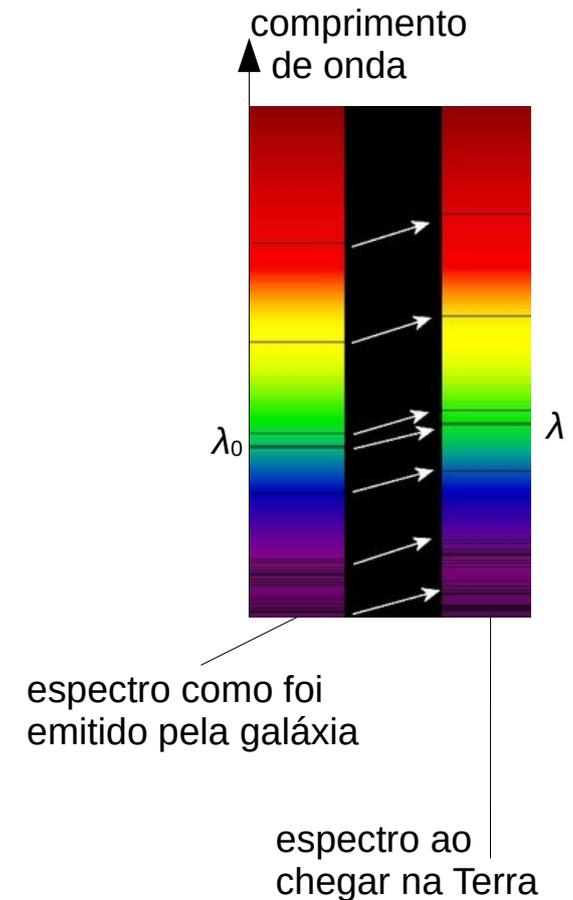
## O *Redshift*

Em 1914, V. M. **Slipher** descobriu, que os **espectros** da maioria das **galáxias** são **deslocados** para **comprimentos de onda maiores** que os de repouso.

Eles sofreram um ***redshift*** (“deslocamento para o vermelho”).

Interpretando este *redshift* como um **efeito Doppler**, isto significaria que estas galáxias estão se **afastando** de nós.

Uma exceção notável é a galáxia de Andrômeda, cujo espectro sofre um ***blueshift***, e que está se aproximando.



# Evidências

## O Redshift

Na verdade, **não** é exatamente um **efeito Doppler**. É a **expansão do Universo**, que “**estica**” os **comprimentos de onda** da luz que o permeia.

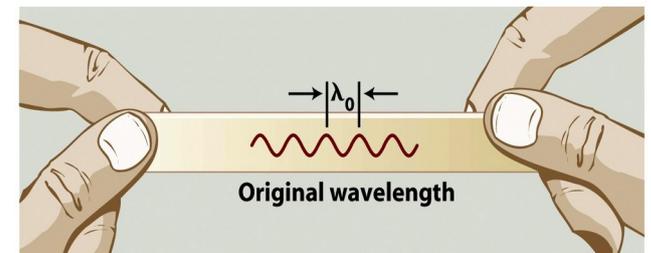
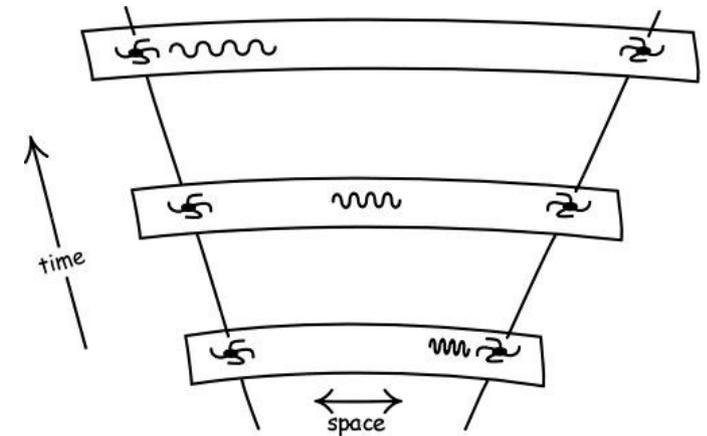
Os comprimentos de onda são esticados por um fator  $1+z$ , onde  $z$  é chamado de **redshift (cosmológico)**:

$$\lambda = (1+z) \cdot \lambda_0$$

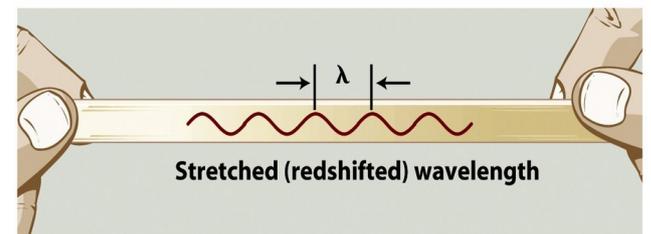
Para  $z$  pequenos ( $\ll 1$ ), uma galáxia com redshift  $z$  está se **afastando** com velocidade

$$v = c \cdot z$$

! As próprias **galáxias não** estão **expandindo**. Elas são **gravitacionalmente ligadas**. É o **espaço entre** as **galáxias** que está **expandindo**.



(a) A wave drawn on a rubber band ...



(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

# Evidências

Lei de Hubble-Lemaître (1929):

A **velocidade** de **recessão** de uma galáxia distante é **proporcional** à **distância** entre nós e a galáxia:

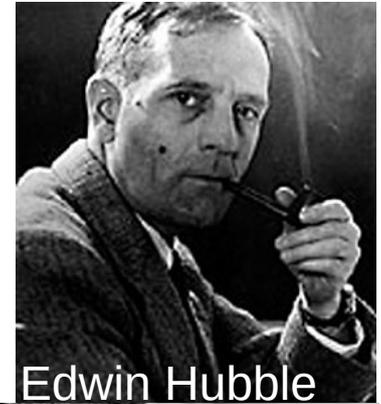
$$v = H_0 \cdot d$$

$H_0$ : constante de Hubble, uma medida para a **taxa da expansão** (inclinação da reta no gráfico).

O valor da constante de Hubble foi um assunto controverso por décadas, mas hoje as opiniões convergiram para um valor de

**$\sim 70 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$** ,

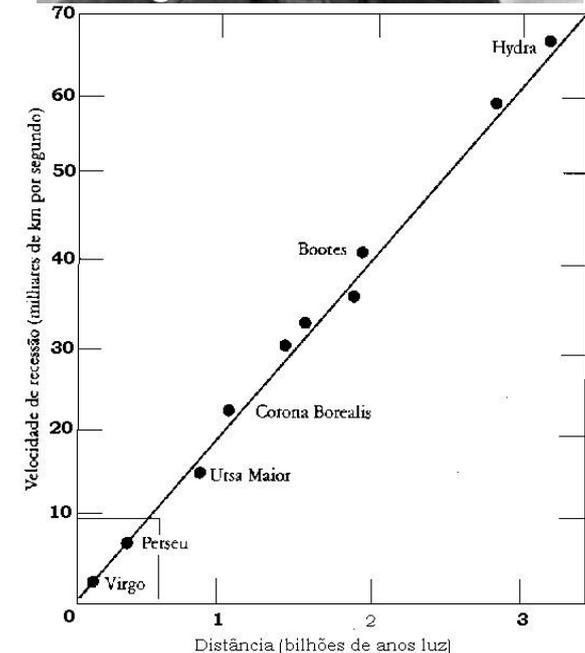
$1 \text{ pc}$  (“parsec”) =  $30.857 \cdot 10^{12} \text{ km}$   
=  $3.26156 \text{ anos-luz}$



Edwin Hubble



Georges Lemaître



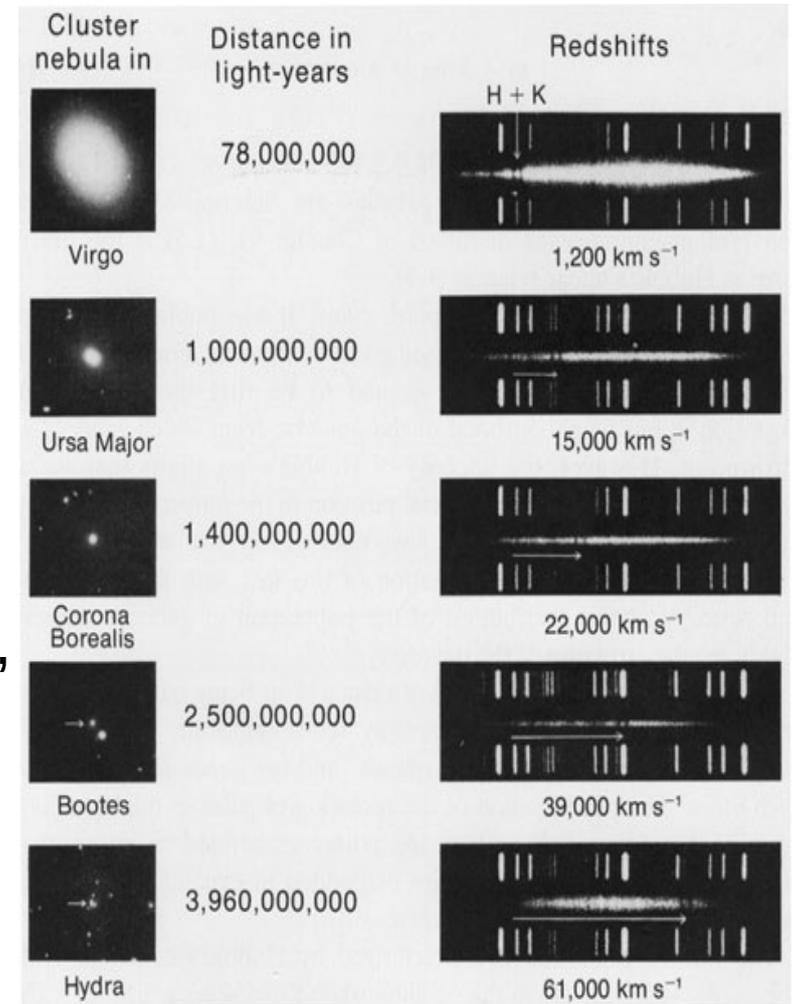
# Evidências

## O Redshift

Como a luz de galáxias distantes leva **tempo** para chegar em nós, vemos os objetos com **redshifts altos** como eles eram no **passado**, quando a **idade do Universo** era **menor**, e em **distâncias maiores**.

=> O **redshift** é uma medida para o quanto se está olhando pro passado, o “*lookback time*”, e pra **idade do Universo** na época da emissão da luz.

Quanto **maior** o **redshift**, tanto **menor** era a **idade do Universo** na época da emissão.



# Evidências

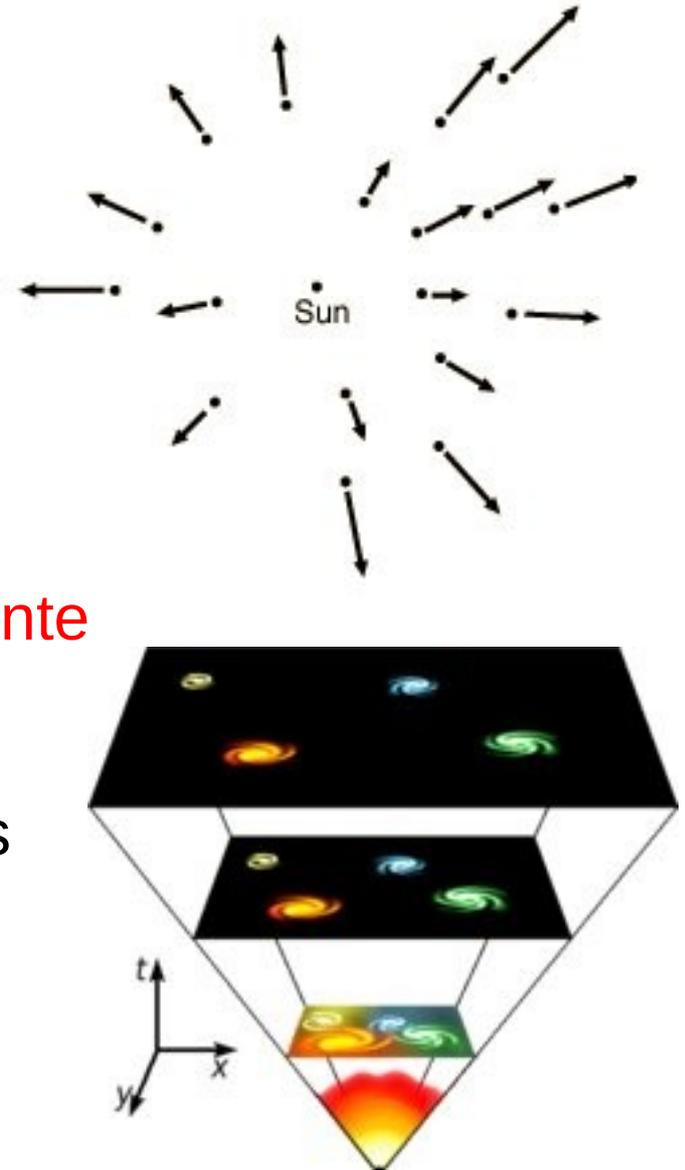
Lei de Hubble-Lemaître (1929):

Se as velocidades de recessão das galáxias são proporcionais às suas distâncias até nós, então estamos no **centro** da **expansão**?

Afinal, a Terra é o **centro** do **Universo**?

Não, num Universo **expandindo uniformemente** (homogenea- e isotropicamente), **qualquer ponto** “vê” os outros pontos se afastando com velocidades proporcionais às suas distâncias.

=> **Qualquer ponto** se “sente” o **centro** do **Universo**.



# Evidências

Lei de Hubble-Lemaître (1929):

Além de provar a expansão do Universo, a Lei de Hubble-Lemaître nós fornece um **método para medir a distância** de uma galáxia:

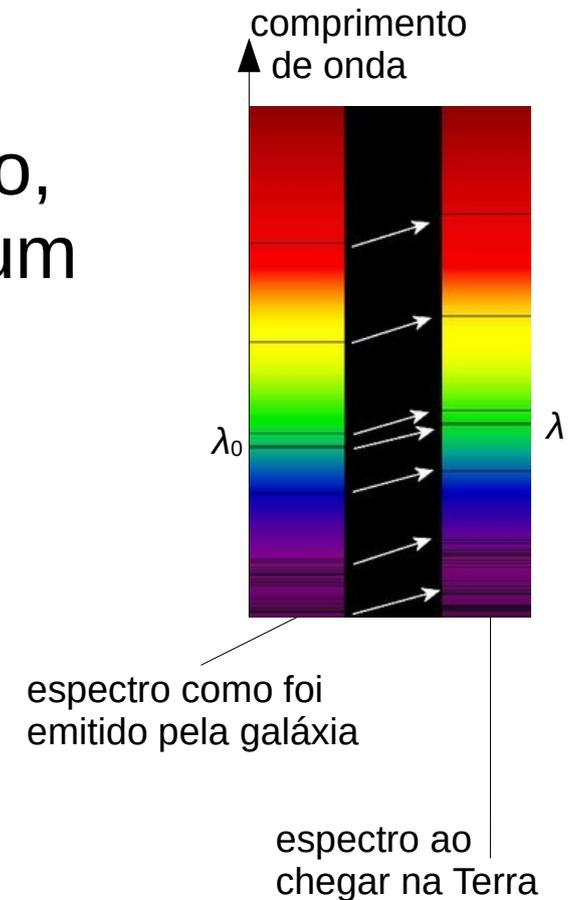
**medir  $z$**  através de uma linha espectral conhecida:

$$z = \lambda/\lambda_0 - 1$$

$$\Rightarrow \text{Distância } d = v/H_0 = c \cdot z/H_0$$

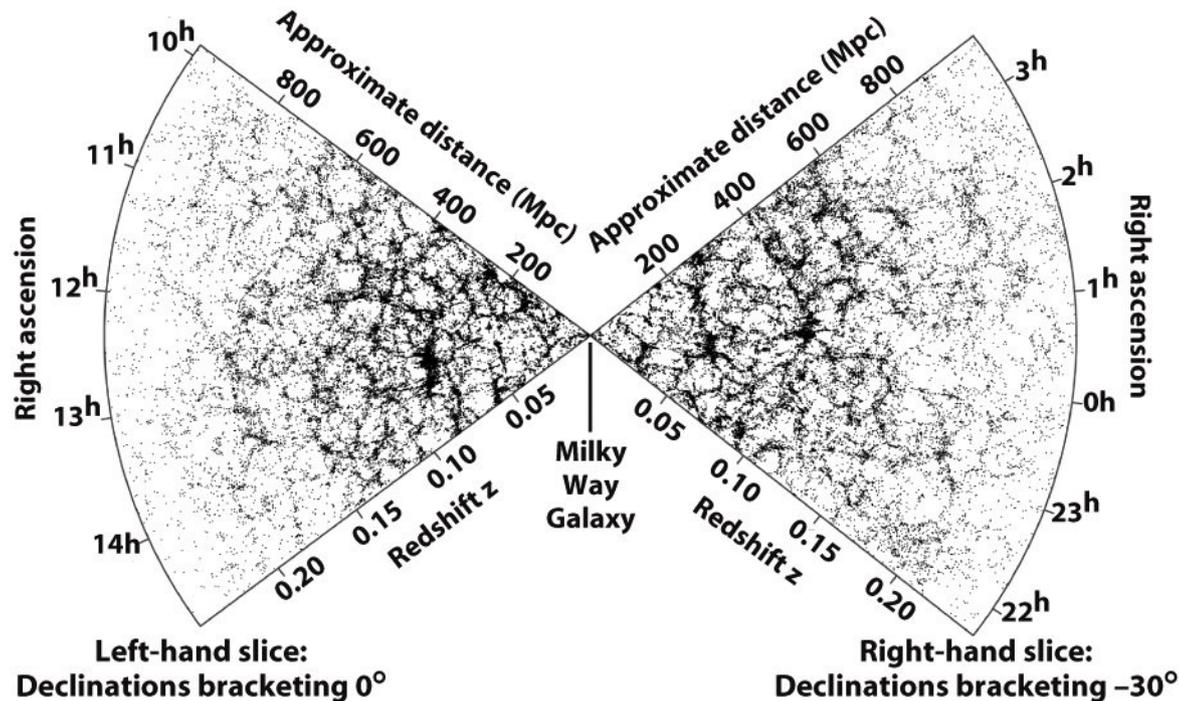
Isto foi feito para milhões de galáxias!

$\Rightarrow$  Amostras de *redshifts*

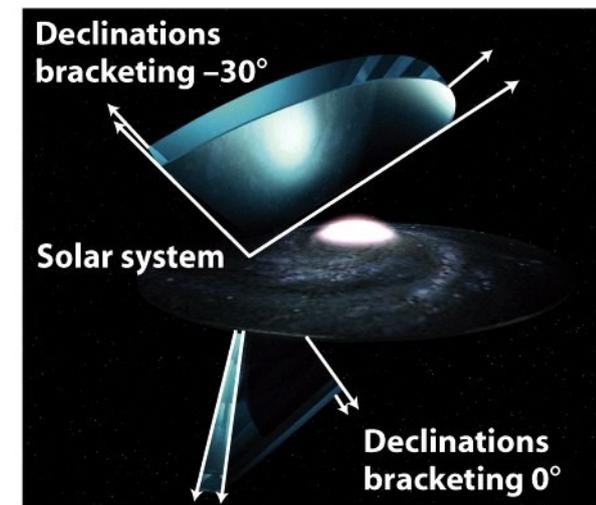


# Evidências

## Amostras de Redshifts



(a) The 2dF galaxy survey

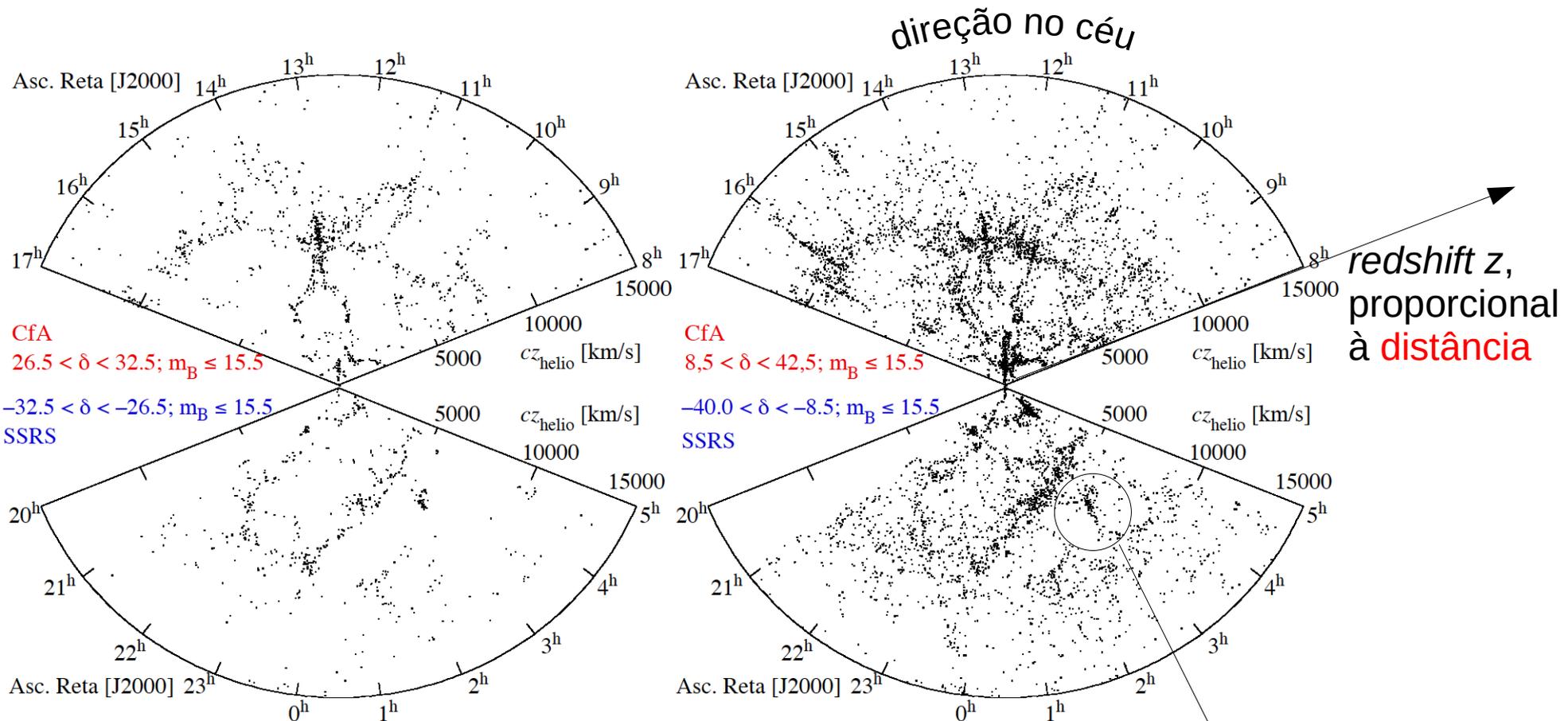


(b) Fields of view in the 2dF survey

Medindo os *redshifts* de **galáxias** numa “fatia” do espaço, e usando o *redshift* como **coordenada radial**, obtemos uma **amostra de redshifts**. Como o *redshift* é proporcional à distância, a amostra reflete a **distribuição espacial** das galáxias na fatia.

# Evidências

## Amostras de *redshifts*

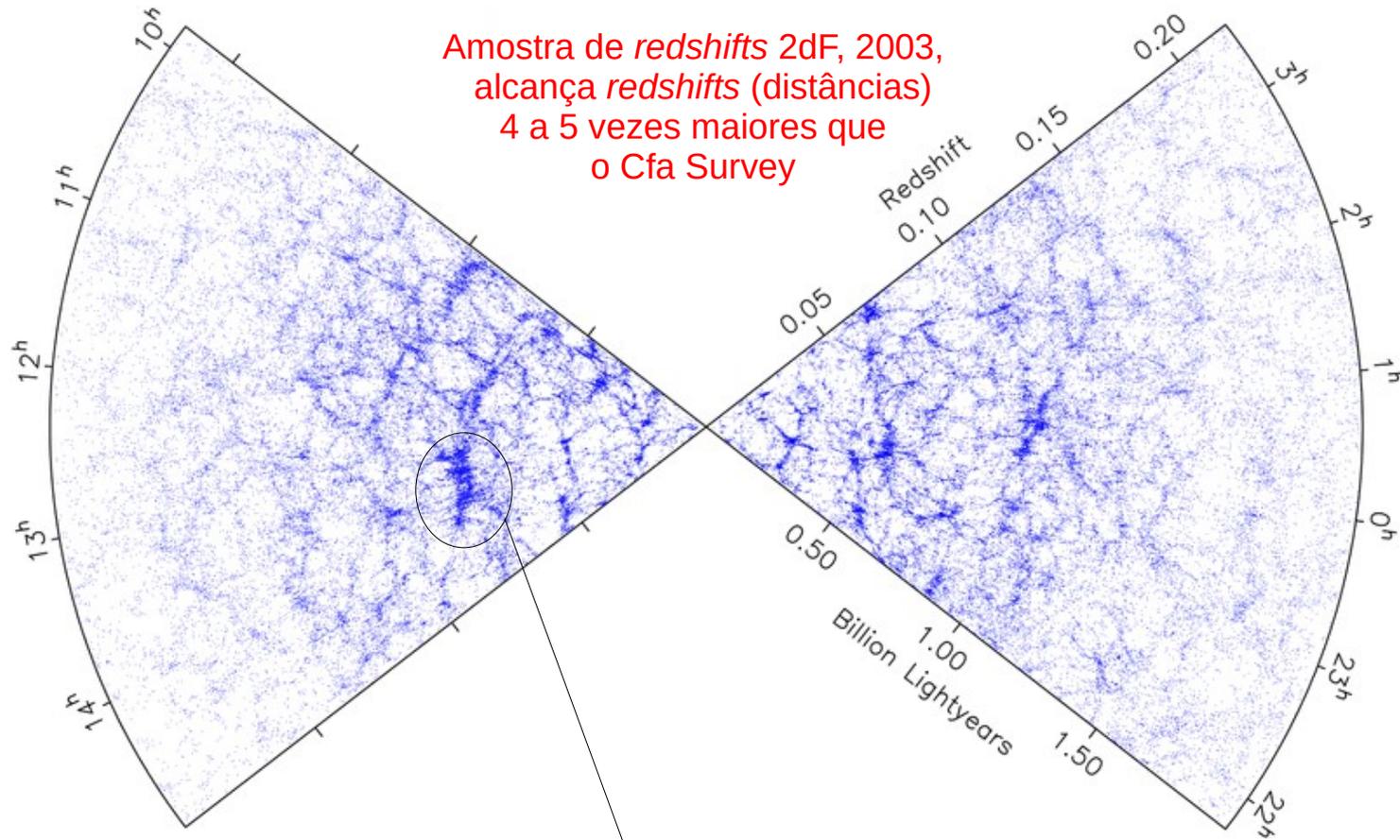


Cfa Survey, 1985

Nas amostras de *redshifts*, também se vê os **Aglomerados** de galáxias, ...

# Evidências

## Amostras de *redshifts*



# Evidências

## Amostras de *redshifts*

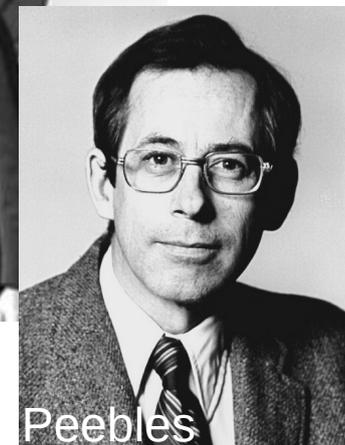
Resultados: galáxias agrupados em:

- **Grupos**:  $\leq 50$  galáxias, Raios  $\sim 1$  Mpc  
Exemplo: Grupo Local
- **Aglomerados**: 50 a 1000 galáxias, Raios = 1 a 5 Mpc  
Maiores estruturas gravitacionalmente ligadas
- **Super-aglomerados**: “Aglomerados de aglomerados”:  
Raios: dezenas de Mpc

Em escalas  $\geq 100$  Mpc: Universo parece **homogêneo**

# Radiação Cósmica de Fundo

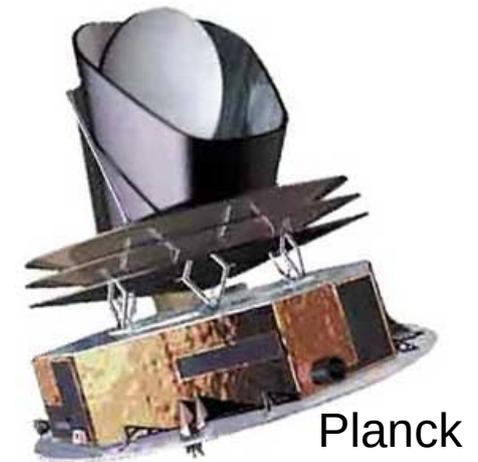
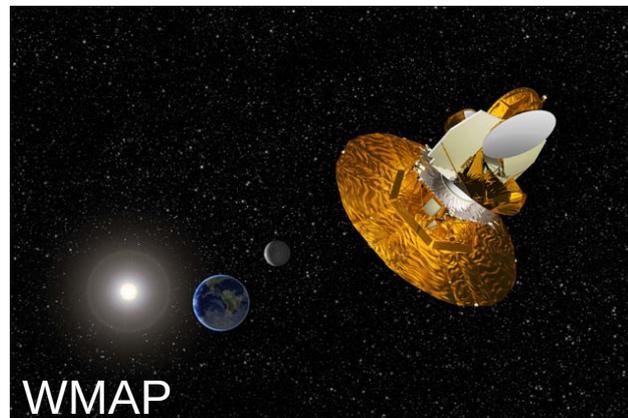
- **Emitida** na época da “**re-combinação**” (formação de átomos a partir de núcleos e elétrons), quando o Universo tinha ~**378 000 anos** de idade
- **Prevista** por Гамов (Gamov), Alpher e Hermann em **1948**
- **Descoberta** por acaso por Penzias & Wilson (**1965**)
- Explicada por Burke, Dicke e Peebles no mesmo ano  
=> 🏆 Prêmio Nobel para Penzias & Wilson (1978)  
🏆 E em 2019, Peebles o recebeu por contribuições na cosmologia teórica



# Radiação Cósmica de Fundo

Estudada pelos satélites

- **COBE**: lançado em 1989, resultados 1992
- **WMAP**: lançado em 2001, resultados 2003/2006
- **Planck**: lançado em 2009, mediu até 10/2013, mediu polarização também



# Radiação C3smica de Fundo

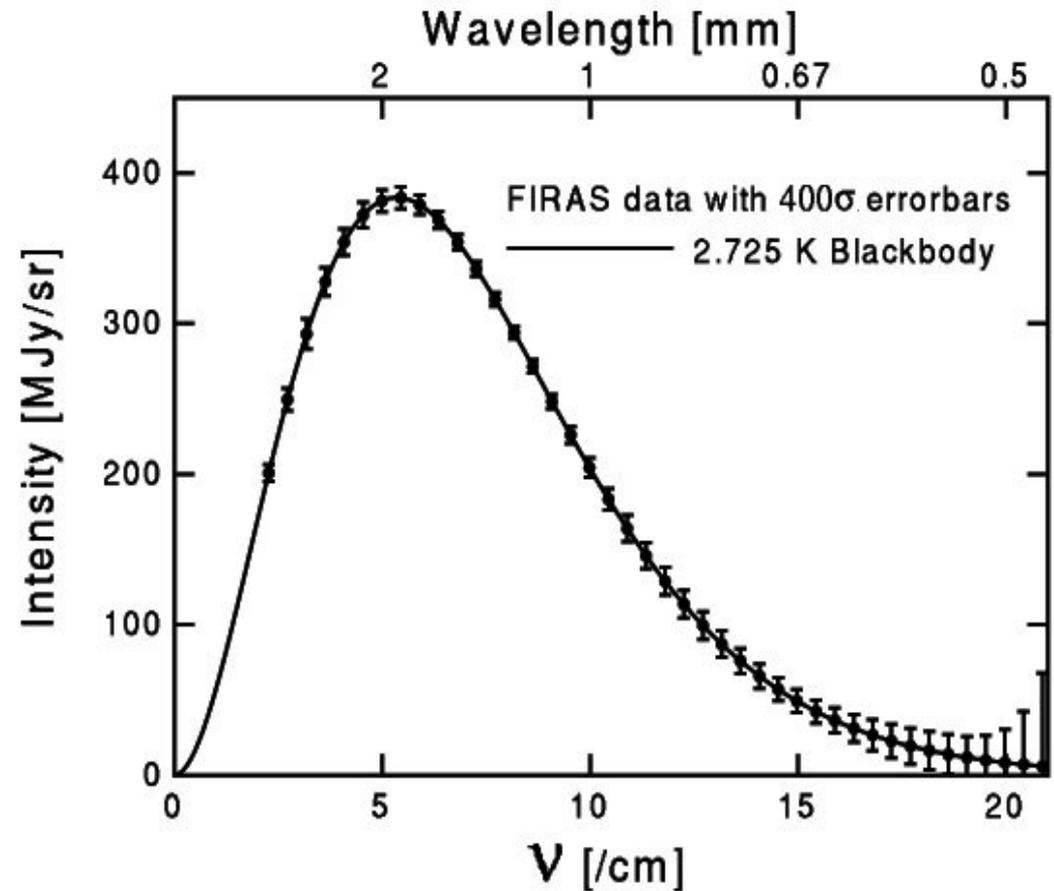
Espectro de Corpo Negro:

Na emiss3o (**378 000 anos**):  
~**3000 K**

desde ent3o:  
comprimentos de onda  
sofreram um *redshift*  
(foram “esticados”)  
por um fator ~1090  
pela **expans3o do Universo**.

=> hoje: **2.725 K**

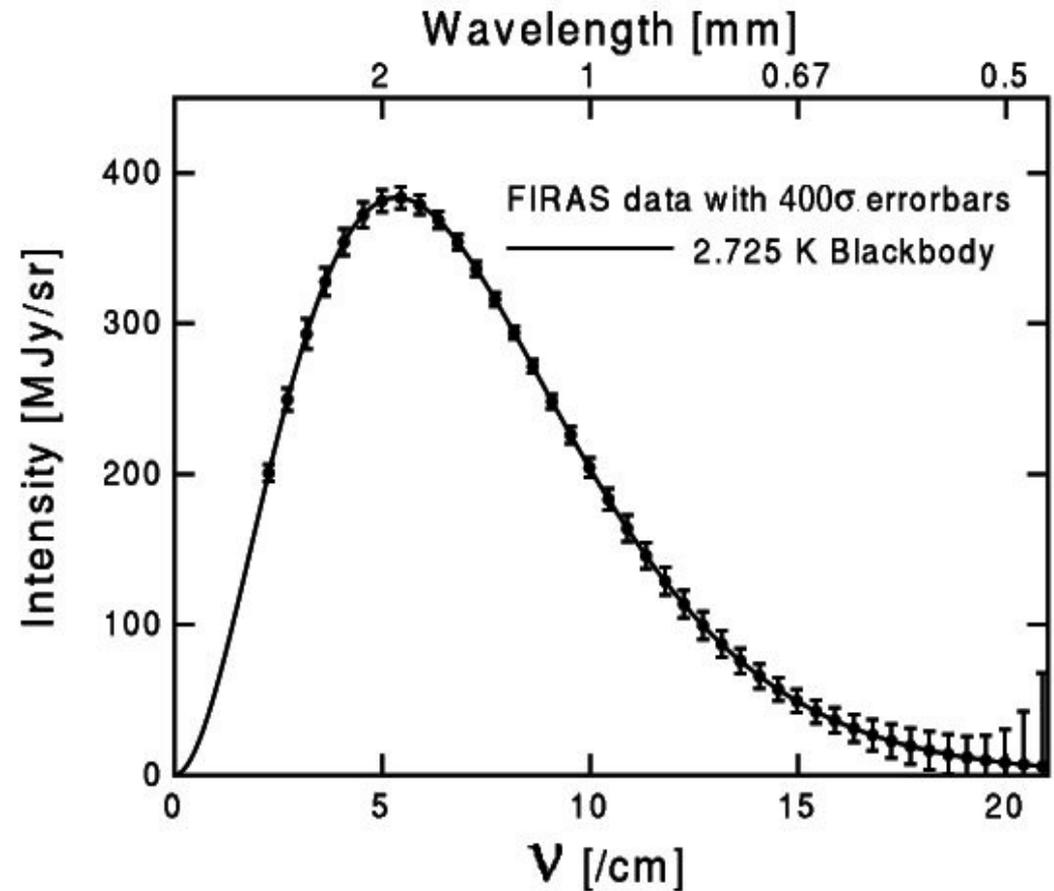
=> **Prova, que a “Re-combina3o” aconteceu, ou seja, uma evid4ncia experimental d(e uma 4poca logo ap3s )o *Big Bang*, e mais uma prova pra expans3o do Universo.**



# Radiação Cósmica de Fundo

Espectro de Corpo Negro:

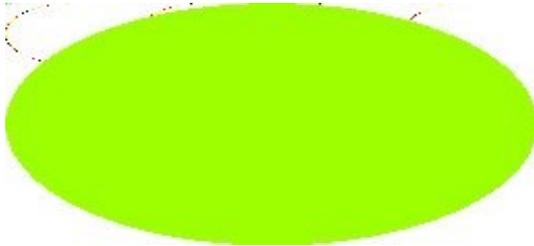
A descoberta do espectro quase perfeito de Corpo Negro e da anisotropia ( $\Rightarrow$  jájá) da Radiação Cósmica de Fundo rendeu o prêmio Nobel de física de 2006 aos responsáveis pelo projeto COBE, John C. Mather e George F. Smoot 



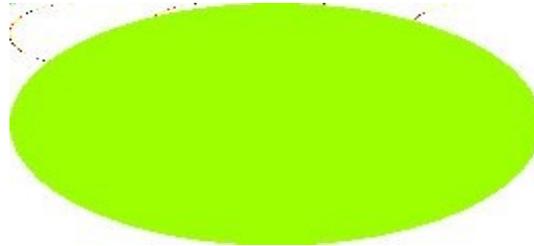
# Radiação Cósmica de Fundo

Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE



WMAP

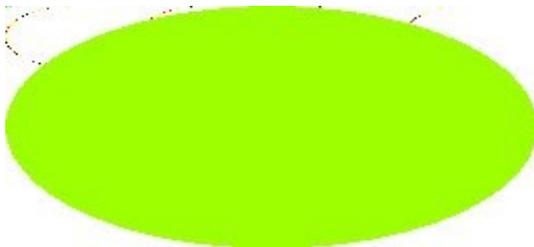


- Extremamente **homogênea**:  
Azul 0 K  
Vermelho 4 K

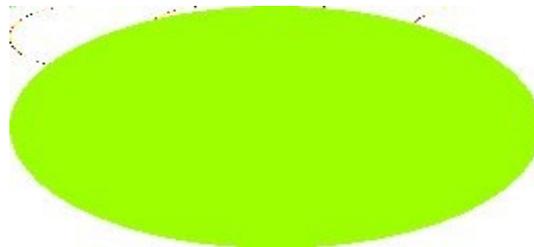
# Radiação Cós mica de Fundo

## Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

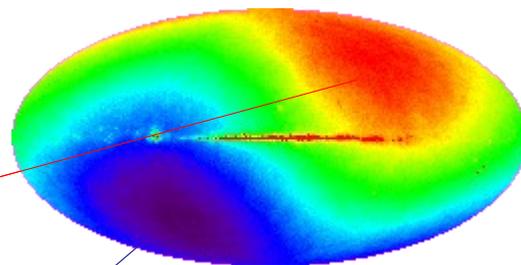
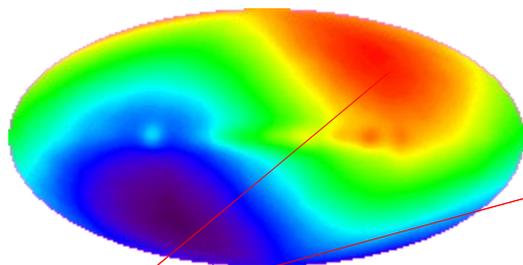
Dados COBE



WMAP



- Extremamente **homogênea**:  
Azul 0 K  
Vermelho 4 K



Numa escala mais fina:  
Azul 2.721 K  
Vermelho 2.729 K  
aparece o momento dipolo  
devido ao **movimento do Sol**

O Sol está se movimentando **nesta direção** (direção constelação do Leão) em relação ao referencial da Radiação Cós mica

=> efeito Doppler: detectamos a radiação com **comprimentos de onda mais curtos**

=> medimos uma **temperatura** da radiação **mais alta**

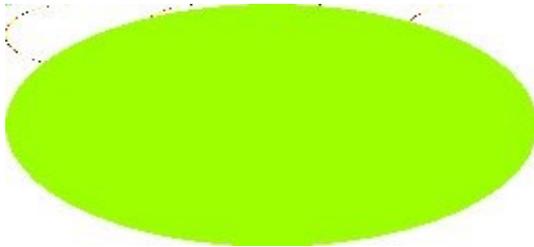
O Sol está indo pra **direção oposta** a esta direção (Aquário)

=> **comprimentos de onda mais compridos** => **temperatura mais baixa**

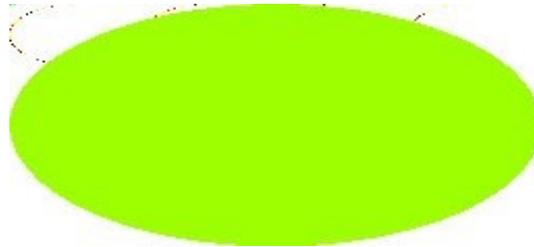
# Radiação Cósmica de Fundo

## Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

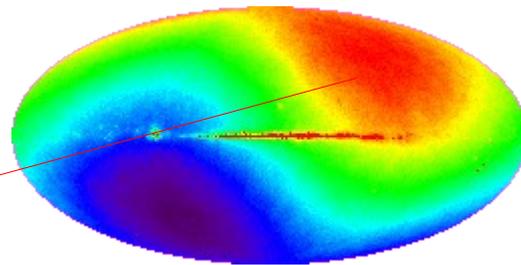
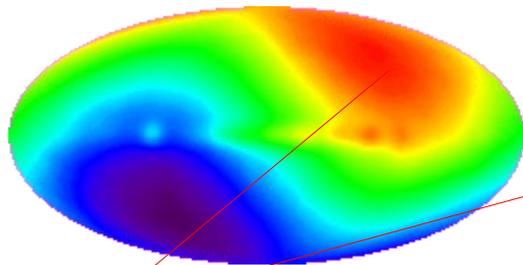
Dados COBE



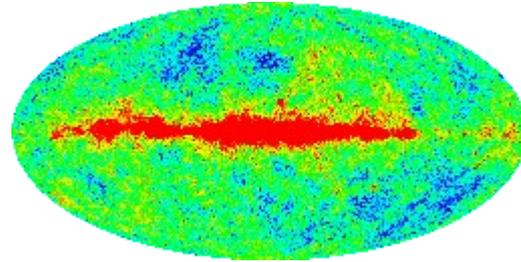
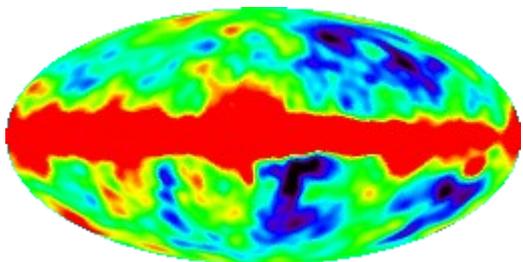
WMAP



- Extremamente **homogênea**:  
Azul 0 K  
Vermelho 4 K



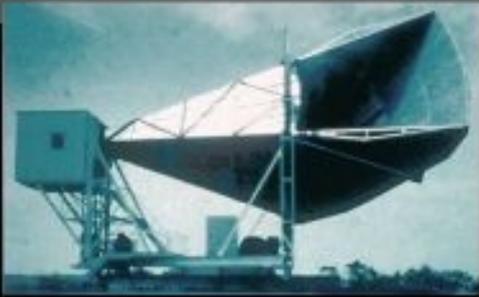
Numa escala mais fina:  
Azul 2.721 K  
Vermelho 2.729 K  
aparece o momento dipolo  
devido ao **movimento do Sol**



Depois de subtraído o efeito do movimento do Sol:  
As regiões azuis são **0.0002 K** mais frias que as vermelhas.  
A região mais quente no meio é a contribuição da **Via Láctea**

# Radiação Cósmica de Fundo

1965



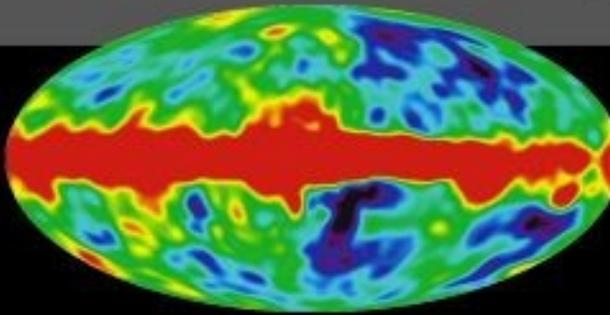
Penzias and  
Wilson



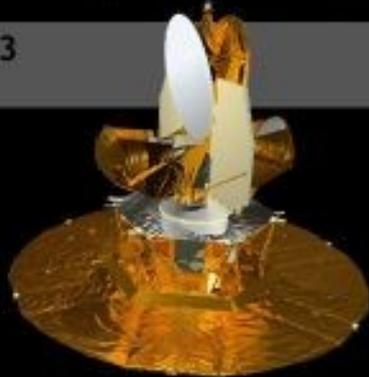
1992



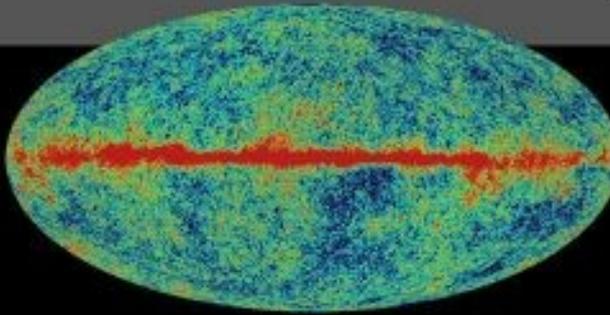
COBE



2003



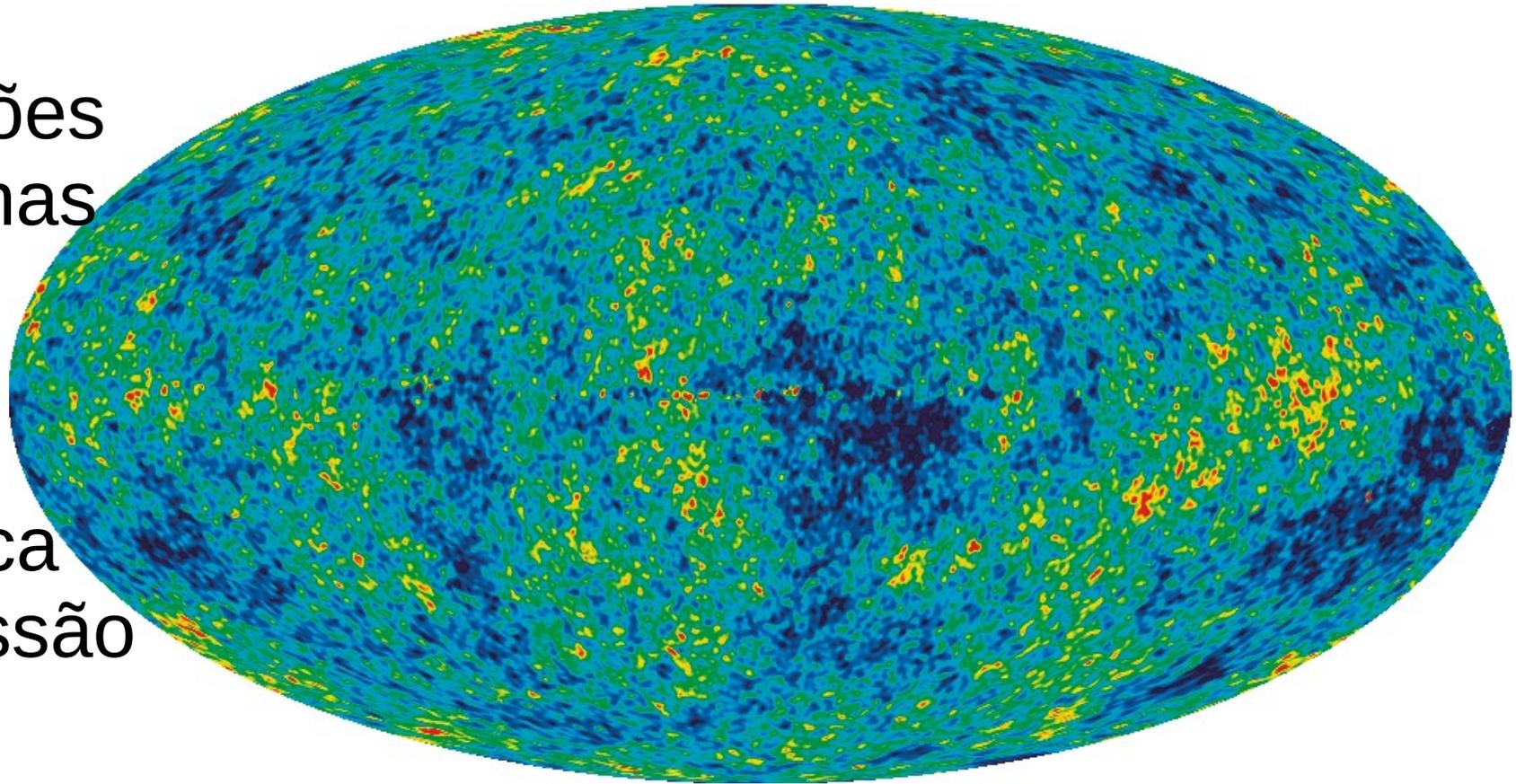
WMAP



# Radiação Cós mica de Fundo

Após subtraída a contribuição da Via Láctea:

As regiões  
vermelhas  
eram  
**mais**  
**densas**  
na época  
da emissão

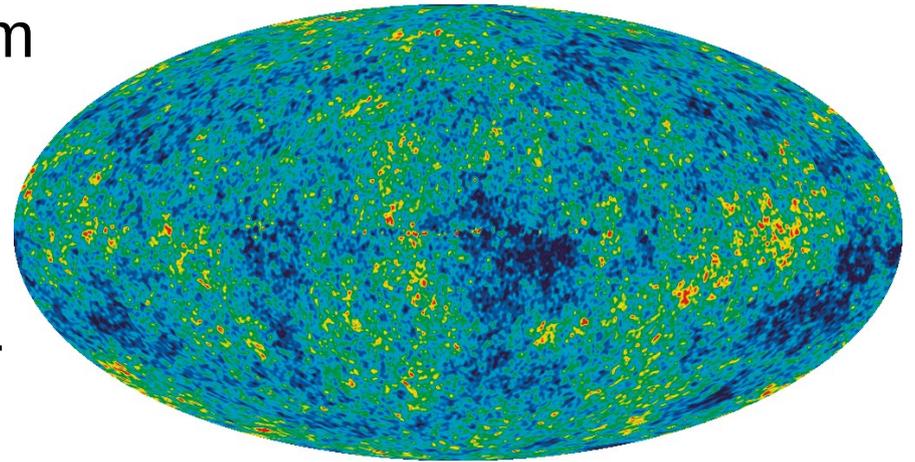


=> Mapa da **densidade** da **matéria visível** do Universo 378 000 anos após o *Big Bang*

# Radiação Cósmica de Fundo

As partes **vermelhas** são da ordem de **uma parte em 100 000 mais densas** que as partes verdes.

Pode se calcular como estas regiões mais densas deveriam ter evoluído até hoje, por colapso gravitacional.



=> As sobredensidades da matéria visível **não** eram **suficientes** para **formar** as **estruturas observadas hoje** (**galáxias, Aglomerados de galáxias, ...**).

Elas deviam ter sido uns 1000 vezes maiores.

=> Deve ter tido **mais matéria** que a **visível**.

=> **Evidência para a Matéria Escura.**

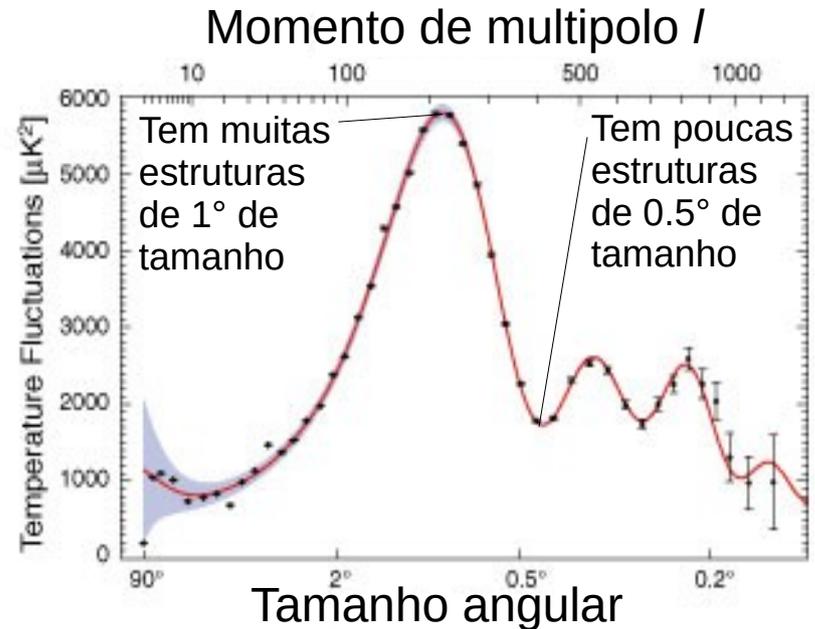
As **galáxias** e **Aglomerados** de galáxias se **formaram** nos **poços** de **potencial gravitacional** da **Matéria Escura**.

# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular da Radiação Cósmica de Fundo

Distribuição dos **tamanhos** angulares das **estruturas** na Radiação de Fundo, ou seja, das estruturas ~378 000 anos depois do *Big Bang*.

Ela reflete padrões nas variações de **pressão** e **densidade** (ondas de som) **propagando-se** pela “sopa” de núcleos, elétrons e fótons na época da “re-combinação”, e pode ser estudada pela física de gases quentes.



# Radiação C3smica de Fundo

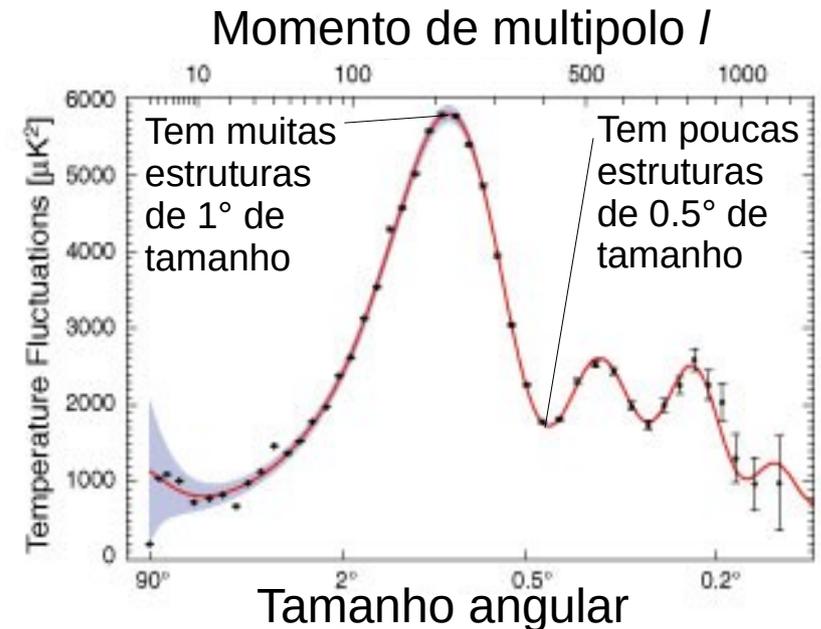
## Espectro Angular da Radia33o de Fundo

C3culos complicados mostram, que a **posi33o do primeiro pico**, a  $1^\circ$ , 3 uma medida para a **densidade total** (mat3ria vis3vel + Mat3ria Escura + Energia Escura) no Universo.

=> **A densidade total 3 igual 3 densidade cr3tica.**

Como j3 t3nhamos determinado a densidade da mat3ria vis3vel + Escura, ~31 % da densidade cr3tica, podemos dizer que a **densidade da Energia Escura** 3 ~69 % da densidade cr3tica.

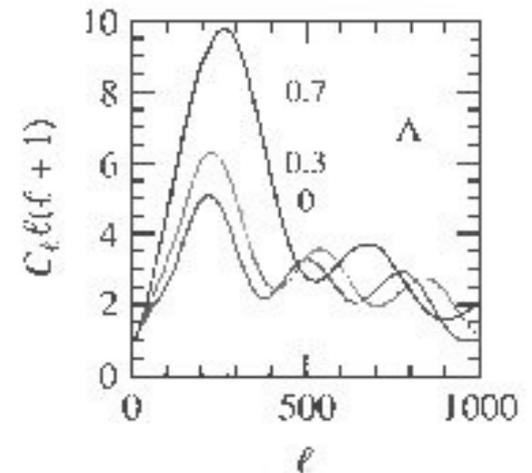
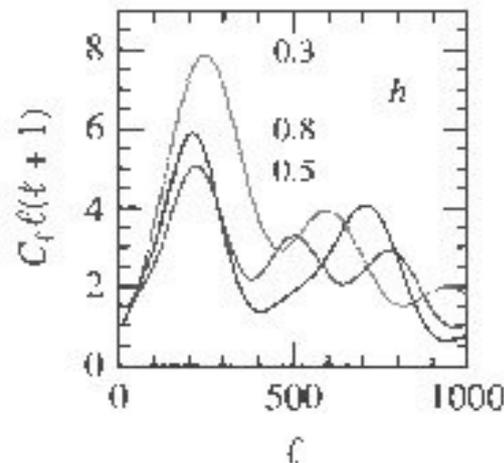
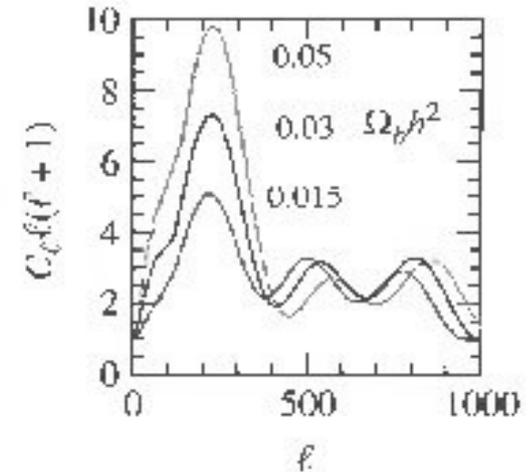
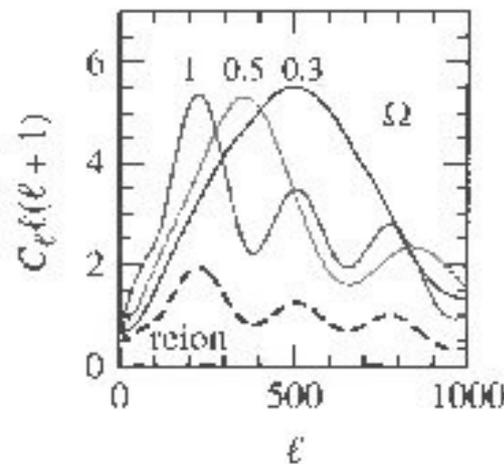
=> **Evid3ncia (indireta) para a Energia Escura.**



# Radiação C3smica de Fundo

## Espectro Angular da Radia33o C3smica de Fundo

Os mesmos c3culos complicados conseguem prever a **forma exata** (posi33es e alturas dos demais picos) do **espectro angular** para diferentes **modelos cosmol3gicos**.



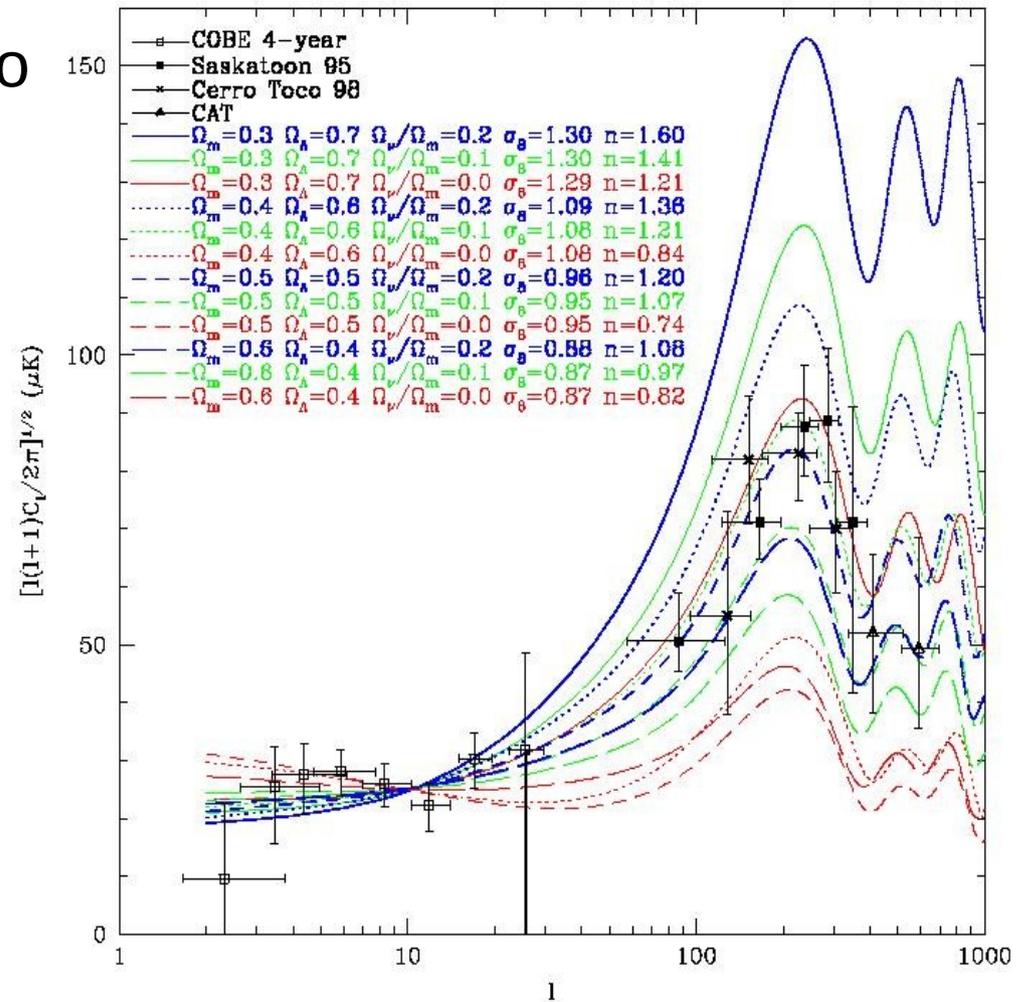
Variando v3rios par3metros do modelo

# Radiação Cós mica de Fundo

## Espectro Angular da Radiação Cós mica de Fundo

O espectro angular da Radiação Cós mica de Fundo **bate exatamente** com o espectro previsto para o **modelo  $\Lambda$ CDM**: Matéria visível compõe 5 %, Matéria Escura, 26 % e Energia Escura, 69 % da densidade crítica.

=> **Prova para todo o modelo  $\Lambda$ CDM.**



# Outras Evidências para a Matéria Escura

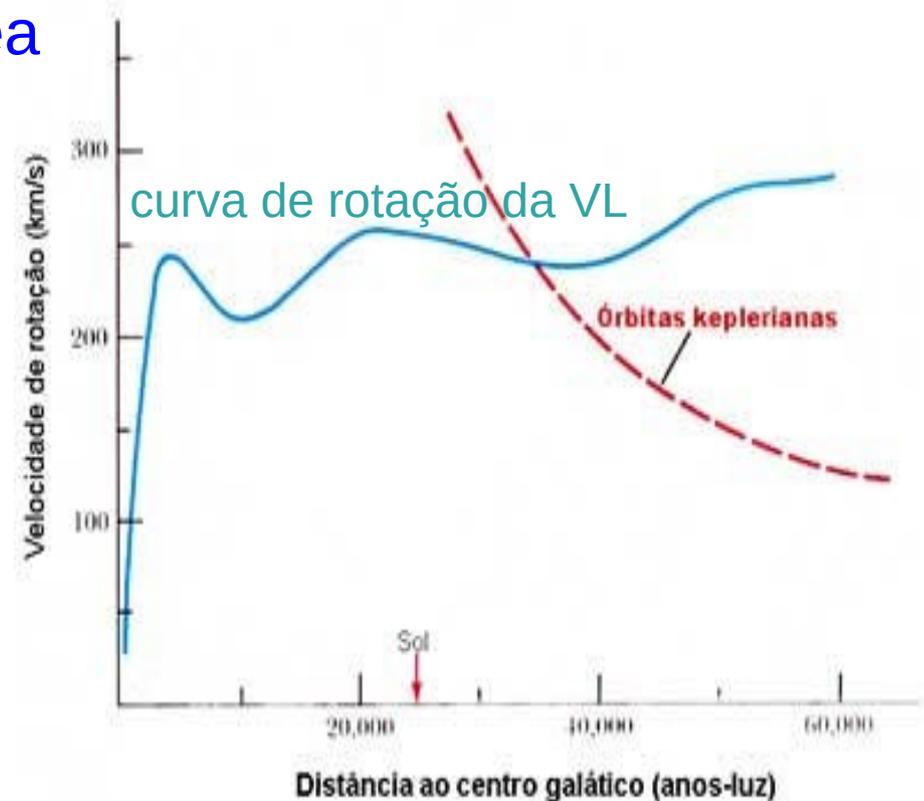
## Dinâmica de estrelas da Via Láctea

As **estrelas** da Via Láctea, p. e. o Sol, se **movimentam** em **órbitas circulares** em torno do **centro Galáctico**.

A **velocidade de rotação** de uma estrela depende da **massa** da Via Láctea contida no espaço **no interior da sua órbita**.

As **velocidades medidas** indicam que tem **mais massa** na Via Láctea, do que aquela devida aos **componentes observados** (estrelas, gás interestelar, ...).

=> **Outra evidência para a Matéria Escura.**



# Outras Evidências para a Matéria Escura

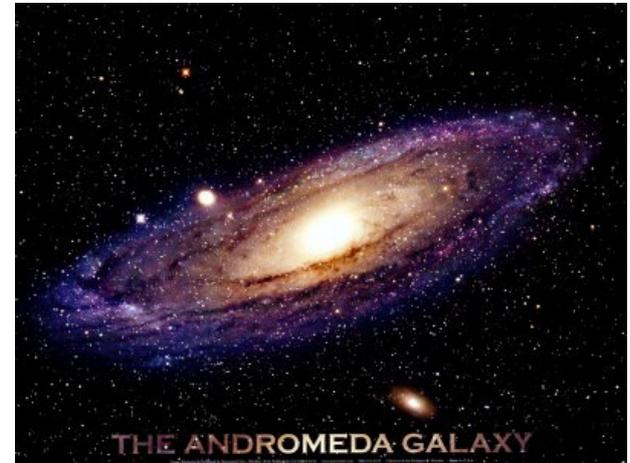
## Dinâmica de estrelas em galáxias discos

O mesmo se observa em outras galáxias discos, p. e. a galáxia de Andrômeda.

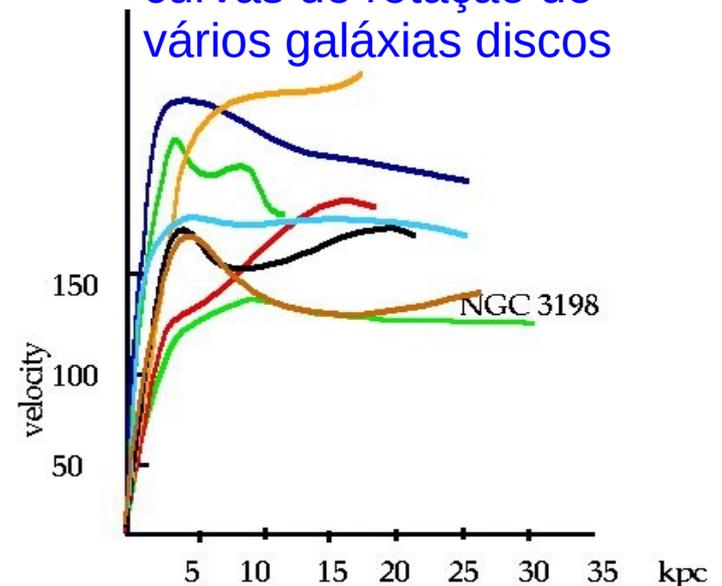
O movimento inesperadamente rápida das estrelas é observado também em **galáxias de outros tipos**, i. e. elípticas, irregulares, etc.

=> Todas as galáxias têm mais massa do que a massa observada.

=> **Matéria Escura.**



curvas de rotação de vários galáxias discos



# Outras Evidências para a Matéria Escura

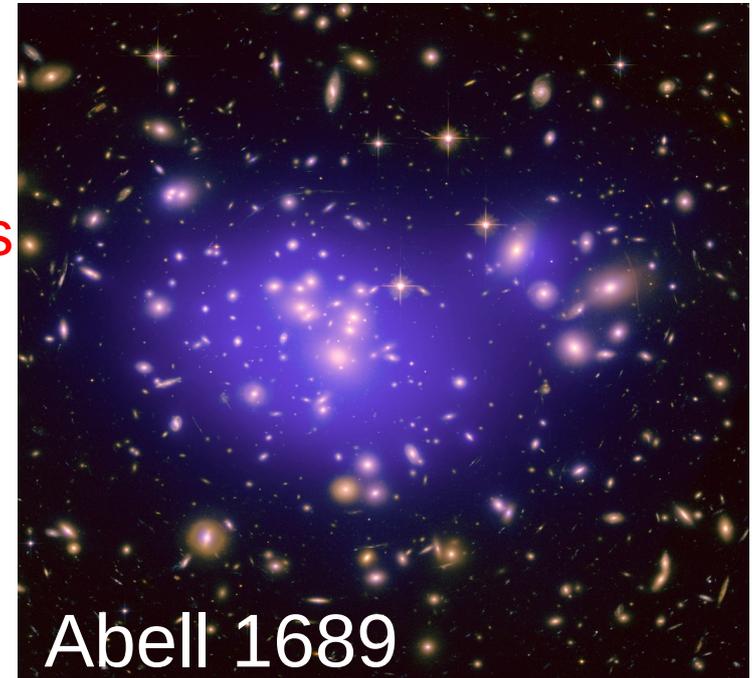
Massas de Aglomerados de galáxias

Dinâmica das galáxias

As **galáxias** em um **Aglomerado** se **movimentam** também, com **velocidades** que podem ser **medidas** através dos seus **espectros**, pelo **efeito Doppler**.

A **dispersão de velocidades** depende da **massa do Aglomerado**.

=> Massas de  $10^{14}$  a  $10^{15} M_{\odot}$ ,  
onde  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$  kg = massa solar



# Outras Evidências para a Matéria Escura

Massas de Aglomerados de galáxias

Radiação do gás inter-aglomerado

Além das galáxias, os Aglomerados contêm **gás**, de **massa maior** do que as galáxias, que irradia em **raios X** devido à sua **temperatura**.

A pressão deste gás está em equilíbrio com a **gravitação** do aglomerado.

Medindo a **radiação** em raios X, pode se **calcular** a **temperatura** e a **pressão** do gás inter-aglomerado e, então, a **massa** do Aglomerado.

=> Massas de  $10^{14}$  a  $10^{15} M_{\odot}$



Aglomerado Abell 521 em raios X

# Outras Evidências para a Matéria Escura

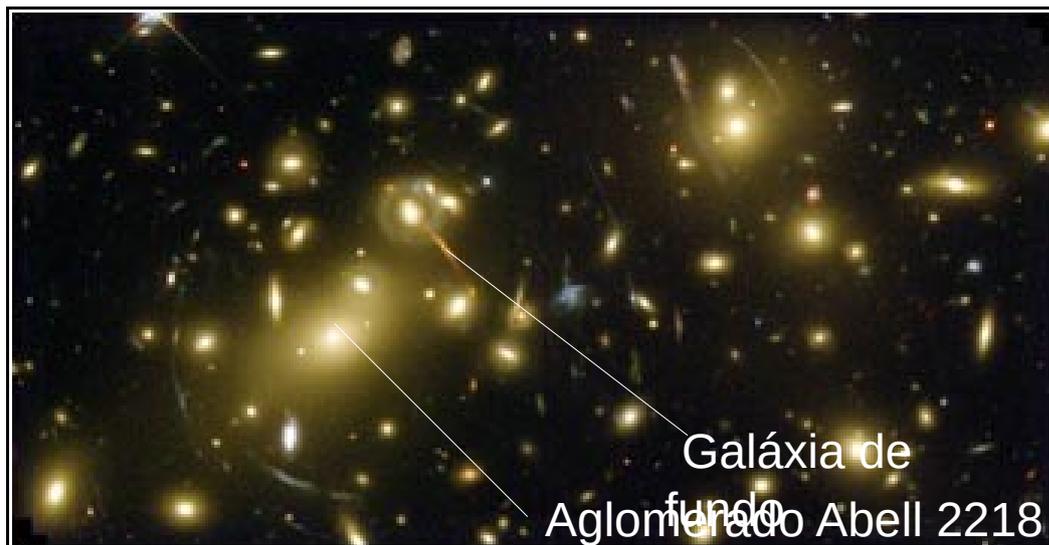
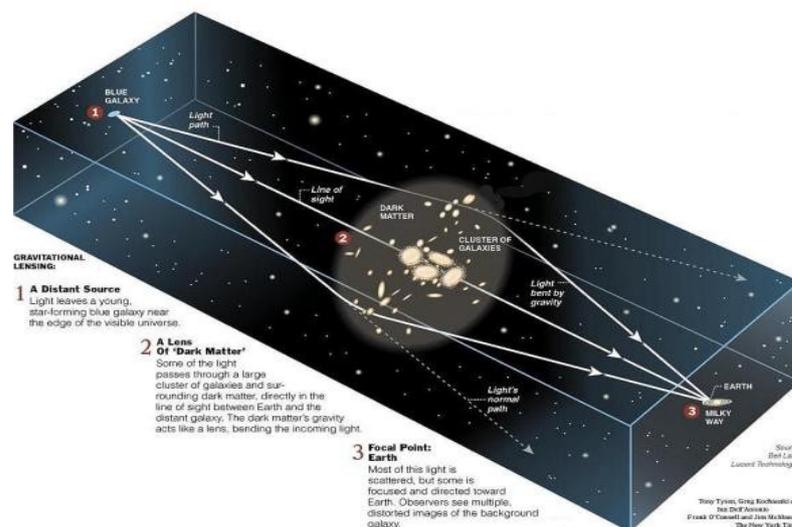
Massas de Aglomerados de galáxias

Efeito de Lentes gravitacionais

**Massas altas**, como Aglomerados de galáxias, **desviam a luz**, e **distorcem a imagem** de **objetos atrás** da massa, p. e. **galáxias mais distantes**.

Medindo a **distorção** das imagens destas galáxias “de fundo”, pode se determinar a **massa** do objeto **na frente** (o Aglomerado).

=> Massas de  $10^{14}$  a  $10^{15} M_{\odot}$



# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Massas de Aglomerados de galáxias

Os métodos **concordam**:  $M_{\text{Aglomerados}} = 10^{14} \text{ a } 10^{15} M_{\odot}$

Porém:

A soma das massas das estrelas nas galáxias é **~50 vezes menor**.

A soma das massas das galáxias mais o gás inter-aglomerado ainda é **5 a 6 vezes menor**.

=> Aglomerados contêm massa além da matéria conhecida (bariônica).

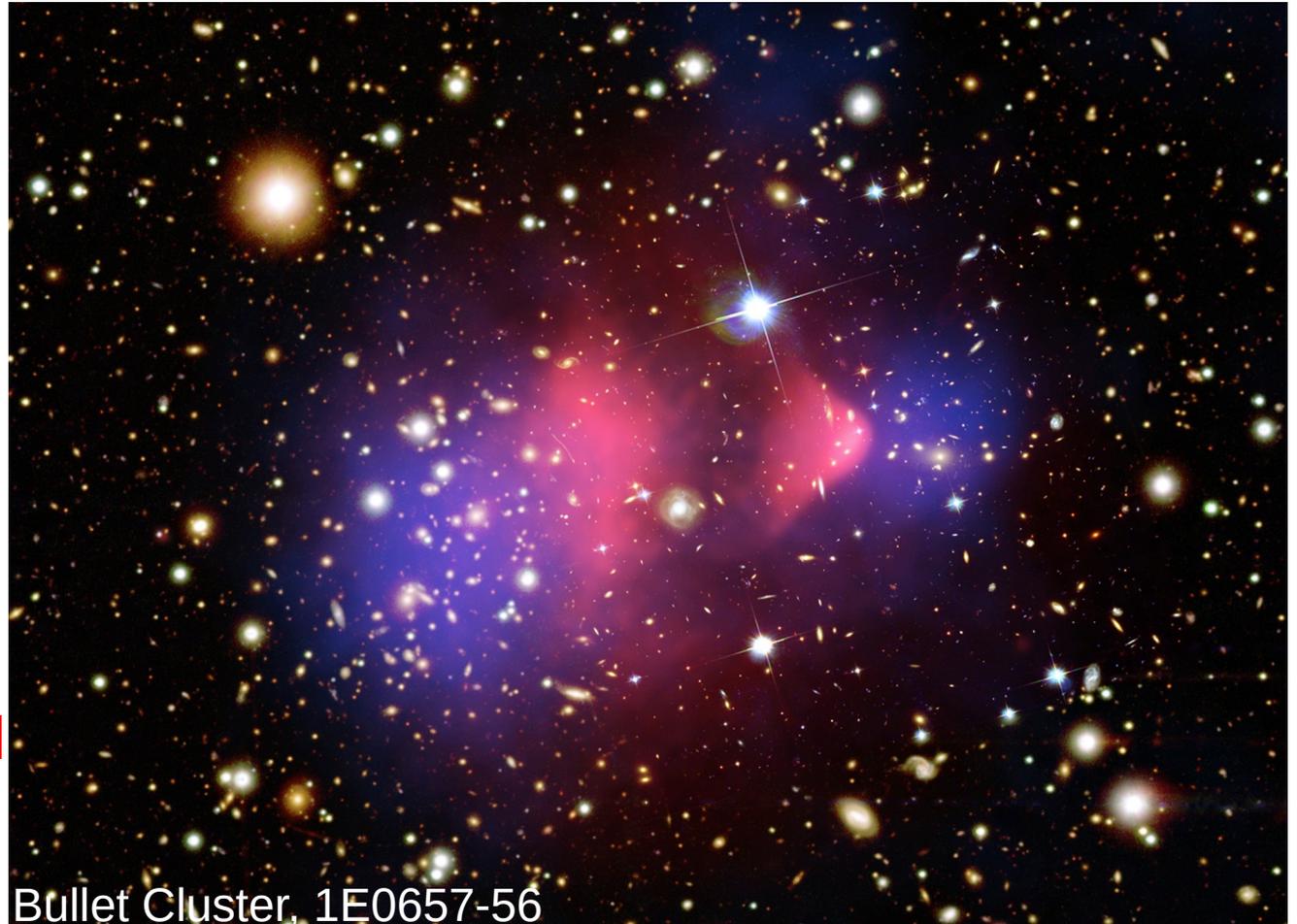
=> **Outra evidência para a Matéria Escura** não-bariônica.

# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Distribuição de Massa em Aglomerados de galáxias

O Bullet Cluster (“Aglomerado Bala”) são, na verdade, **dois Aglomerados** de galáxias em **colisão**.

Mapeando a **distribuição** de **massa** pelo **efeito lente fraco** (em azul), vê-se que a **Matéria Escura não coincide** com a **visível** (em vermelho: a emissão em raios X do gás intergaláctico).



Bullet Cluster, 1E0657-56

A Matéria Escura fica “na frente” por estar menos sujeito à fricção.

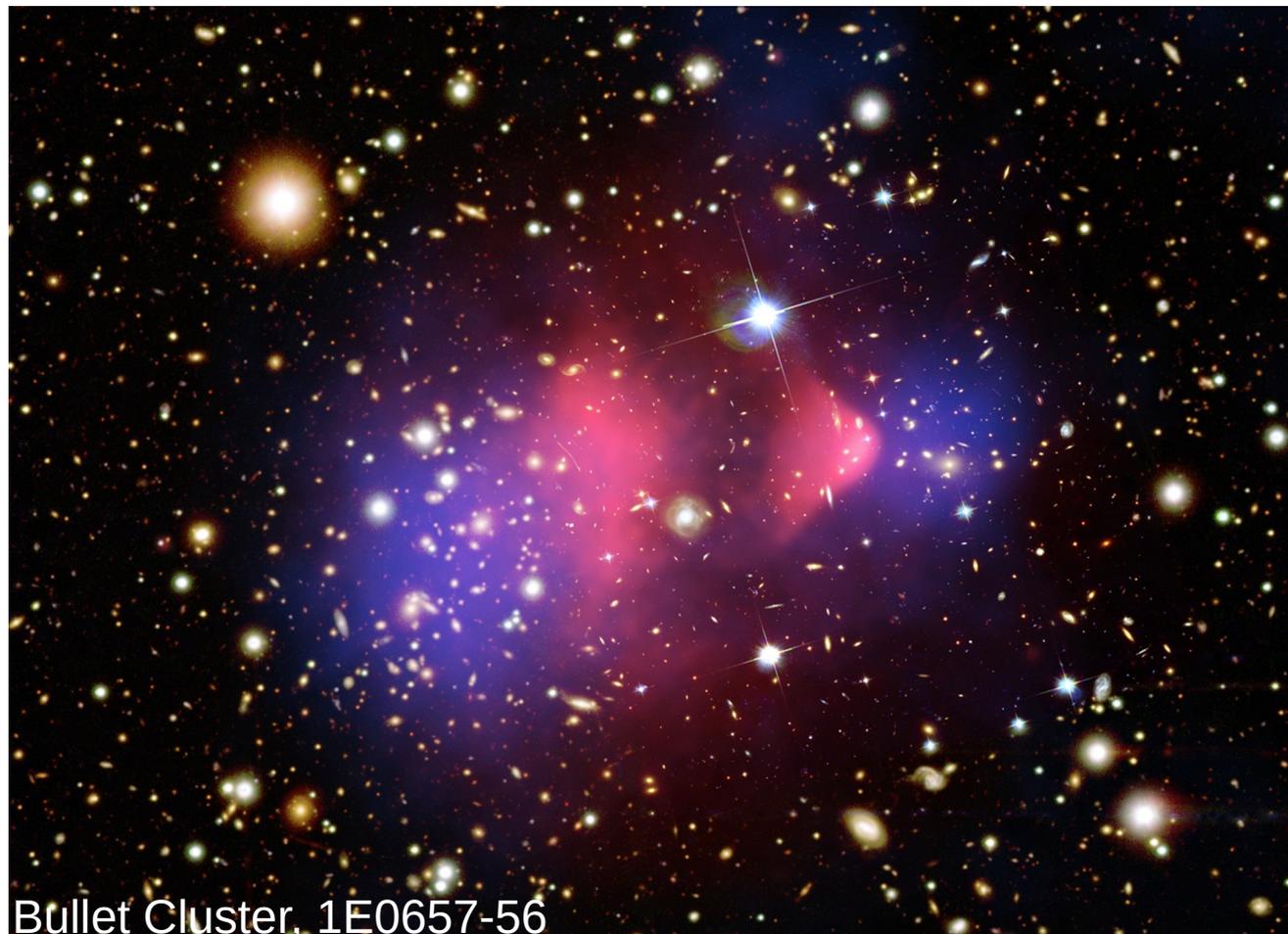
# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Distribuição de Massa em Aglomerados de galáxias

Isto é visto como uma das melhores **evidências** da **existência** da **Matéria Escura** (A matéria vista pelo efeito lente **não** é simplesmente só a massa visível “sobre-estimada”).

=> Temos **evidências** para a **Matéria Escura** de fontes

completamente diferentes e **independentes**: Radiação Cósmica de Fundo, galáxias, Aglomerados de galáxias (e existem mais).



Bullet Cluster, 1E0657-56

# Do que consiste a Matéria Escura?

Tem que ser algo que quase **não interage** com matéria “comum” (só pela gravitação e talvez a força fraca).  
Senão já a teríamos visto.

## Anos 80: Duas Possibilidades

- **Hot Dark Matter** (inglês para Matéria Escura **Quente**):  
**Partículas** de muito **baixa massa** e com **altas velocidades**:  
neutrinos ( $\sim 10^{-36}$  kg), táquions ou outras partículas hipotéticas
- **Cold Dark Matter** (Matéria Escura **Fria**):  
**Partículas** ou até **objetos** com **massa** mais **alta**,  
e **velocidades baixas**:  
**WIMPs** (ingl. *Weakly Interacting Massive Particles*,  
“partículas massivas interagindo fracamente”,  $10^{-26}$  -  $10^{-24}$  kg),  
“axions” ( $\sim 10^{-41}$  kg), partículas supersimétricas  
ou outras partículas hipotéticas

# Do que consiste a Matéria Escura?

## Como distinguir?

- As partículas do *Hot Dark Matter* têm **velocidades** tão **altas** (relativísticas), que elas **escapam** das concentrações de massa (galáxias, Aglomerados, etc.)  
Elas **não participam** na **formação** destas **estruturas**.
- **Primeiro** se formariam apenas as **maiores estruturas**, os (**super-**)**aglomerados**
- As **galáxias** se formariam **depois**, por **fragmentação** das maiores estruturas, cenário **top-down** (de cima para baixo)
- *Cold Dark Matter* fica **ligada** às estruturas pela **gravitação**  
Ela **participa** da **formação** das **estruturas**.
- As **menores estruturas** já conseguem se formar **cedo**, e **depois** se **juntam** para formar as estruturas **maiores**, num cenário **bottom-up** (de baixo para cima)

# Do que consiste a Matéria Escura?

Como distinguir?

=> A **formação das estruturas** se dá **diferentemente** nas duas hipóteses.

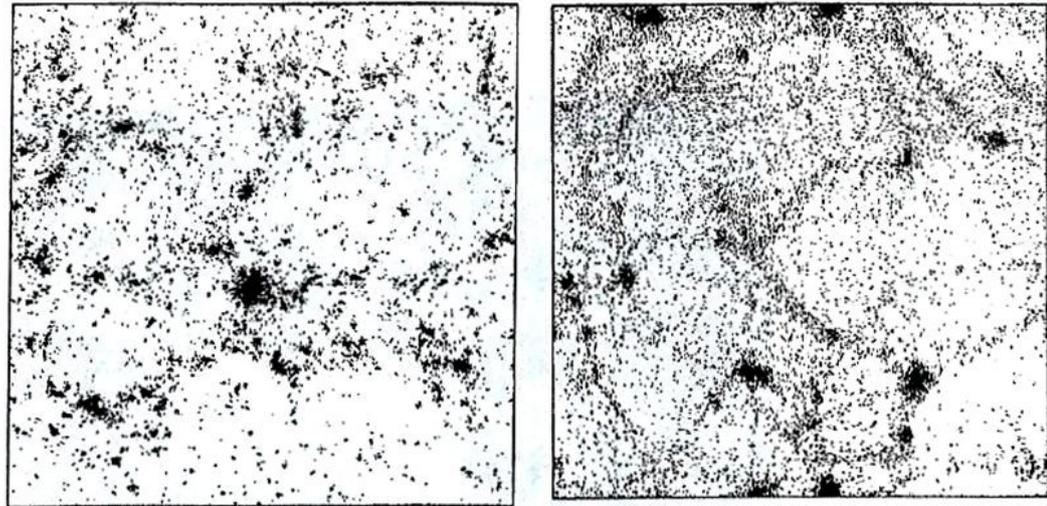
=> A evolução das **formas e tamanhos das estruturas** e da **distribuição** da matéria, incluindo a matéria visível, quer dizer, das **galáxias** se dá **diferente** nas duas hipóteses

Para achar a resposta final foram feitas **simulações** mais sofisticadas.

# Do que consiste a Matéria Escura?

Como distinguir?

**Simulações** que calculam a **evolução** das **estruturas** num **Universo** contendo **CDM** ou **HDM** prevêm **distribuições** de **galáxias diferentes** nas duas hipóteses.



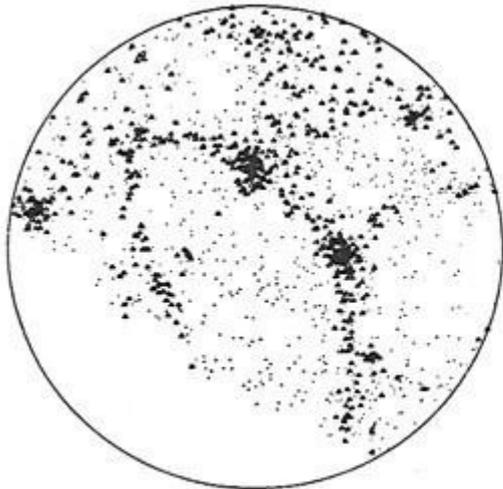
**FIGURE 30.10** The results of numerical simulations of the formation of structure in the universe from the bottom-up clumping of cold dark matter (left), and the top-down fragmentation of hot dark matter (right). Both models assume  $\Omega_0 = 1$  and  $h = 0.5$ . (Figure from Frenk, *Physica Scripta*, T36, 70, 1991.)

# Do que consiste a Matéria Escura?

Simulações da evolução das grandes estruturas no Universo

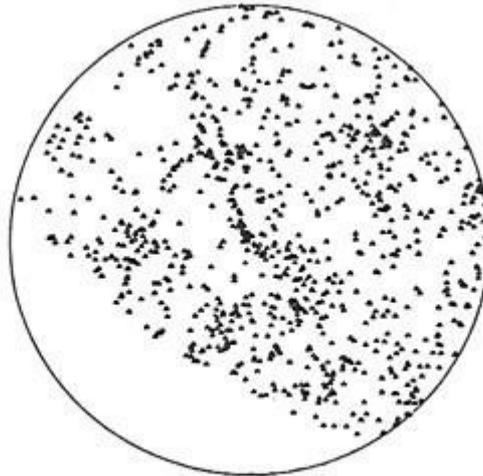
Cada ponto é uma galáxia.

Com Matéria Escura  
Quente



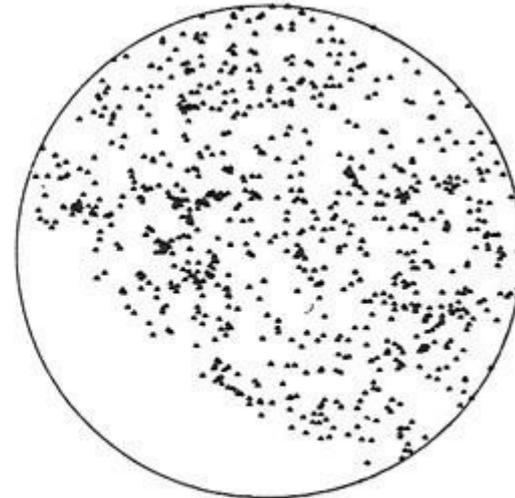
HDM

Distribuição  
Observada



Observed Galaxy Distribution

Com Matéria Escura  
Fria

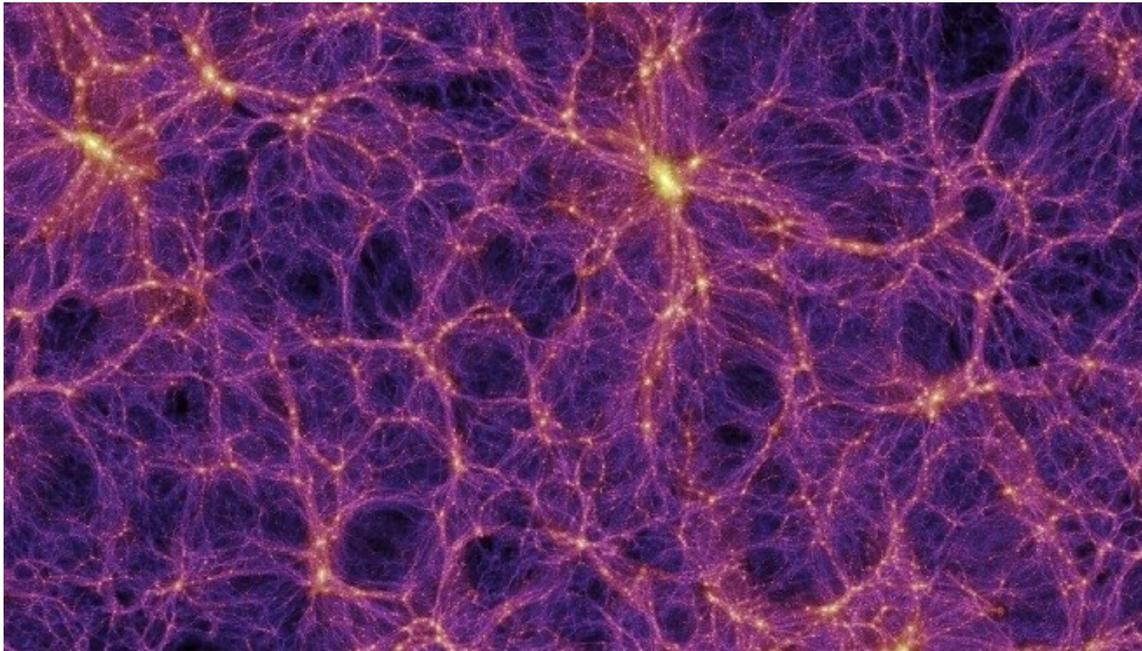


CDM

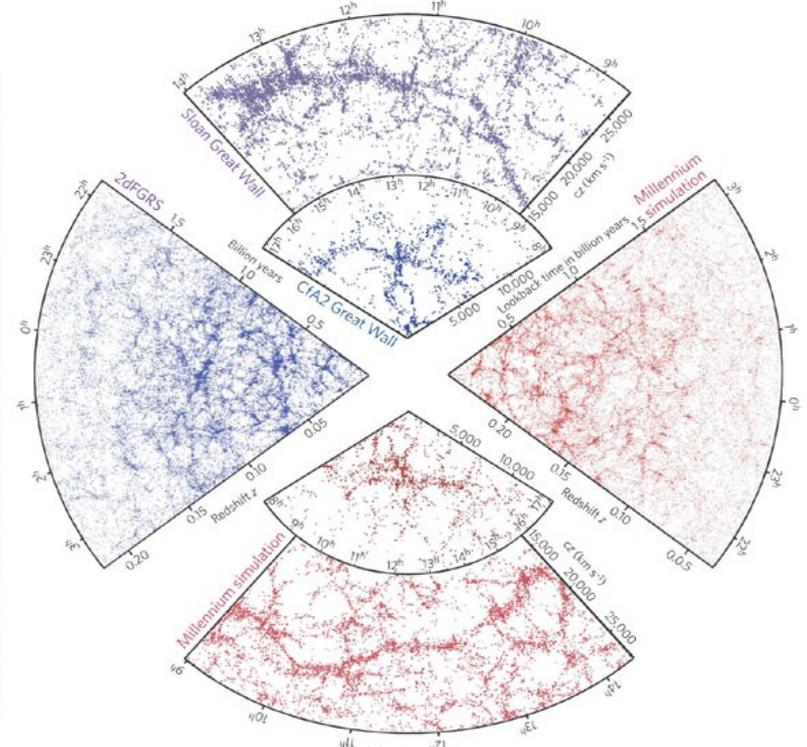
=> A simulação com **Matéria Escura Fria** reproduz a distribuição observada melhor

# Do que consiste a Matéria Escura?

## Simulação mais recente com Matéria Escura Fria



*Dark Matter Millenium Simulation*



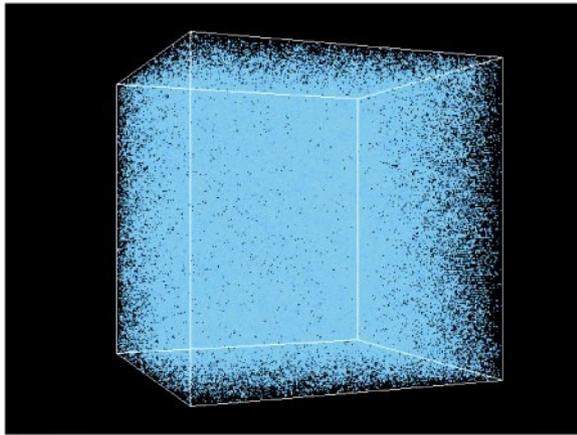
Comparação com uma amostra de *redshifts*

Reproduz perfeitamente a distribuição observada.

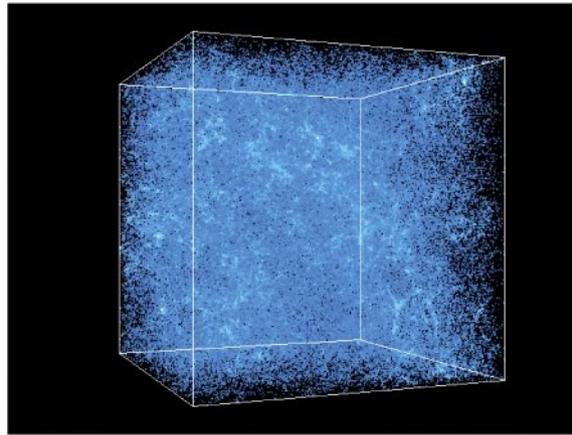
=> A Matéria Escura é **Fria** (CDM)

# Do que consiste a Matéria Escura?

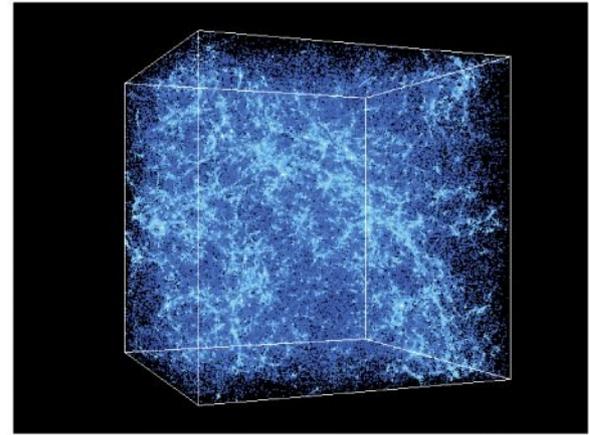
## Evolução de um Cubo de Universo segundo a Simulação



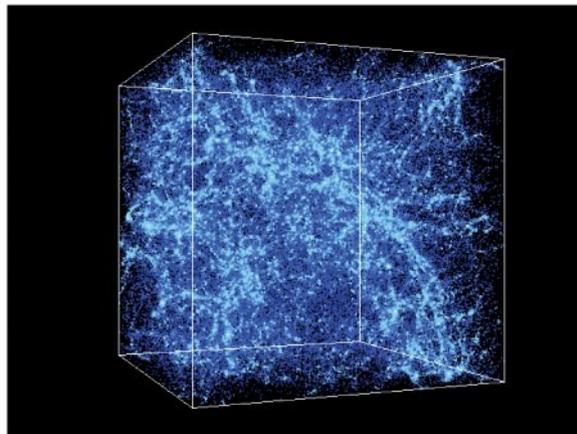
$z = 27.36$  Universe 120 million years old



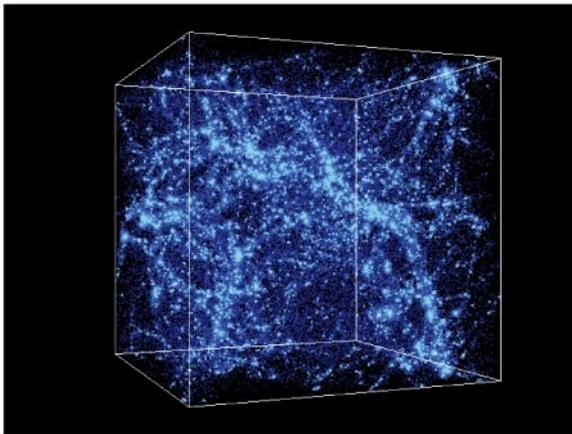
$z = 9.83$  Universe 490 million years old



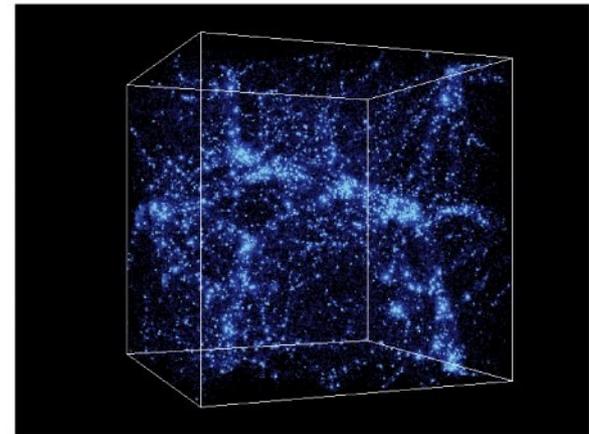
$z = 4.97$  Universe 1.2 billion years old



$z = 2.97$  Universe 2.2 billion years old



$z = 0.99$  Universe 6.0 billion years old



$z = 0.00$  Universe 13.7 billion years old

Figure 27-15

*Universe, Eighth Edition*

© 2008 W. H. Freeman and Company

# Outras Evidências para a Energia Escura

## Luminosidades de Supernovas Ia

Supernovas (SN) são **explosões** de **estrelas** no final das suas “vidas”.

Para um certo tipo, as Supernovas Ia, estas explosões **sempre** ocorrem com a **mesma luminosidade**, que conseguimos determinar através de SNs Ia que ocorreram “perto daqui”. Se diz que SNs Ia são **velas padrão**.

A **luminosidade aparente** (o brilho do objeto no céu) **diminui** com o **quadrado da distância**.

=> Pode se **determinar** a **distância** de uma SN Ia e, então, da galáxia onde ela ocorreu, **medindo** a sua **luminosidade aparente**.

# Outras Evidências para a Energia Escura

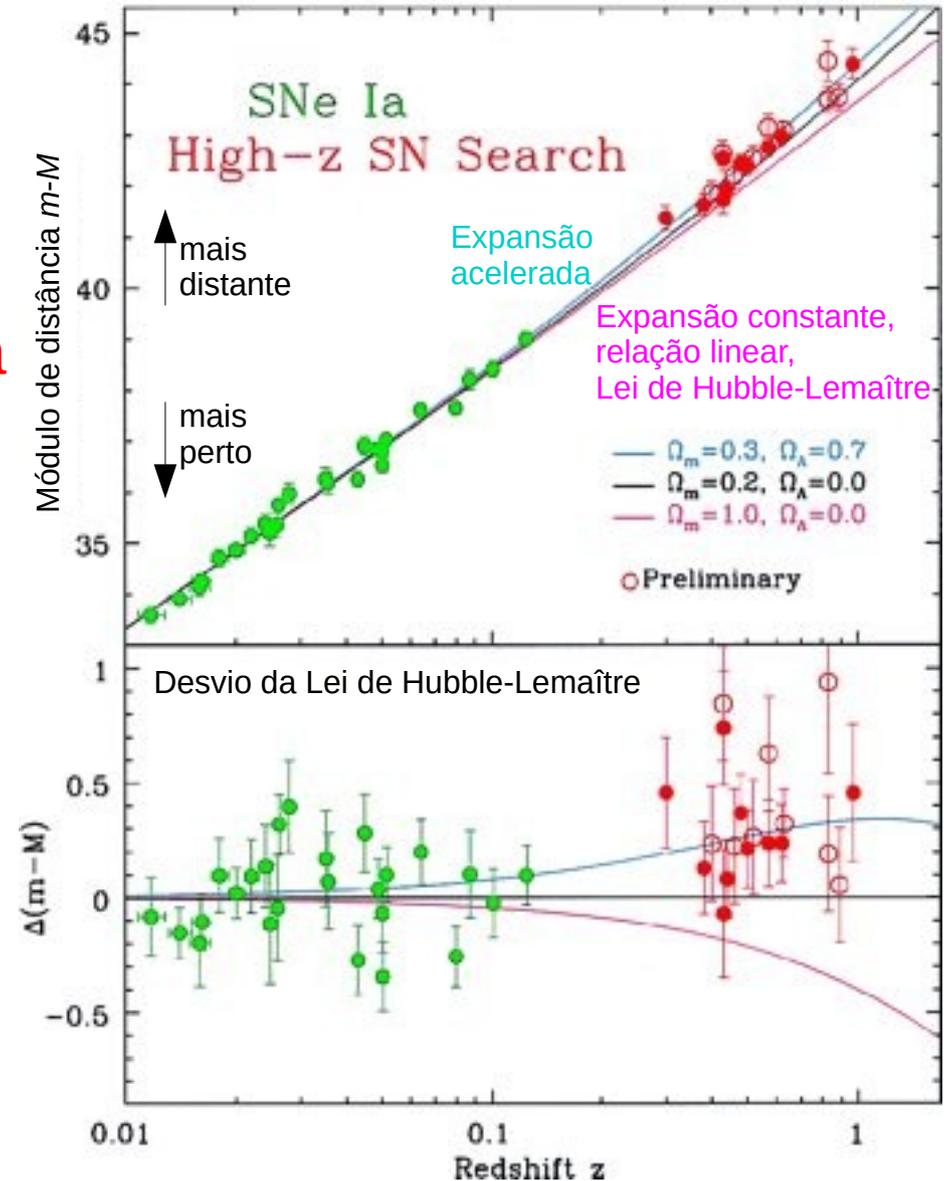
## Luminosidades de Supernovas Ia

Em 1998, astrônomos descobriram que em *redshifts* altos, ou seja, no passado distante, as distâncias das SNe Ia são maiores que previsto pela Lei de Hubble-Lemaître, que se baseia numa taxa constante de expansão do Universo.

=> A expansão era mais lenta

=> A expansão do Universo é acelerada.

=> Evidência pra Energia Escura.

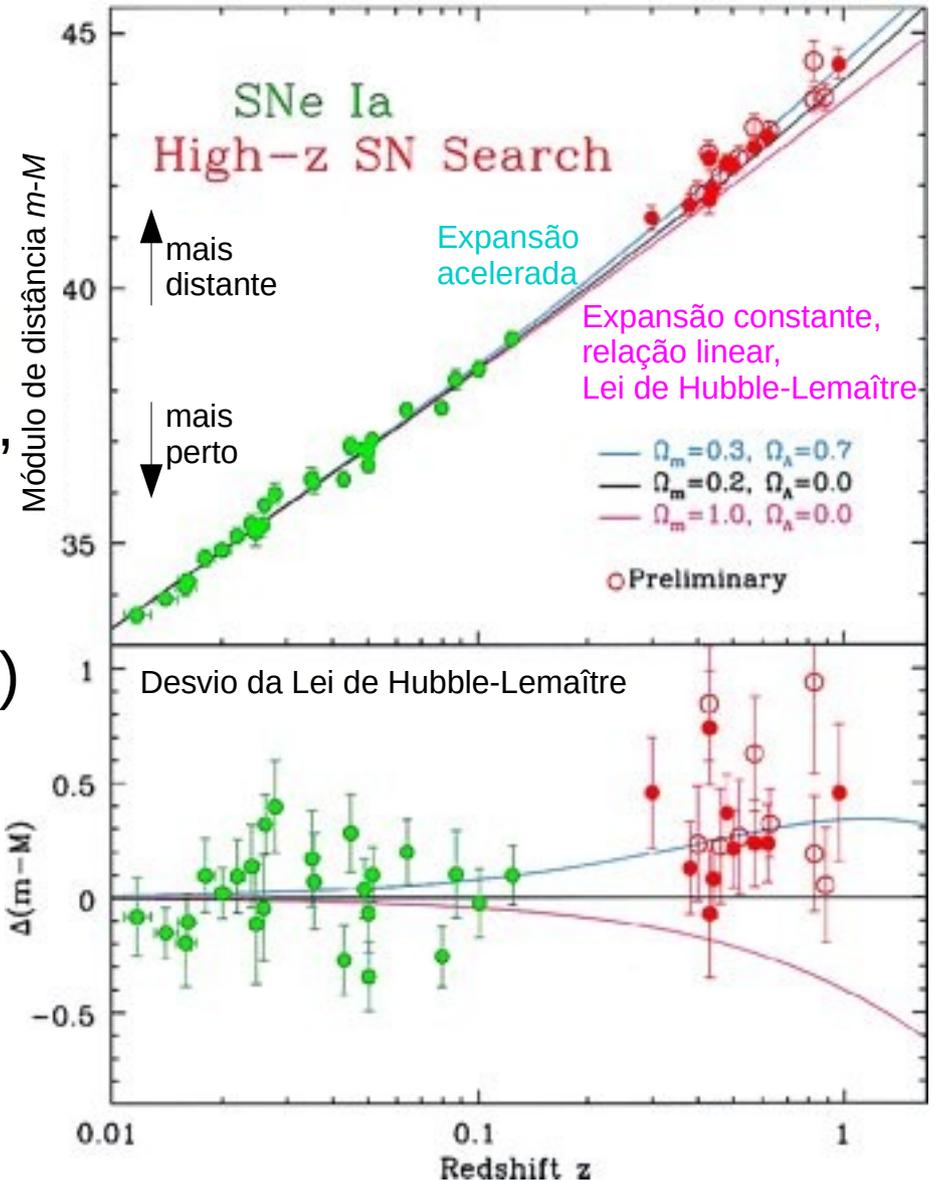
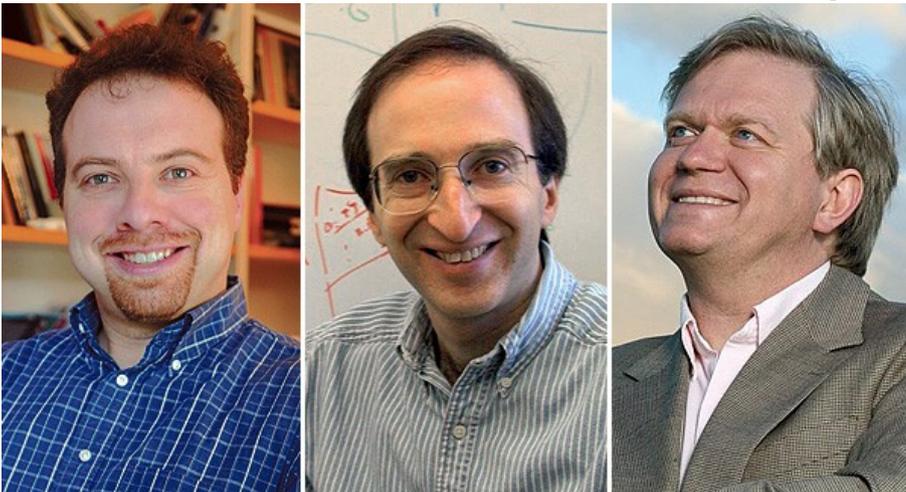


# Outras Evidências para a Energia Escura

## Luminosidades de Supernovas Ia

O valor da **densidade** da **Energia Escura** determinado através das distâncias das SN Ia bate bem com o valor determinado pela Radiação Cósmica de Fundo, **69 % da densidade crítica**.

=>  Prêmio Nobel para Perlmutter, Schmidt e Riess (2011)



# Do que consiste a Energia Escura?

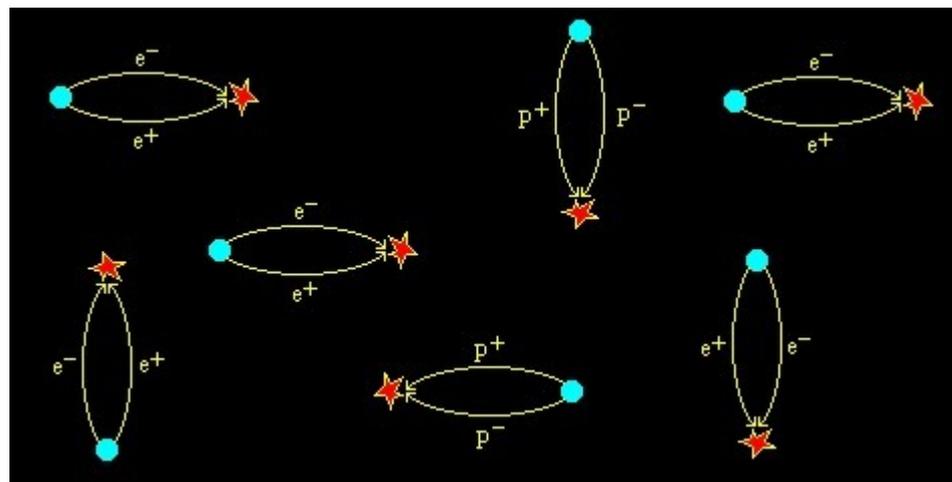
Ela é, às vezes, associada com a “**energia do vácuo**”.

Um nome melhor seria energia do **estado fundamental** do espaço.

Segundo a teoria, o espaço “vazio” não é nada vazio:

Consiste de **partículas** e **anti-partículas** sendo **criadas** e **aniquilando**-se constantemente. Só que a densidade de energia calculada para este estado é um fator  $10^{120}$  maior, que a densidade da Energia Escura, talvez o maior erro já alcançado por uma teoria!

Há tentativas de remediar isto, supondo que diferentes tipos de partículas (bósons e férmions) contribuem com sinal oposto, assim quase se cancelando (menos uma parte em  $10^{120}$ ).



# Abundâncias dos Elementos Primordiais

No espaço inter-galáctico, há nuvens de gás tênue, que pouco mudaram desde a sua formação.

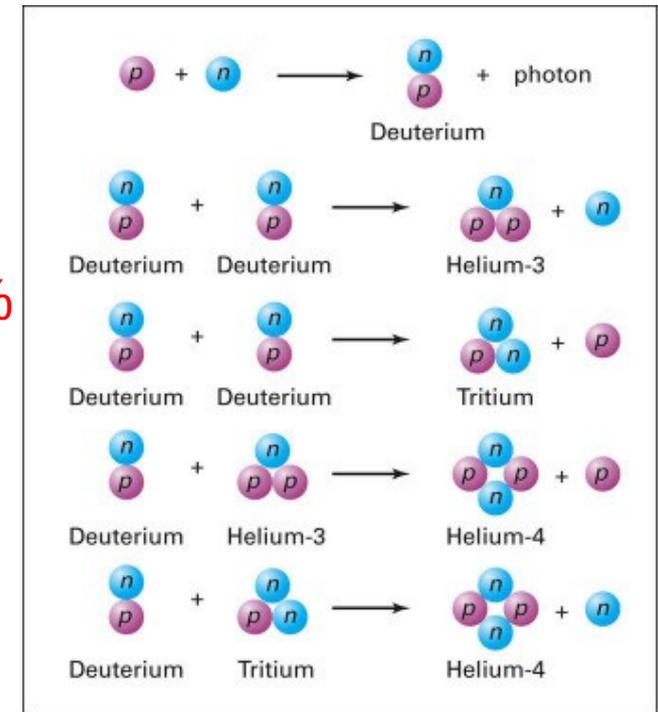
=> Elas ainda têm a **mesma composição química**, que **logo depois do Big Bang** (composição primordial).

Nestas nuvens, e no resto do Universo, **23 a 24 %** (ou mais) dos **átomos** são de **hélio**, que só podem ter sido formados na **Época da Nucleossíntese**, de 1 ms a 5 min depois do **Big Bang**, quando **densidade** e **temperatura** do Universo eram **altas** o suficiente para possibilitar a **fusão nuclear**, ou **nucleossíntese**, dos **prótons** e **nêutrons** formados no primeiro milissegundo.

O processo é outro que a cadeia p-p no interior de estrelas, por que tinha nêutrons livres a disposição (nas estrelas não tem).

Além de hélio, foram formados **montantes microscópicos** de **deutério**, **hélio-3**, **lítio** e berílio, Os outros **~76 %** dos átomos são de **hidrogênio**.

Nucleossíntese primordial



# Abundâncias dos Elementos Primordiais

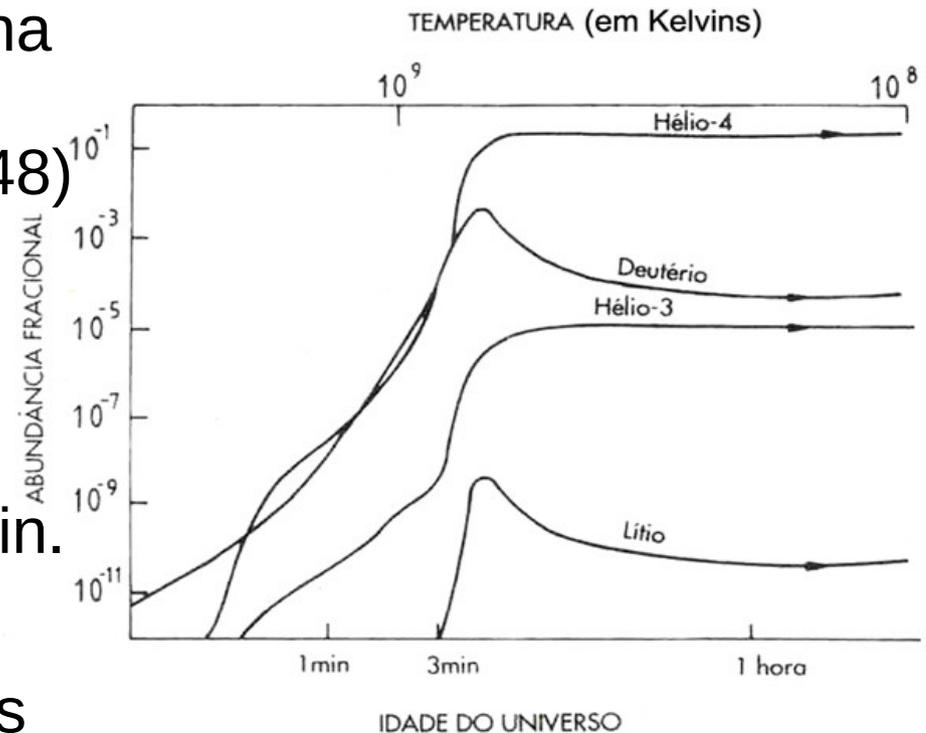
Através do **montante de hélio** na composição primordial, dá pra calcular (Alpher e Herman, 1948)

- a **duração da Época da Nucleossíntese**, ~5 min
- **Temperatura e densidade da matéria “comum”, ou bariônica** no final destes 5 min.

Os **montantes de deutério, hélio-3 e lítio** permitem cálculos mais sofisticadas das **condições** nos **primeiros 5 min. do Universo**.

=> Só **5 %** da **densidade crítica** é **bariônica**, em concordância com os resultados da Radiação de Fundo.

=> **Prova**, que a **nucleossíntese primordial aconteceu**, e **determinação independente da densidade da matéria bariônica**.



# Origem dos Elementos

- ~98 % dos átomos do Universo atual foram formados na **Época da Nucleossíntese** (1 ms - ~5 min depois do *Big Bang*)

=> **composição química primordial do Universo:**

H (~76 %), He (23 a 24 %), D (0.01 %), Li (< 0.01 %).

- E os outros 2 %, ou seja todos os outros 105 elementos estáveis?

- O resto foi formado mais tarde por  **fusão nuclear** em **Estrelas** e **Supernovas** (=> outra aula).

Exceção: Lítio, Berílio e Boro são instáveis a altas temperaturas e são destruídas no interior das estrelas.

O pouquinho destes elementos que é observado vem de colisões de Raios Cósmicos com H e He no meio interestelar.

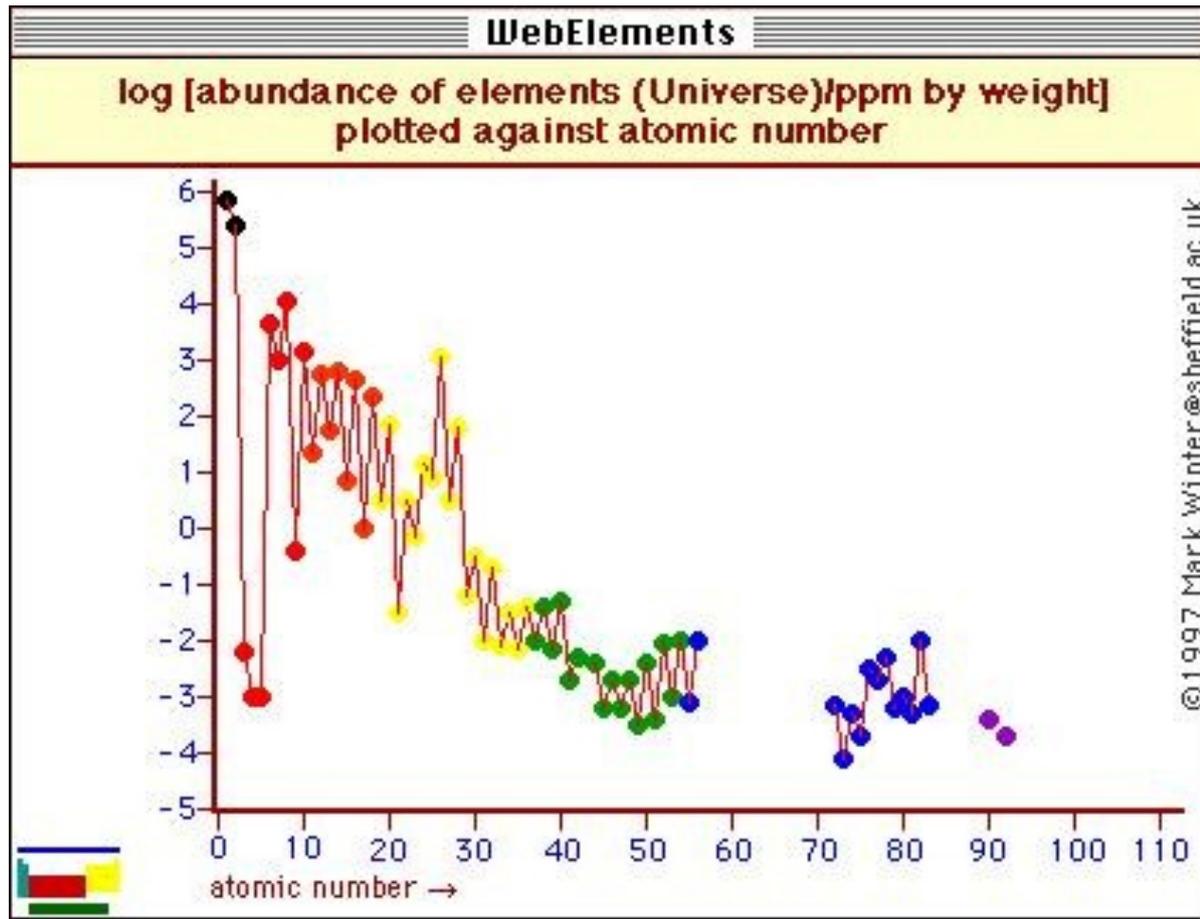
# Origem dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #d9e1f2;"> <span style="background-color: #d9e1f2; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 20px; margin-right: 5px;"></span> Big Bang B         </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #90ee90;"> <span style="background-color: #90ee90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 20px; margin-right: 5px;"></span> Large stars L         </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #ffcc99;"> <span style="background-color: #ffcc99; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 20px; margin-right: 5px;"></span> Supernovae \$         </div> </div>																	
H B																		He B	
Li C	Be C											B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L		
Na L	Mg L											Al \$ L	Si \$ L	P L	S S L	Cl L	Ar L		
K L	Ca L	Sc L	Ti \$ L	V \$ L	Cr L	Mn L	Fe \$ L	Co \$	Ni \$	Cu L	Zn L	Ga \$	Ge \$	As L	Se \$	Br \$	Kr \$		
Rb \$	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo \$ L	Tc L	Ru \$ L	Rh \$	Pd \$ L	Ag \$ L	Cd \$ L	In \$ L	Sn \$ L	Sb \$	Te \$	I \$	Xe \$		
Cs \$	Ba L		Hf \$ L	Ta \$ L	W \$ L	Re \$	Os \$	Ir \$	Pt \$	Au \$	Hg \$ L	Tl \$ L	Pb \$	Bi \$	Po \$	At \$	Rn \$		
Fr \$	Ra \$																		
		La L	Ce L	Pr \$ L	Nd \$ L	Pm \$ L	Sm \$ L	Eu \$	Gd \$	Tb \$	Dy \$	Ho \$	Er \$	Tm \$	Yb \$ L	Lu \$			
		Ac \$	Th \$	Pa \$	U \$	Np \$	Pu \$	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M			

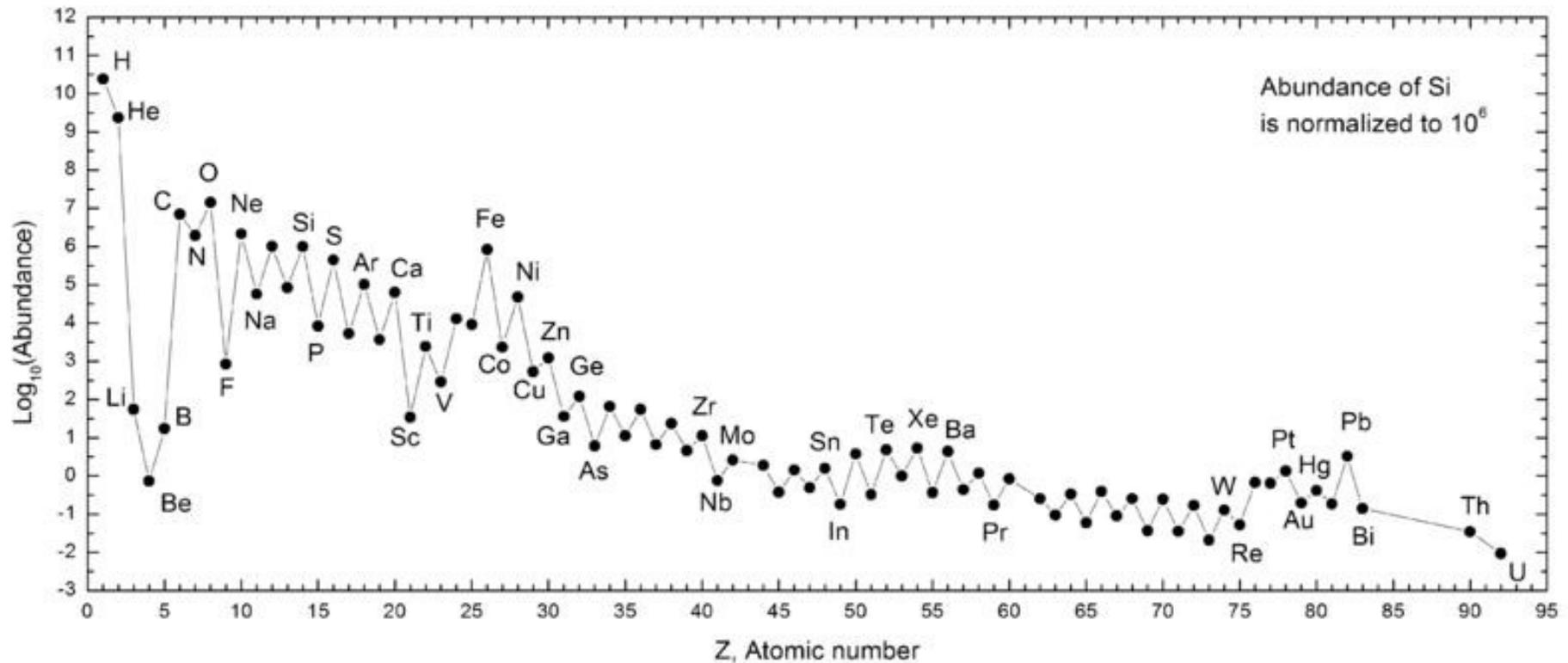
# Origem dos Elementos

## Abundâncias dos Elementos no Universo



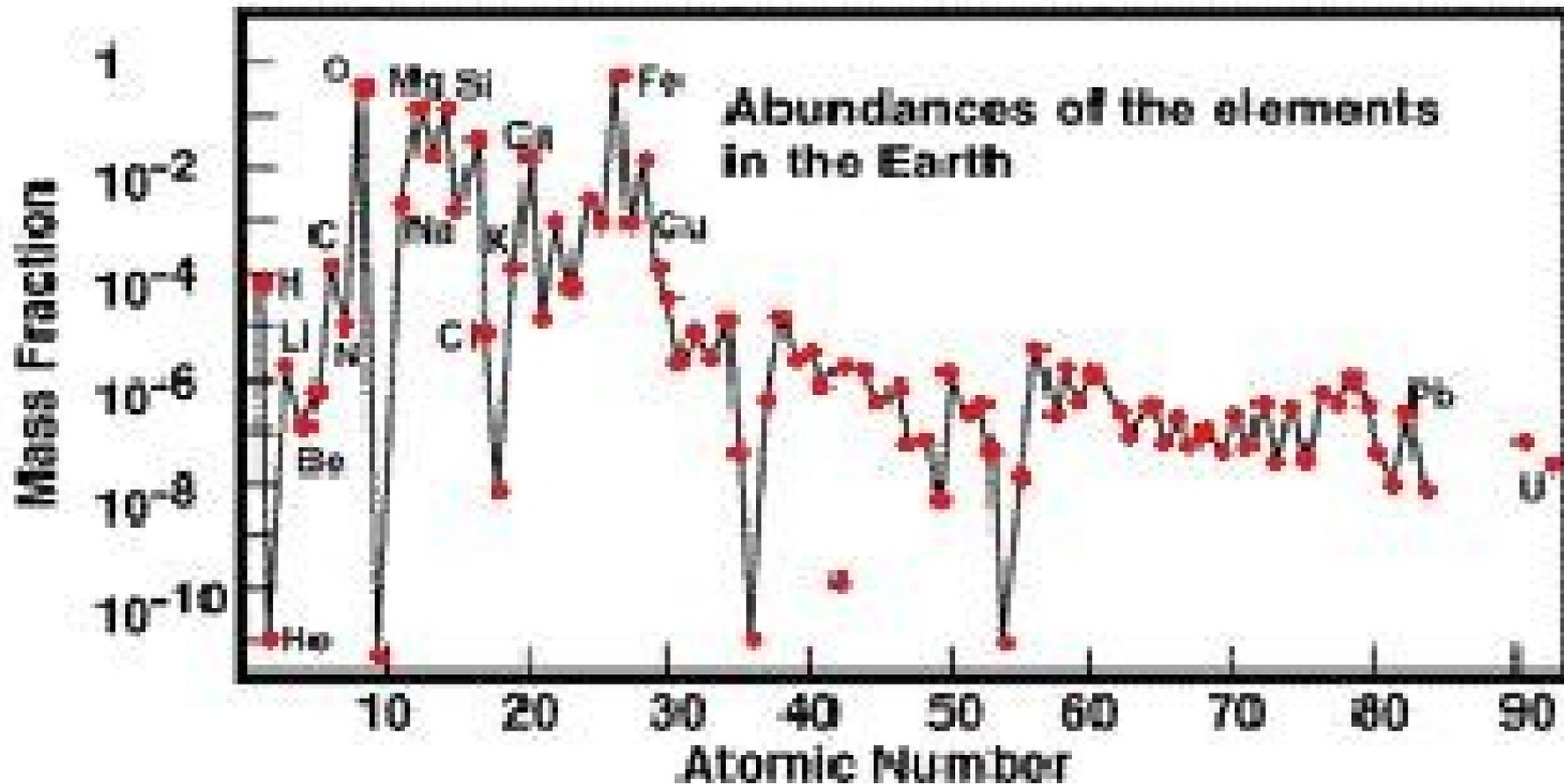
# Origem dos Elementos

## Abundâncias dos Elementos no Sistema Solar



# Origem dos Elementos

## Abundâncias dos Elementos na Terra



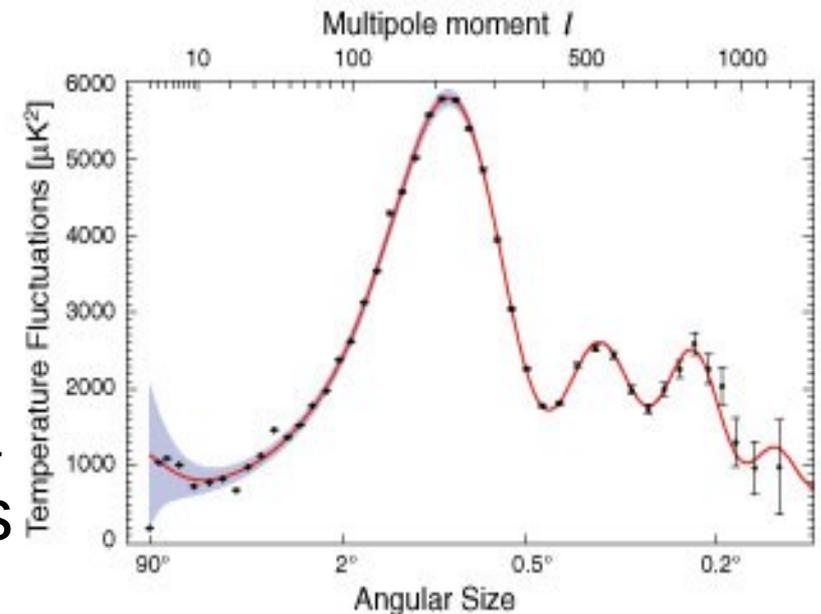
# Outras Evidências

## O Pico das Oscilações Acústicas Bariônicas

Voltando para os tamanhos das estruturas na Radiação Cósmica de Fundo:

Se houve muitas **estruturas** com um **certo tamanho** ( $1^\circ$  no céu) na **Época da “Recombinação”**, estas estruturas devem ter **evoluído** para **tamanhos típicos** hoje.

Pelo **modelo  $\Lambda$ CDM** estruturas de  $1^\circ$  na **Radiação Cósmica de Fundo**,  $\sim 200$  kpc na época, deveriam ter tamanhos de **140 Mpc** hoje.



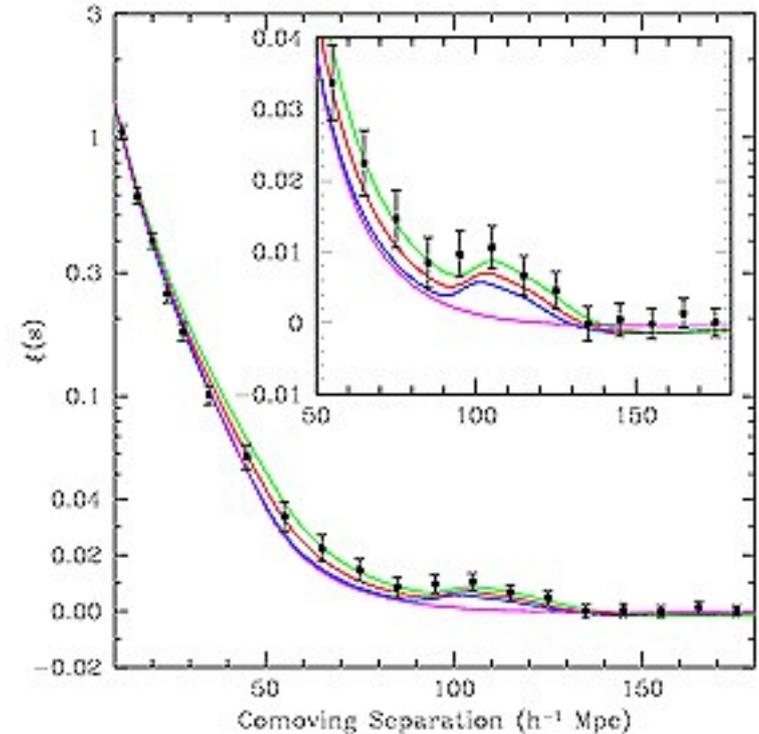
Espectro de tamanhos na radiação cósmica de fundo

# Outras Evidências

## O Pico das Oscilações Acústicas Bariônicas

Numa amostra de 46 748 galáxias do Sloan Digital Sky Survey, **esta distância** ocorre com **mais frequência entre galáxias**, do que esperado para uma distribuição aleatória de galáxias.

=> **Evidência** para a **evolução** de **estruturas primordiais** até as **estruturas em grande escala** hoje, de maneira predita pelo **modelo  $\Lambda$ CDM**.



Função de correlação de distâncias intergalácticas

# Outras Evidências

## Evidências para a Inflação

O **problema** do **Horizonte**:

Por que a **Radiação Cósmica de Fundo** é tão **homogênea**?

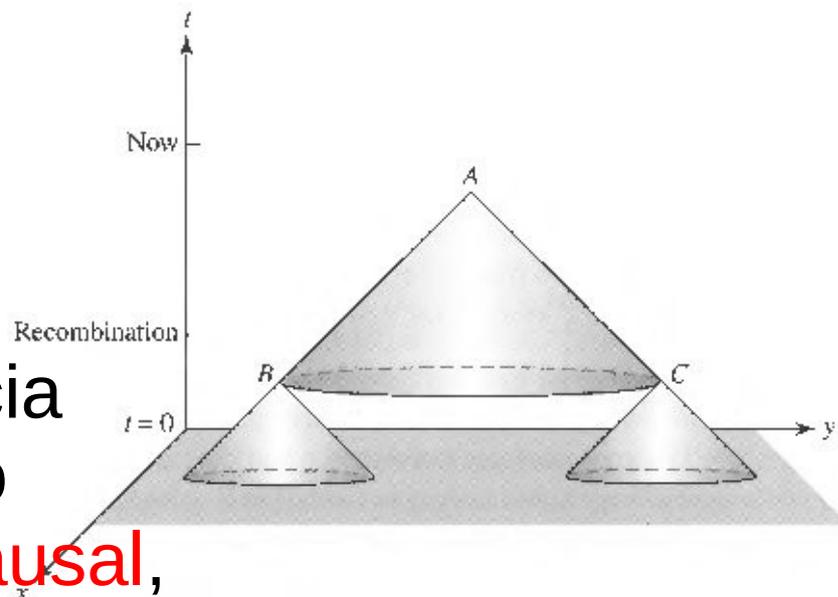
pontos de mais de  $2^\circ$  de distância na Radiação Cósmica de Fundo

**nunca** podem ter tido **contato causal**,

se as informações chegaram neles à velocidade da luz.

Mesmo assim, a **Radiação Cósmica de Fundo** é tão **homogênea** no céu, que parece que toda a região deve ter estado em um **equilíbrio antes**.

**Como** este **equilíbrio** se **estabeleceu** entre pontos **sem contato causal**?



# Outras Evidências

## Evidências para a Inflação

O **problema** da **Planura**:

Por que o **Universo** era tão **plano** na Época da “**Recombinação**”?

Para que o **parâmetro** da **densidade total** hoje,  $\rho_0$ , possa estar **dentro** de **2 %** da densidade crítica,  $\rho_{\text{crit},0}$

(Planck:  $\rho_0 = (1.0023 \pm 0.0055) \cdot \rho_{\text{crit},0}$ ), ele deve ter sido dentro de 0.001 % da densidade crítica naquela época,  $\rho_{\text{crit}}(t_{\text{Recombinação}})$ .

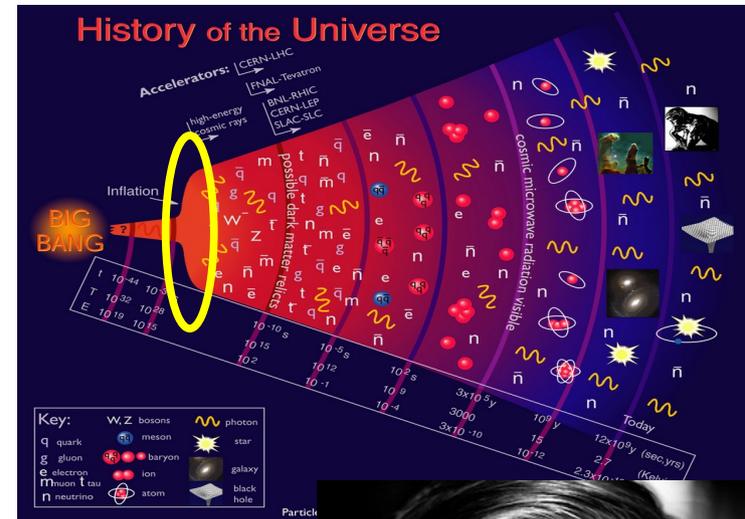
Se  $\rho$  não tivesse sido tão perto de  $\rho_{\text{crit}}$  naquela época, o Universo já teria se desfeito ( $\rho < \rho_{\text{crit}}$ ) ou recolapsado ( $\rho > \rho_{\text{crit}}$ ), e nós não existiríamos.

O que causou aquele ajuste fino?

# Outras Evidências

## Evidências para a Inflação

A **Inflação Cosmológica**, aquele período hipotético no final da Época da Grande Teoria Unificada de **aumento exponencial** do **tamanho** do **Universo** por um fator  $\geq 10^{43}$  em  $< 10^{-34}$  s, sugerido em 1980 por Alan Guth, consegue **explicar** os dois fenômenos.



# Outras Evidências

## Evidências para a Inflação

Segundo a teoria da **Inflação**, a parte do Universo que se tornou a parte observada na **Radiação de Fundo**, era **muito menor** que se não tivesse tido a Inflação, **pequeno** o **suficiente** para

ter tido **contato causal** e ter **estabelecido** um **equilíbrio**.  
=> **Resolve o Problema do Horizonte.**

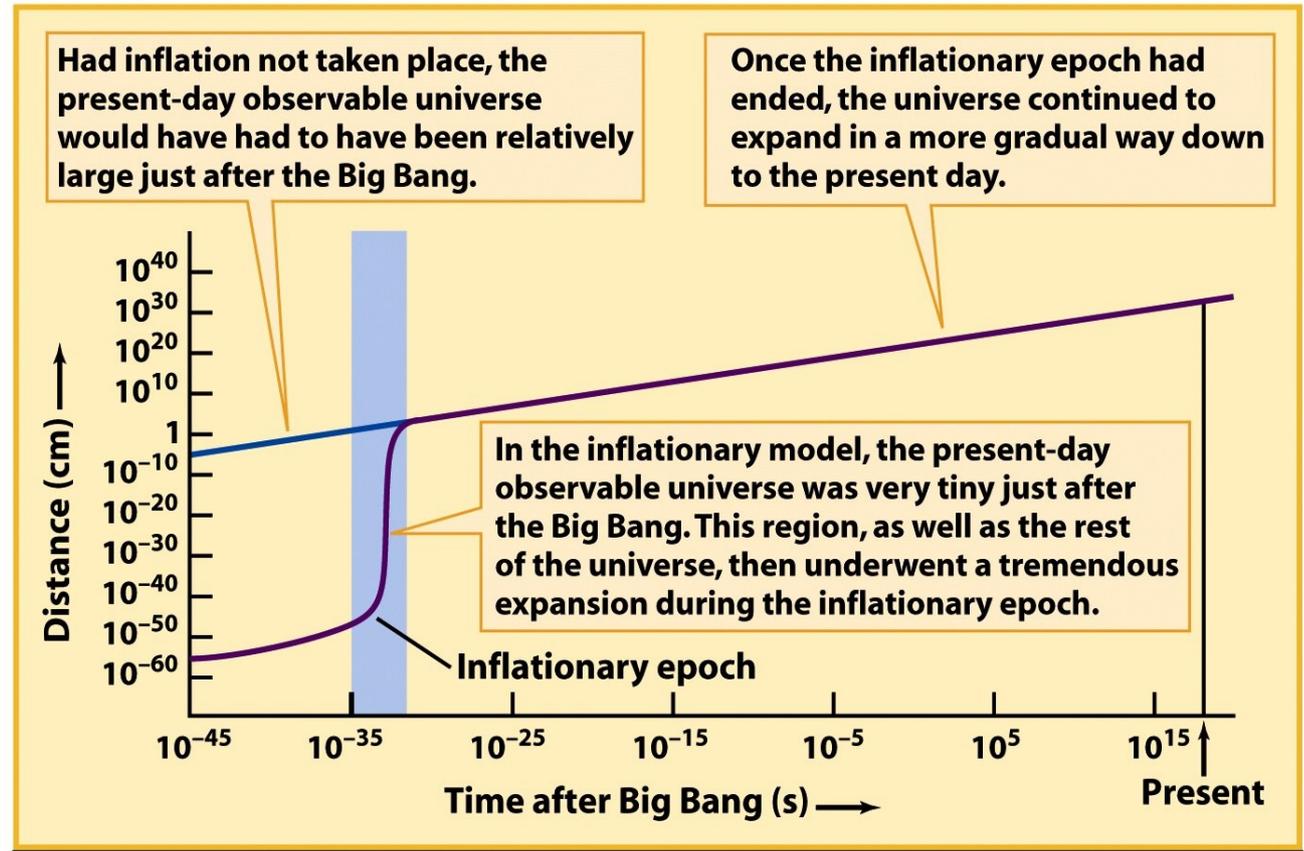


Figure 27-2  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Outras Evidências

## Evidências para a Inflação

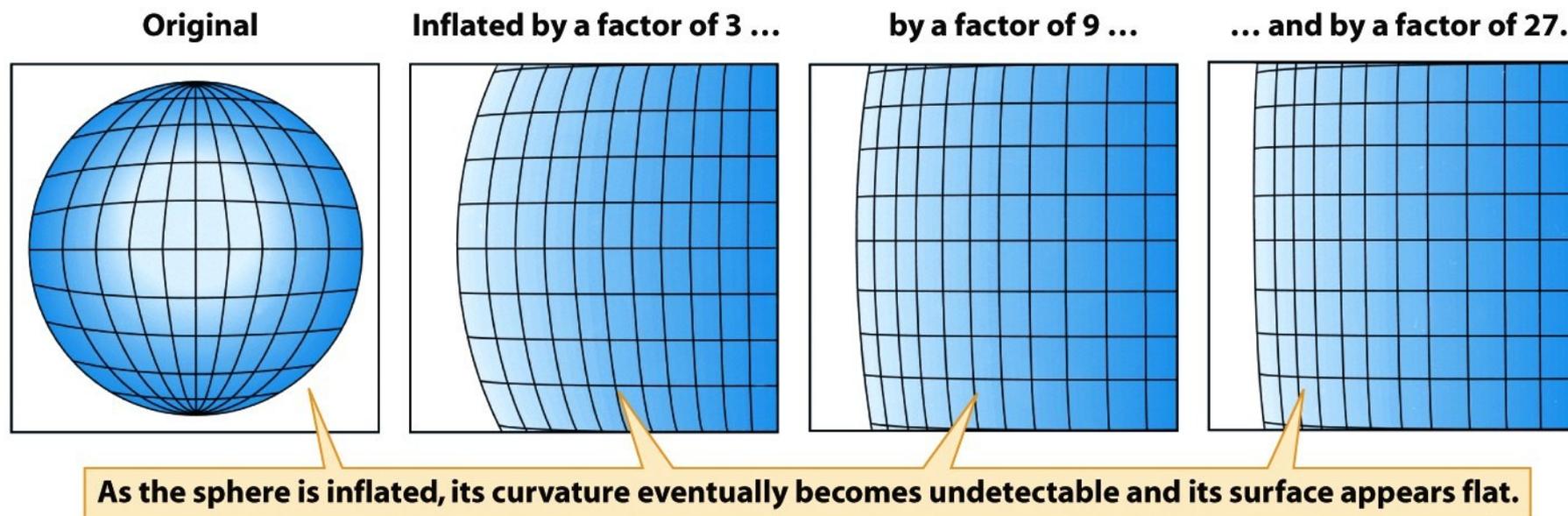


Figure 27-3

*Universe, Eighth Edition*

© 2008 W. H. Freeman and Company

A **Inflação** também **resolve** o **Problema da Planura**:  
Qualquer **curvatura** ou **irregularidade** teria se **aplainado**  
na **expansão**.

=> Bons argumentos a favor da Inflação.

# Evidências para Ondas Gravitacionais

(mas não de uma fonte cosmológica)

Já houve **detecções indiretas**:

Perda de energia rotacional nas órbitas de pares de pulsares, i. e. o pulsar binário PSR1913+16, ou Hulse-Taylor (1974)

14/09/2015 (anunciado 11/02/2016)

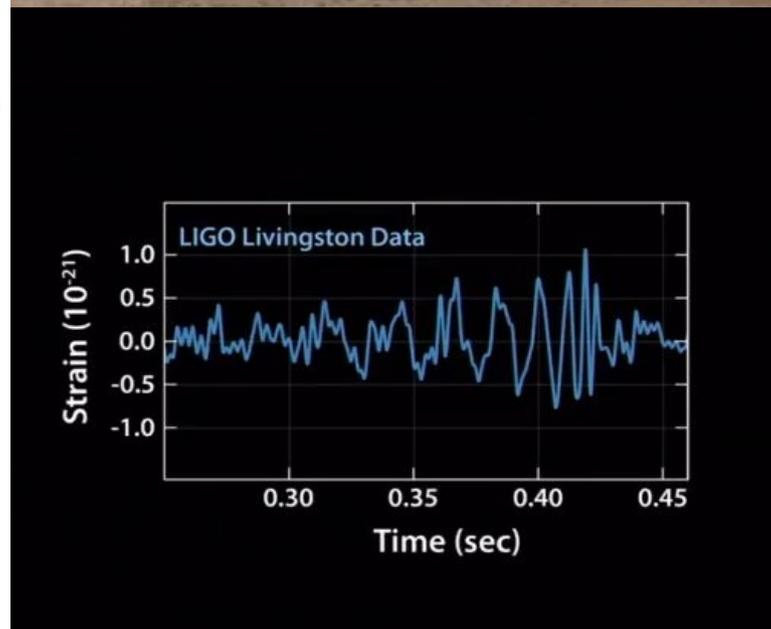
LIGO (Hanford e Livingston, EUA):

**Detecção** de **ondas gravitacionais** devidas a um evento de fusão de 2 Buracos Negros.

Várias detecções foram feitas desde então.



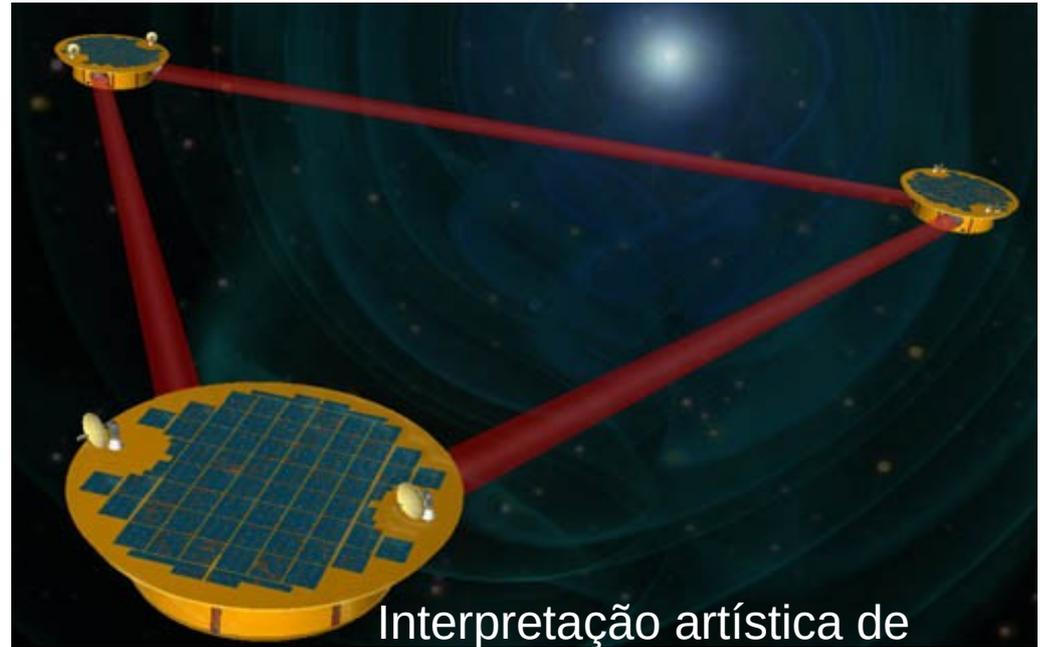
LIGO detector em Hanlon



# “Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Talvez algum dia poderemos observar as ondas gravitacionais emitidas na época da **Inflação**.

Telescópios de ondas gravitacionais do **futuro** incluem **conjuntos de satélites**, resultando em braços muito maiores.



Interpretação artística de

O “telescópio” LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) foi projetado como colaboração das NASA e ESA. Porém, a NASA saiu do projeto por causa dos custos altos, e a ESA redimensionou o projeto, agora projetado para ser lançado em 2035 (?).

O Japão propôs um telescópio similar, chamado DECIGO (*Deci-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory*), a ser lançado nos anos 2030 (2037?).

# O Futuro do Universo

Como se desenvolverá o Universo no futuro?

Se o modelo  $\Lambda$ CDM for certo (e não tiver nenhum ingrediente faltando), as galáxias se afastarão cada vez mais rapidamente uma da outra, até não haver mais contato (ligação causal) entre eles.

=> Estaremos isolados.

Tudo dentro das galáxias resfriará e acabará em objetos “mortos” (Buracos Negros, Anãs Brancas, Anãs Marrons, etc.; *Big Freeze*).

Há teorias que afirmam que, num futuro mais distante ainda, tudo se desintegrará: galáxias, os objetos mortos e, por último, átomos e partículas elementares (*Big Rip*).

# O Futuro do Universo

Como se desenvolverá o Universo no futuro?

Porém, nunca se sabe se não está faltando algum ingrediente na nossa teoria...



# Outros Modelos Cosmológicos

Mas não pode ter outra explicação para todos estes fenômenos?  
Não existem **outros modelos cosmológicos**?

Sim, **muitos!**

Alguns exemplos:

Estado Estacionário (inicialmente o grande concorrente da teoria do *Big Bang*, elaborado por Hoyle, Gold e Bondi, os inventores do termo *Big Bang*) e Estado Quasi-Estacionário, Universo cíclico, MOND (*Modification of Newtonian Dynamics* ou "Modificação da Dinâmica Newtoniana"), Universo Anisotrópico, Quintessência, "Constante" cosmológica variável, Matéria e Energia Escuras Exóticas, Luz cansada, Periodicidade do *Redshift* e *Redshifts* intrínsecos, Hipótese dos números grandes de Dirac, Cosmologia do plasma, Teoria das cordas, Cosmologia de Branas, Multiversos e muitos, muitos outros.

Existem quase tantas teorias quanto cosmólogos (e algumas de *crackpots* também).

para mais detalhes sobre alguns destes modelos, vide a disciplina Introdução à Cosmologia.

# Outros Modelos Cosmológicos

Mas não pode ter outra explicação para todos estes fenômenos?  
Não existem **outros modelos cosmológicos**?

Sim, **muitos!**

Mas todos estes:

- ou **não** são **compatíveis** com as **observações**.
- ou são **mais complicados** e **menos plausíveis** do que  $\Lambda$ CDM (não são favorecidos pela Navalha de Occam).

**Por enquanto**, o **modelo  $\Lambda$ CDM** é o mais convincente que temos, na opinião da maioria dos cosmólogos e astrônomos.

# (Possíveis) Observações Futuras

Já que uns **95 % do Universo** ainda **não** foram identificados, estão sendo feitas, ou serão feitas ou planejados mais experimentos/observações cosmológicas:

- Os que já foram feitas, mas com **maior precisão**.
- **Gerar e detectar** as partículas exóticas da **Matéria Escura** em **aceleradores de partículas**, p. e. no LHC no CERN em Genebra (Suíça/França).
- Elaboração de **detectores** para a **detecção direta** da **Matéria Escura** (difícil sem saber, o que ela é...)

# (Possíveis) Observações Futuras

Já que uns **95 % do Universo** ainda **não** foram identificados, estão sendo feitas, ou serão feitas ou planejados mais experimentos/observações cosmológicas:

- Observar o fundo de **neutrinos**, na maioria emitidos na primeira fase da nucleossíntese, nos processos  $n \rightleftharpoons p^+$ , em  $t \approx 1$  s (quase impossível, especialmente, por que perderam muita energia desde então; o detector PTOLEMY vai tentar).
- **Detectar** as **ondas gravitacionais** emitidas na época da Inflação (muito fracas segundo a previsão...).
- ...



Universidade Federal do ABC

Astrobiologia

FIM PRA HOJE