Astrobiologia

Origem do Universo - Cosmologia

Prof. Pieter Westera
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.

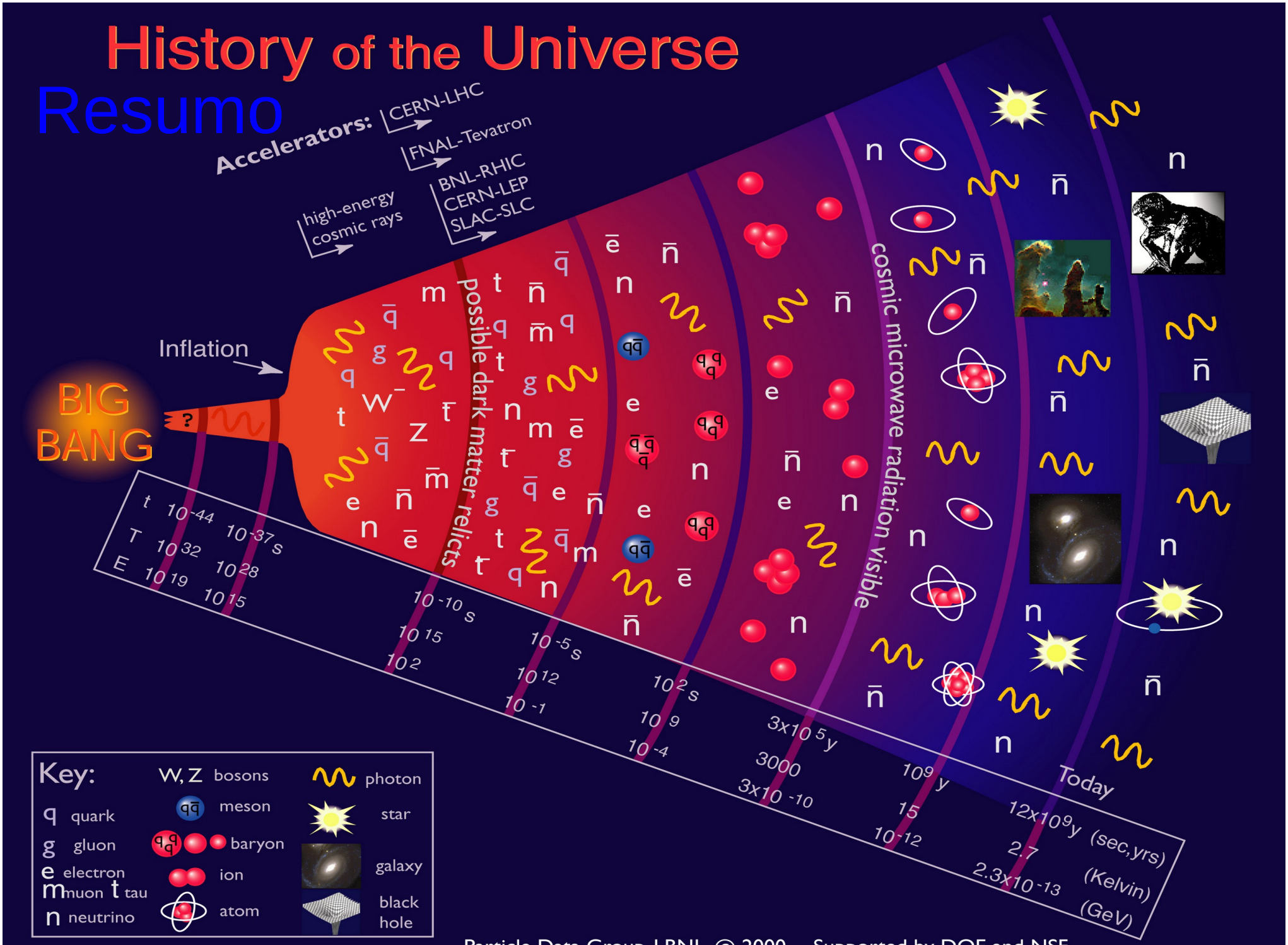
O modelo cosmológico mais aceito hoje em dia é a teoria do *Big Bang*.

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 singularide inicial.

History of the Universe

Resumo

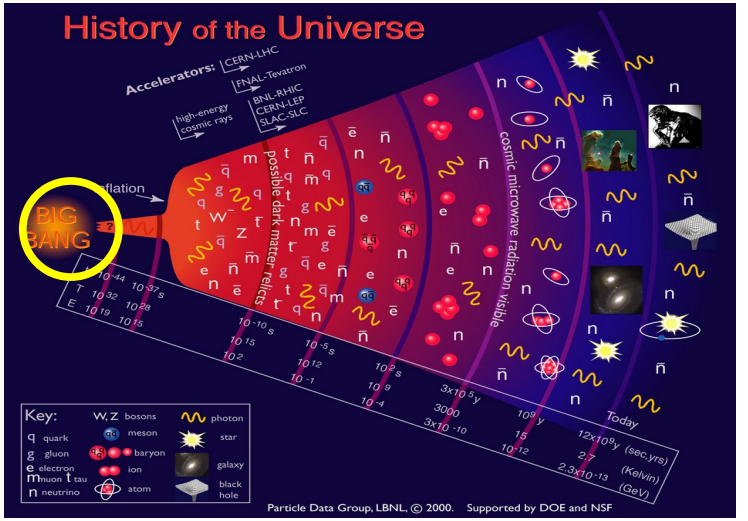


Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

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.

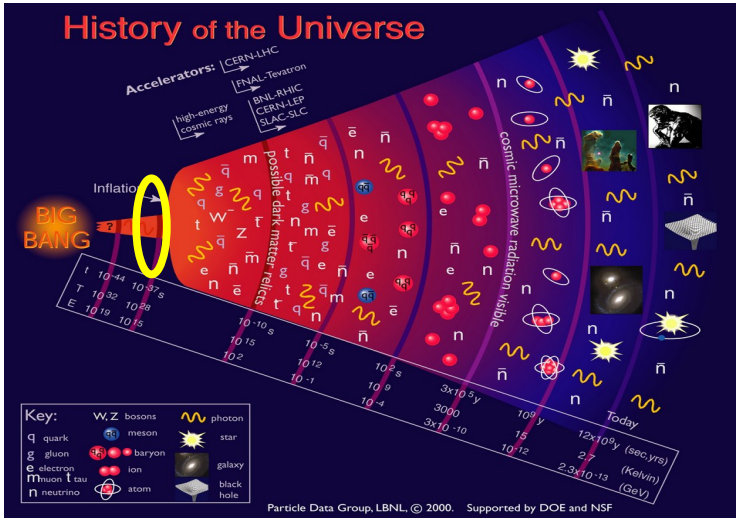
até ~$5 \cdot 10^{-44}$ sec ($T \geq 10^{32}$ K):

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 eletro-magnética, nuclear forte e fraca eram unificadas em uma.



O Universo consistia de uma “sopa” primordial de quarks (os constituentes dos prótons e dos nêutrons) e partículas transportadores de forças (fótons, grávitons, gluons, ...).
Matéria e anti-matéria se formavam e aniquilavam constantemente.

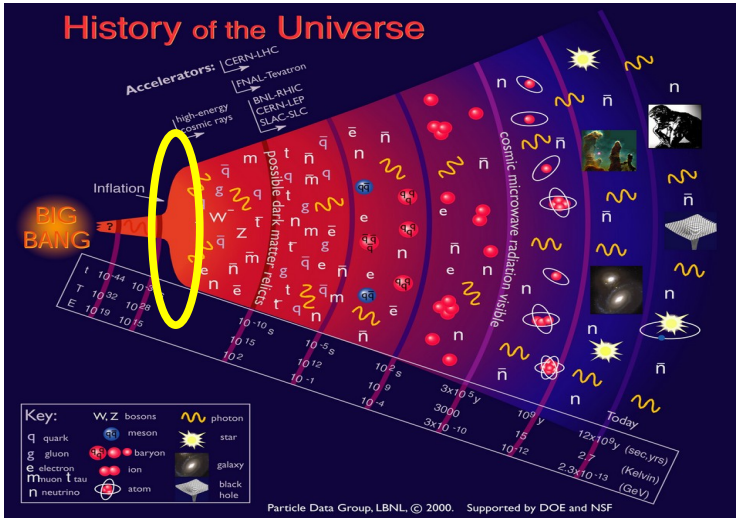
Teoria do *Big Bang*

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 fortes ondas gravitacionais.



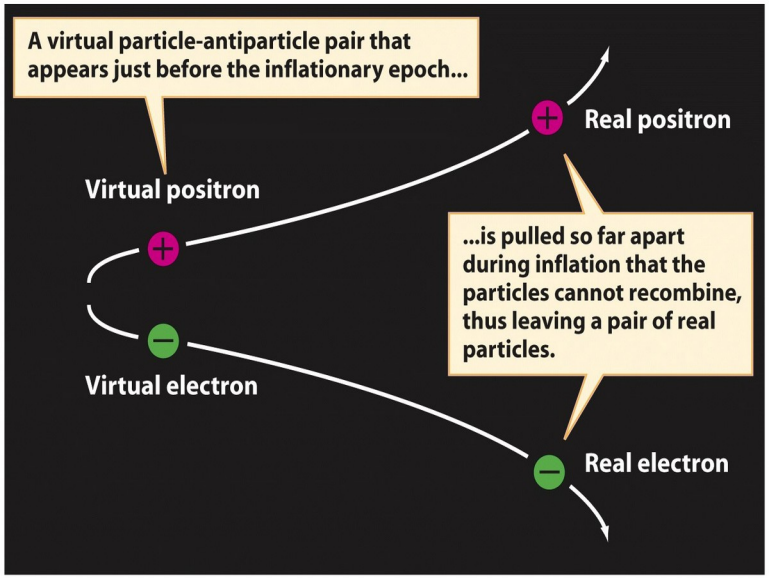
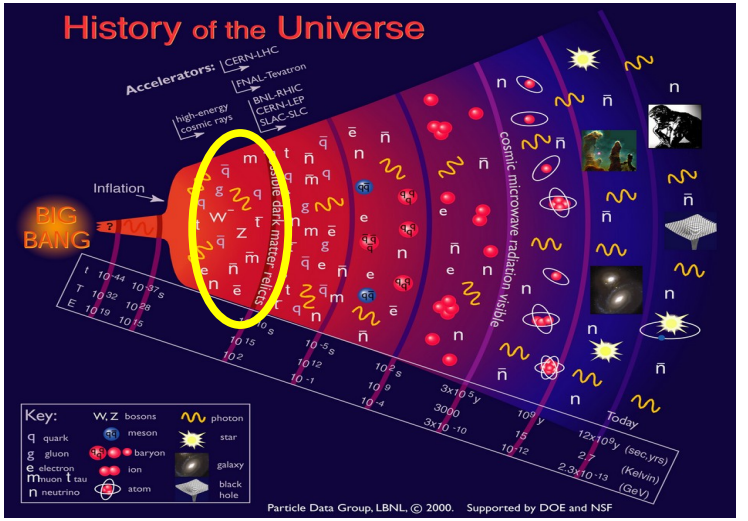


Figure 27-10
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Teoria do *Big Bang*

10^{-34} s – 10^{-11} s:
10^{28} K ≥ *T* ≥ 10^{15} K:



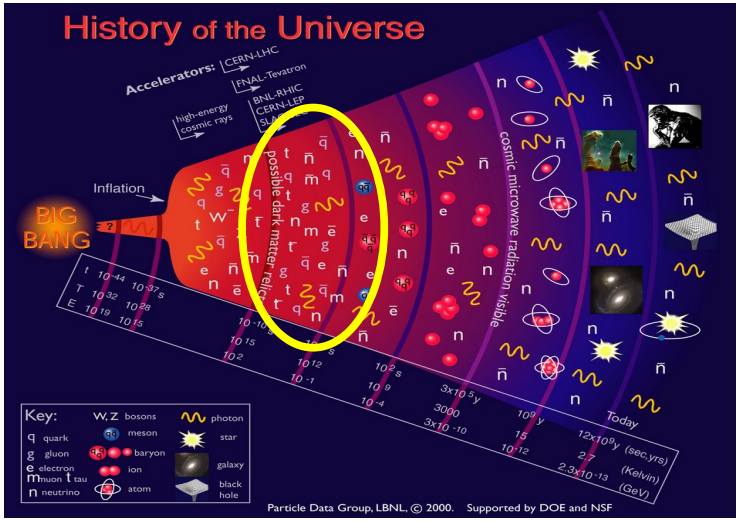
Época Eletrofraca: As forças eletromagnética e fraca ainda eram unificadas em uma, a força eletrofraca, enquanto a força forte já era uma força distinta.

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 ≥ *T* ≥ 10^{12} K:

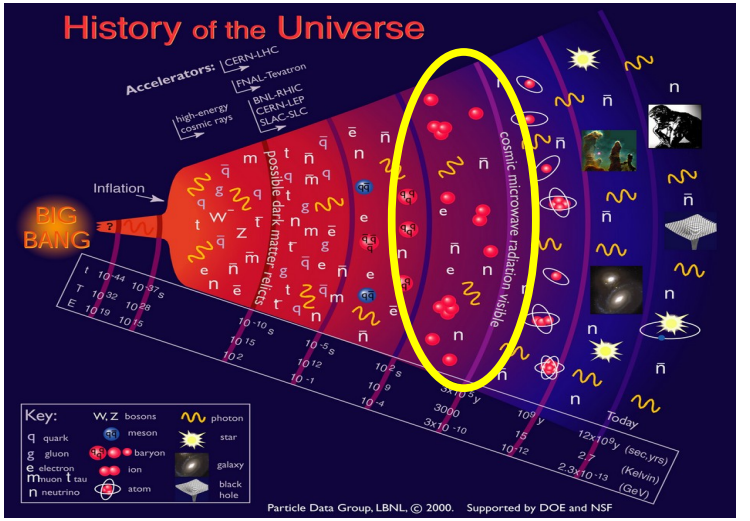
Época das Partículas:
As forças eletromagnética e fraca se "desacoplaram",
q. d. se tornaram duas forças distintas.



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} K ≥ *T* ≥ 10^{9} K:
Época da Núcleossintese:
Fusão nuclear dos prótons e nêutrons, formando núcleos de hélio e um pouquinho de deuterio, lítio e berílio.

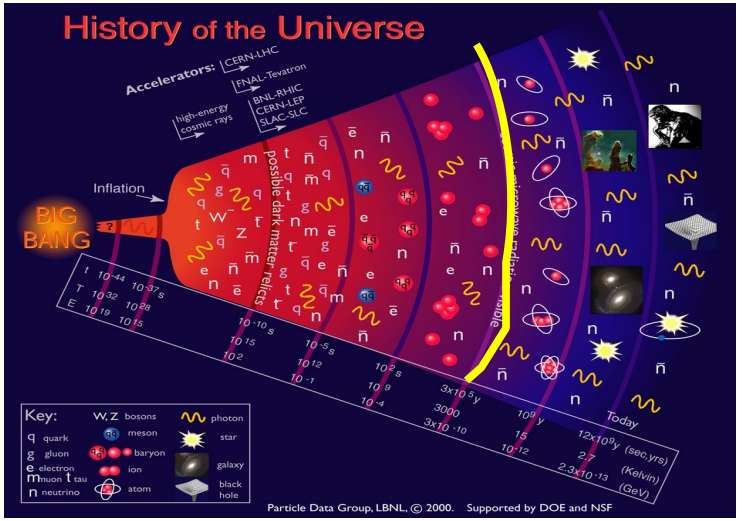


=> composição química primordial do Universo:
H (~76 %), He (23 a 24 %), D (0.01 %), Li (< 0.01 %).
~98 % dos átomos de hoje

4 min – ~378 000 anos: 10^{9} K ≥ *T* ≥ 3000 K:
Época dos Núcleos: Núcleos e elétrons interagindo constantemente com fótons (“partículas de luz”).

Teoria do *Big Bang*

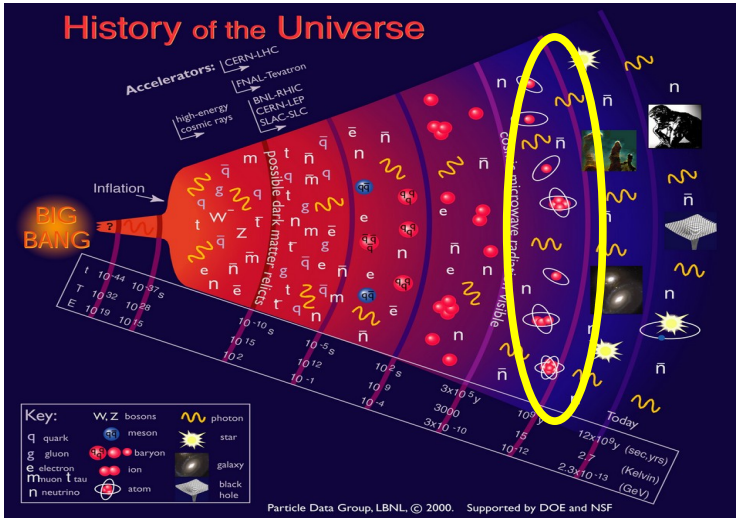
~378'000 anos, T ~3000 K:



Final da Época dos Núcleos "Re-combinação": núcleos e elétrons formando átomos: elétricamente neutros
=> não interagiam 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 (=> mais tarde nesta aula).

Teoria do Big Bang

A partir das 378 000 anos:
Época dos Átomos:
átomos e plasma consistindo de íons e elétrons.



Teoria do *Big Bang*

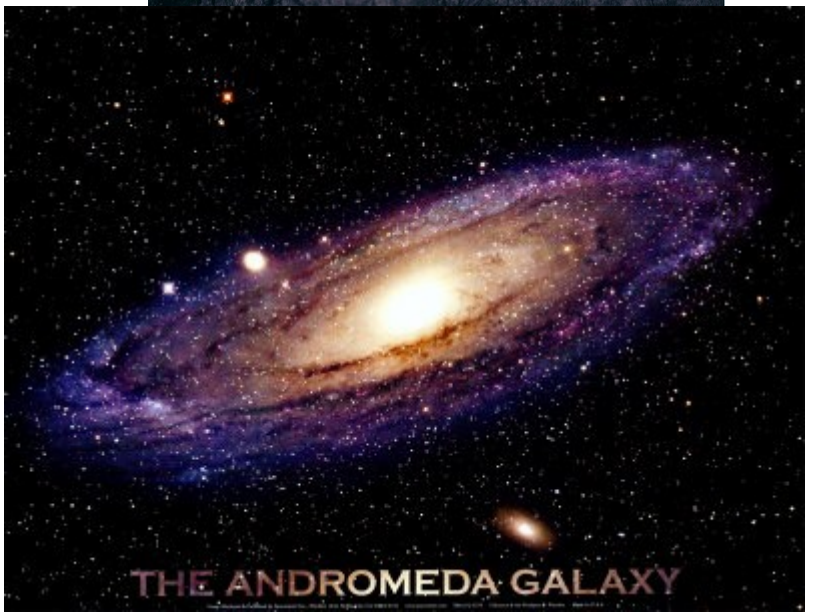
após alguns 100 mi. de anos
(T ~ 15 K):
Formação de estrelas e galáxias

A partir ~1 bi. de anos até hoje:
Época das galáxias

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

a Galáxia de Andrômeda

e outras



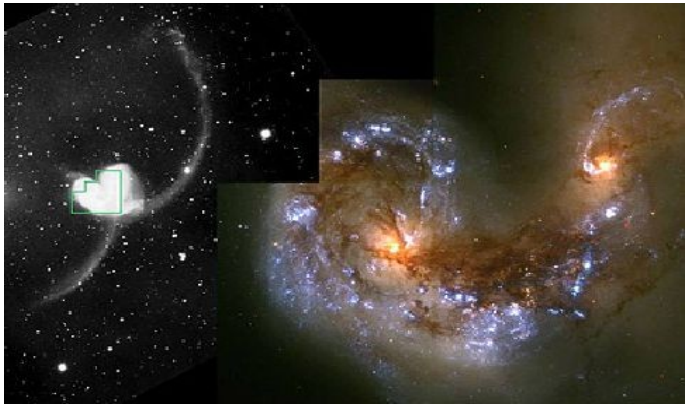
Teoria do *Big Bang*

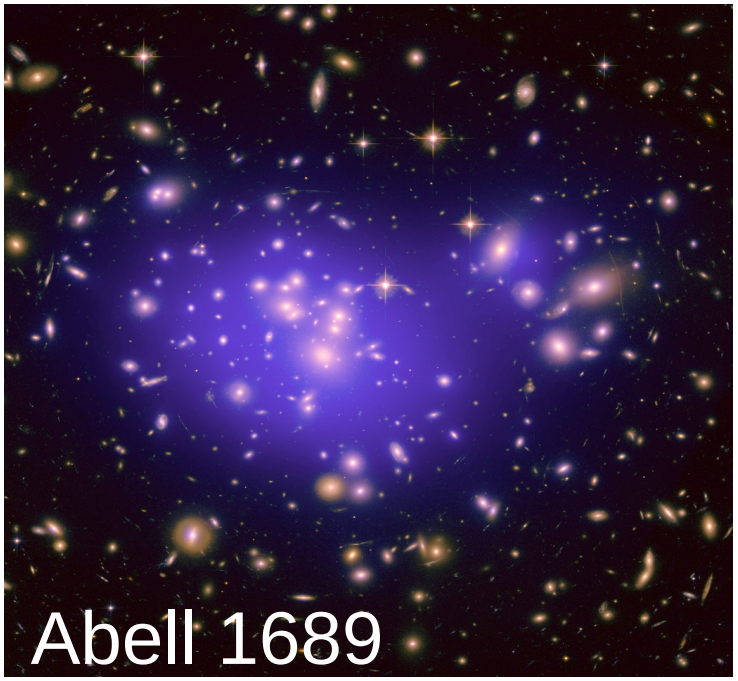
Desde então:
Galáxias fusionando para formarem galáxias maiores,

se juntando para formarem Aglomerados de galáxias,

e Super-Aglomerados, que são "aglomerados de Aglomerados".

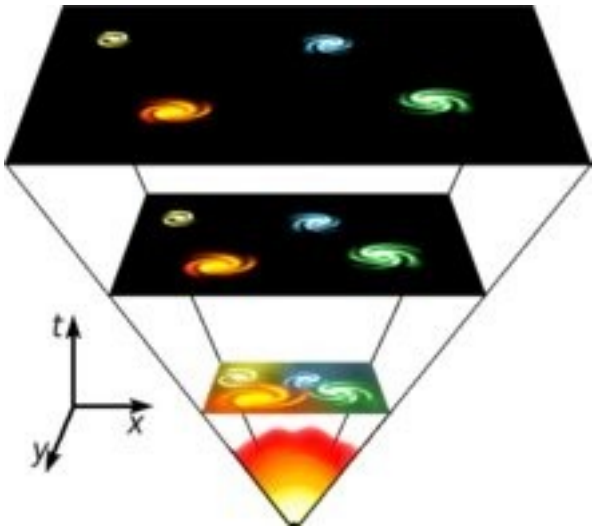
=> As estruturas se formam os menores primeiro, os segundo-menores depois, etc., às vezes chamado *bottom-up*, ("de baixo para cima").





Teoria do *Big Bang*

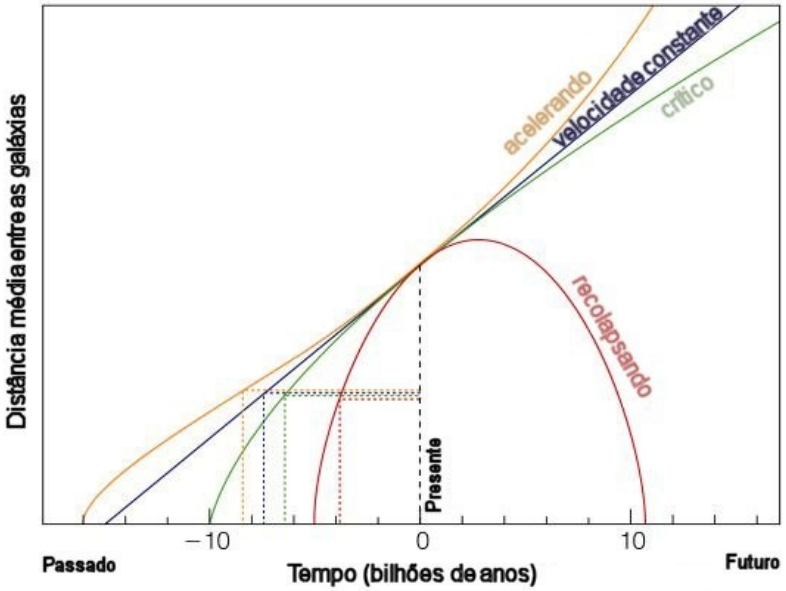
Enquanto isto, o Universo continua expandindo, q. d. as distâncias entre as galáxias e entre os Aglomerados de galáxias aumentam.



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

Teoria do *Big Bang*

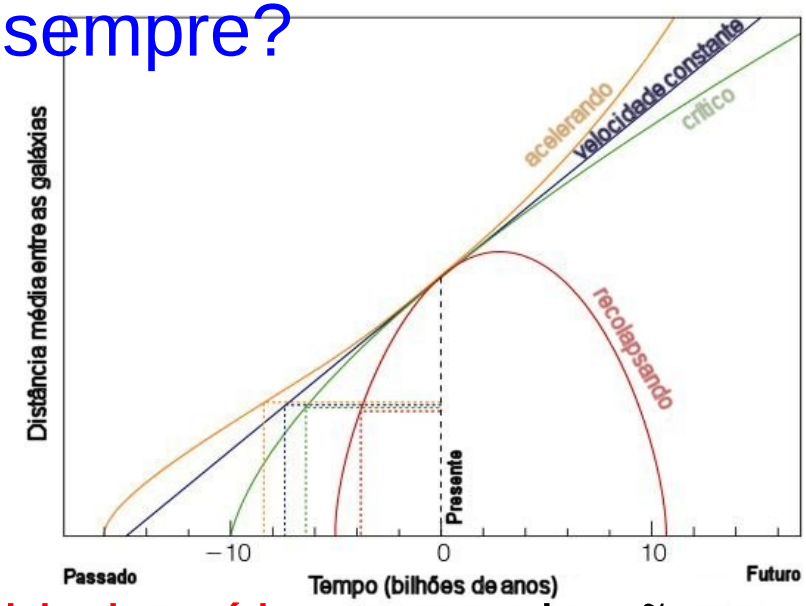
Medindo a taxa desta expansão, pode-se estimar o tempo decorrido desde que o Universo tinha tamanho zero, ou seja, o tempo decorrido desde o *Big Bang*, ou seja, a Idade do Universo.



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*).

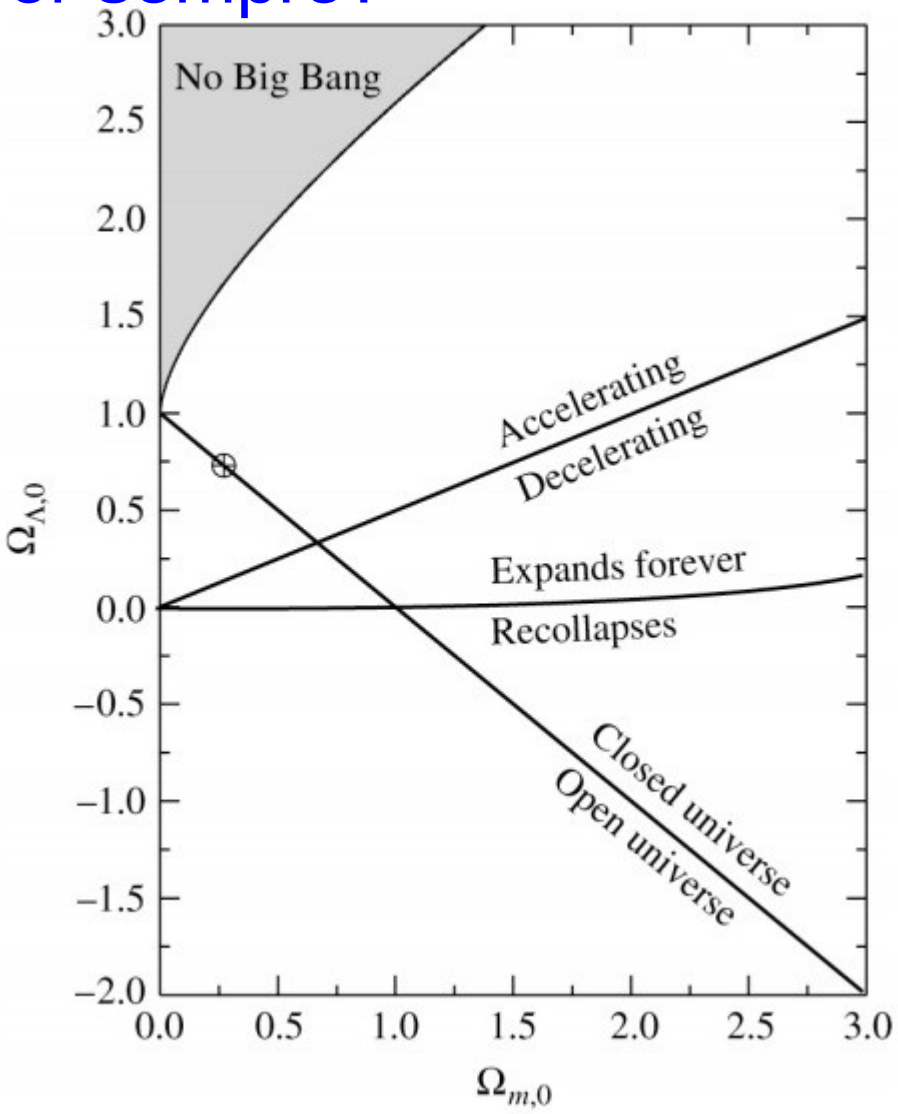
- A "Energia Escura", relacionada à constante cosmológica Λ, uma grandeza que surge da teoria da Relatividade, e que tende a acelerar a expansão.
Até recentemente, os cientístas acreditavam que Λ era 0.

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 $\Omega_{\Lambda,0}$.

(Ω é usado para densidades em unidades da densidade crítica, que depende da taxa de expansão, ou vice-versa.)



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*

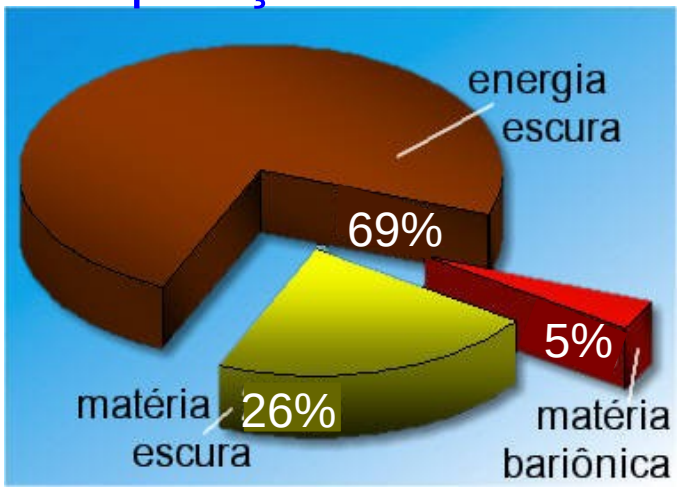
Esta expansão vai continuar por sempre?

- 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.

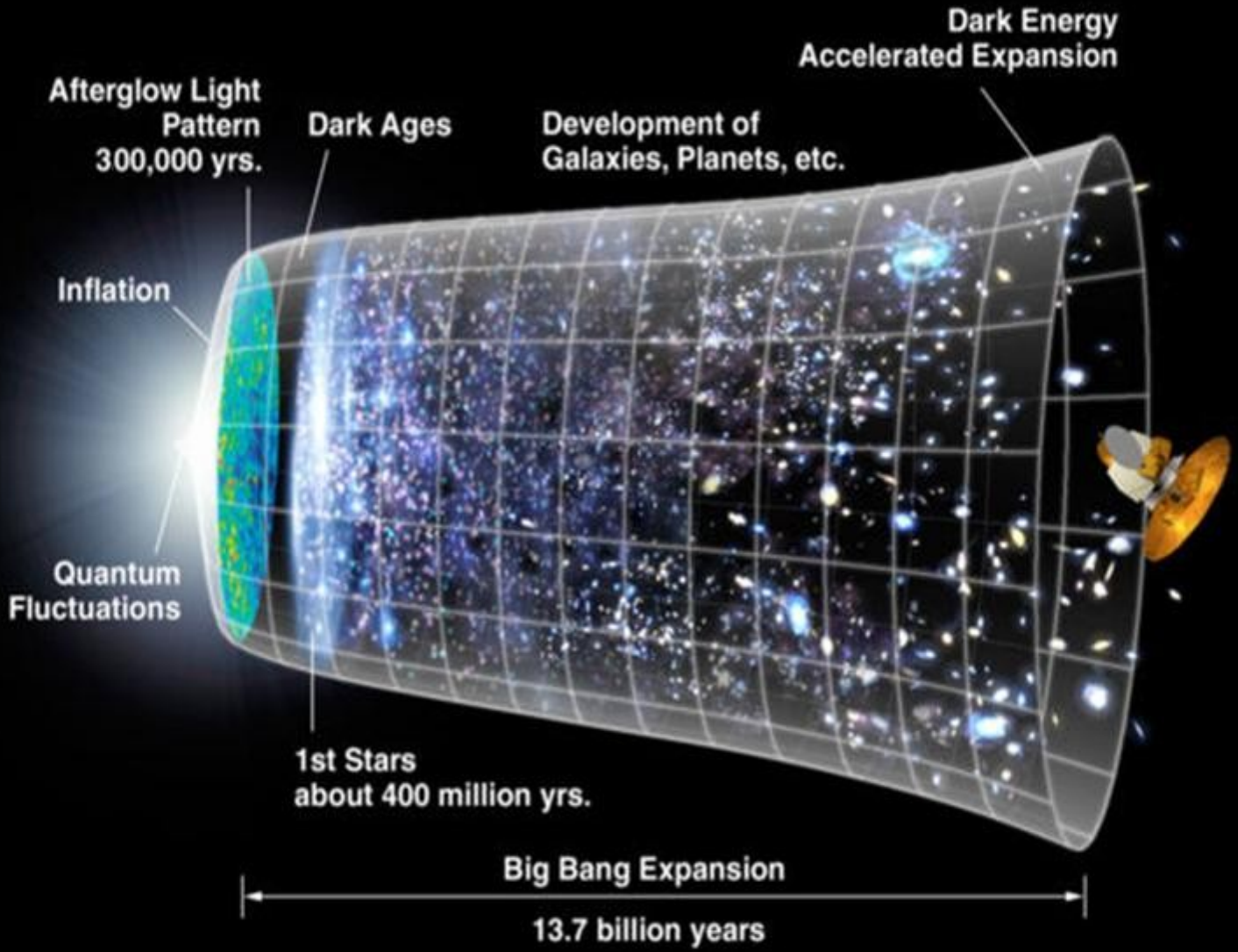
=> 95 % do Universo são de natureza desconhecida !!!
quer dizer: Matéria Escura e Energia Escura

Composição do Universo



O modelo cosmológico que contém todos estes ingredientes se chama ΛCDM (do inglês “Λ Cold Dark Matter”), ou modelo padrão.

Resumo


Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
300,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

Isto tudo parece papo de maluco.

De onde tiraram isto?

Evidências

Paradoxo de Olbers (1823)

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.

Como o céu de noite é escura, um dos dois (ou ambos), o tamanho ou a idade do Universo, deve ser finito (neste caso a idade).

=> Prova muito simples da idade finita do Universo.

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.

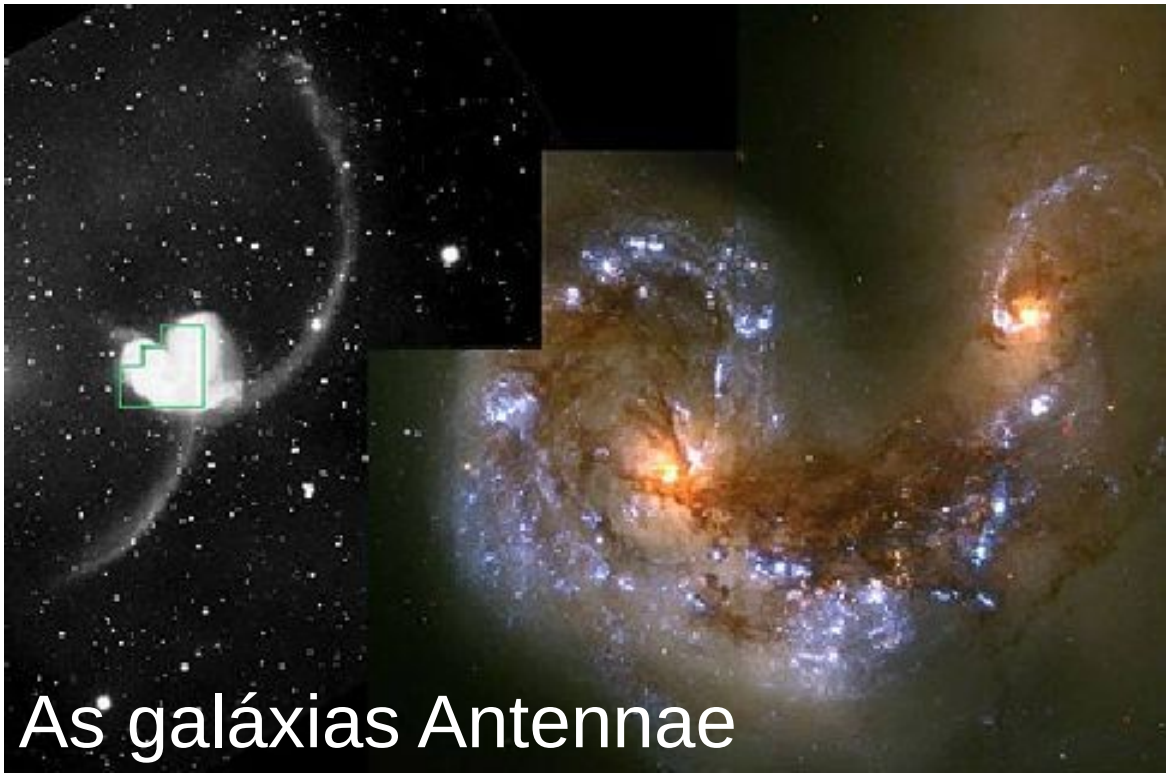
Evidências

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

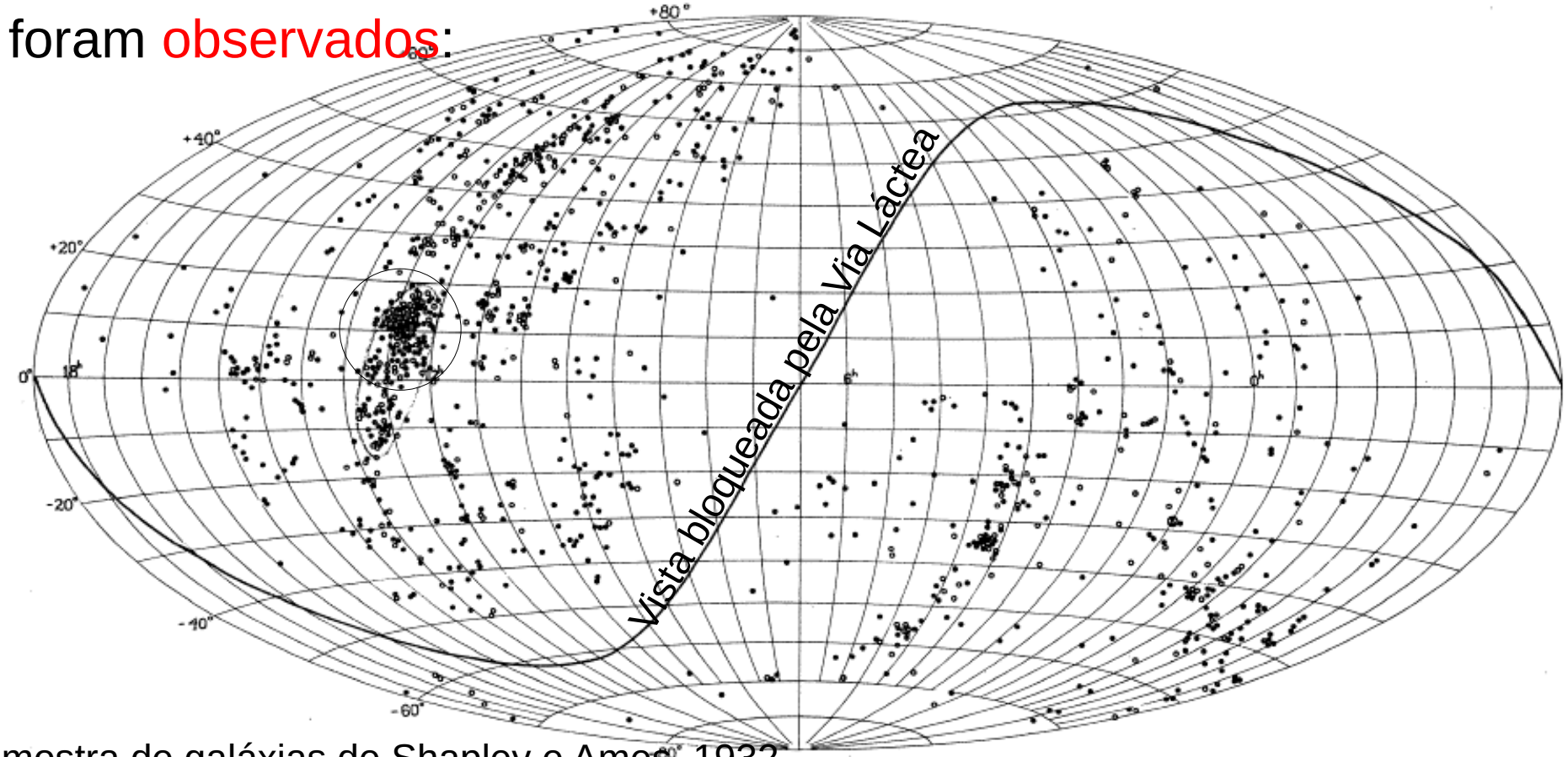
- e na distância:
- p. e. nas galáxias Antennae


As galáxias Antennae

Evidências

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

foram observados:

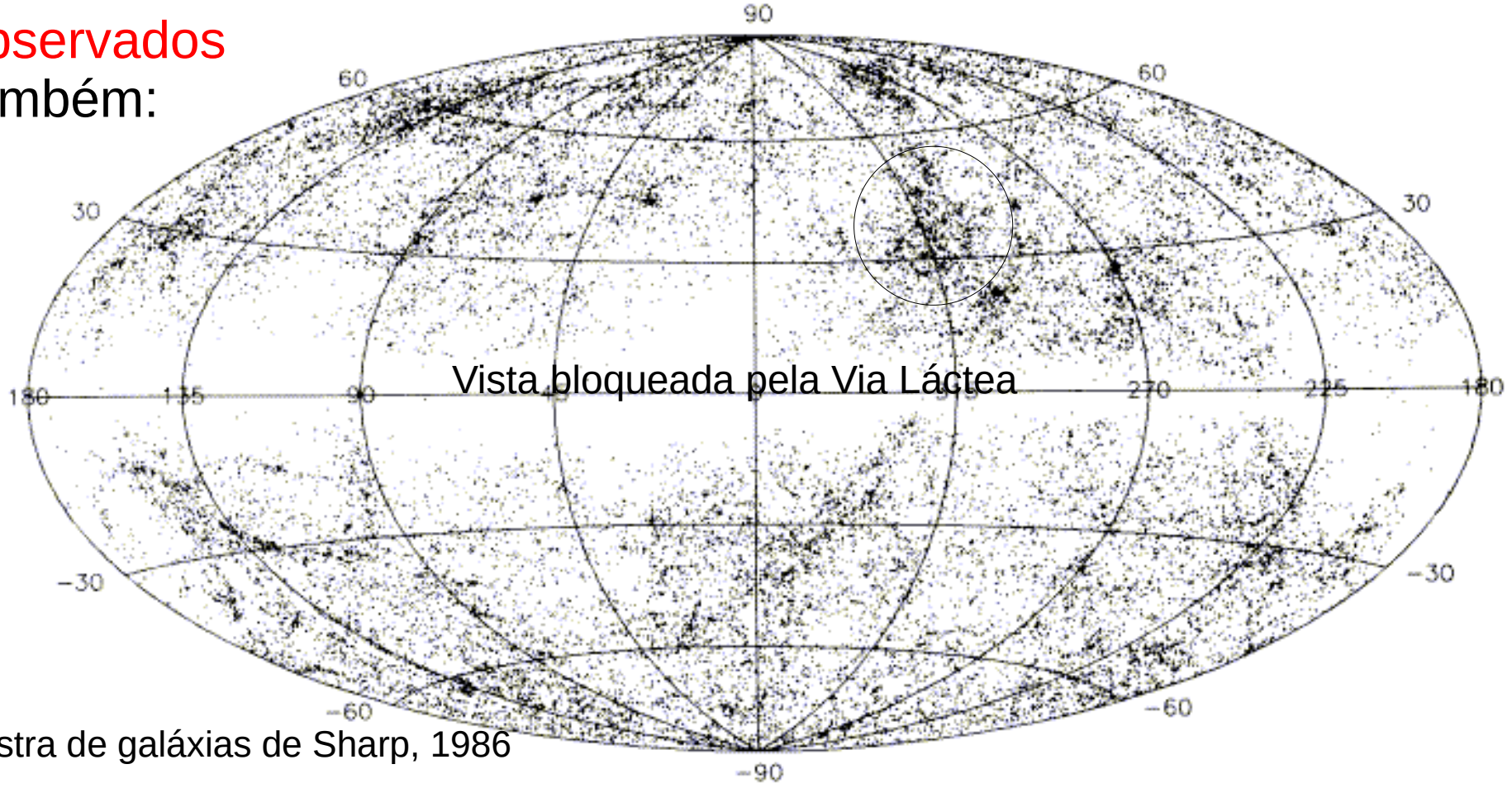


Amostra de galáxias de Shapley e Ames, 1932

Evidências

... ,e de Super-Aglomerados

observados
também:

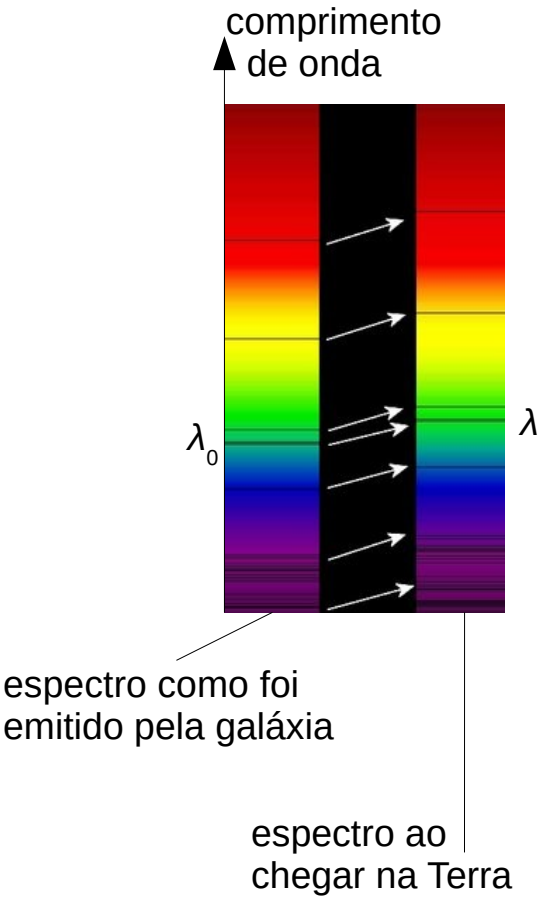


Amostra de galáxias de Sharp, 1986

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").

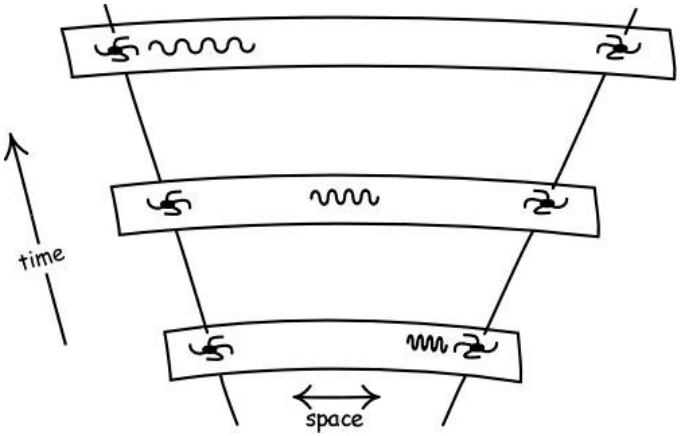
Interpretando este *redshift* como um efeito Doppler, isto significaria que estas galáxias estão se afastando de nós.

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 permea.

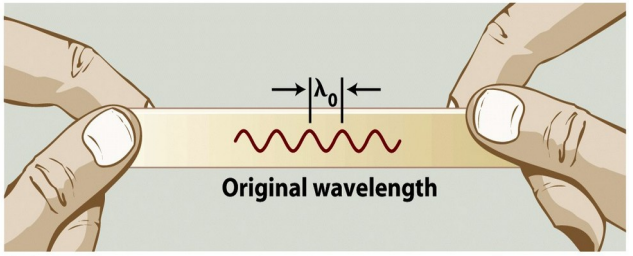


Os comprimentos de onda são esticados por um fator 1+*z*, onde *z* é chamado de *redshift* (cosmológico):

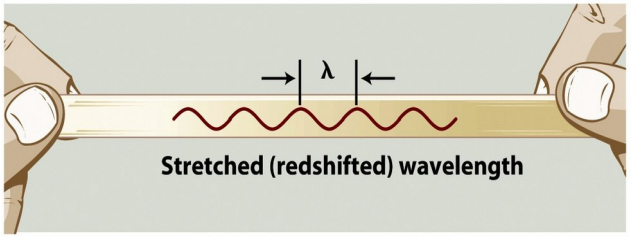
$$\lambda = (1+z)\cdot\lambda_0$$

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

$$v = c\cdot z$$



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



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

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

Evidências

Lei de Hubble-Lemaître (1929):

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

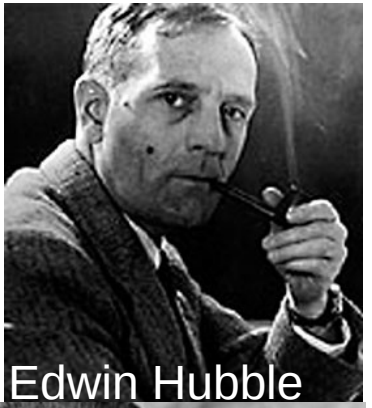
$$v = H_0 \cdot d$$

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

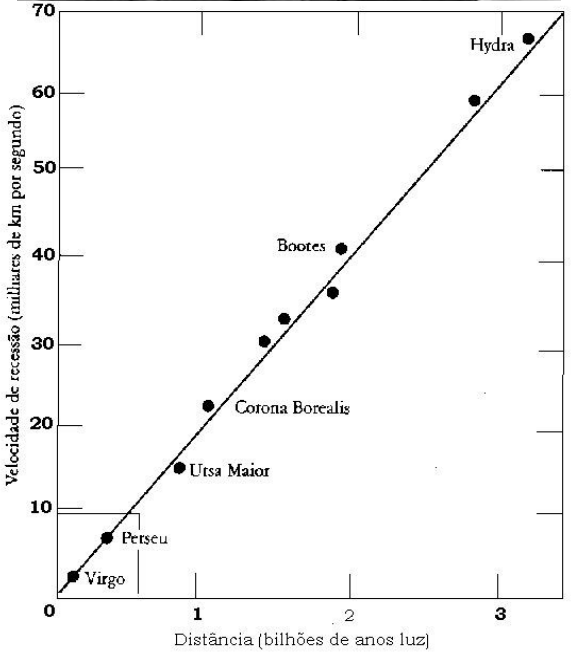
O valor da constante de Hubble foi um assunto controverso por décadas, mas hoje as opiniões convergiram para um valor de

~68 km/(s·Mpc),

1 pc ("parsec") = $30{,}857 \cdot 10^{12}$ km
= 3,26156 anos-luz


Edwin Hubble

Georges Lemaître



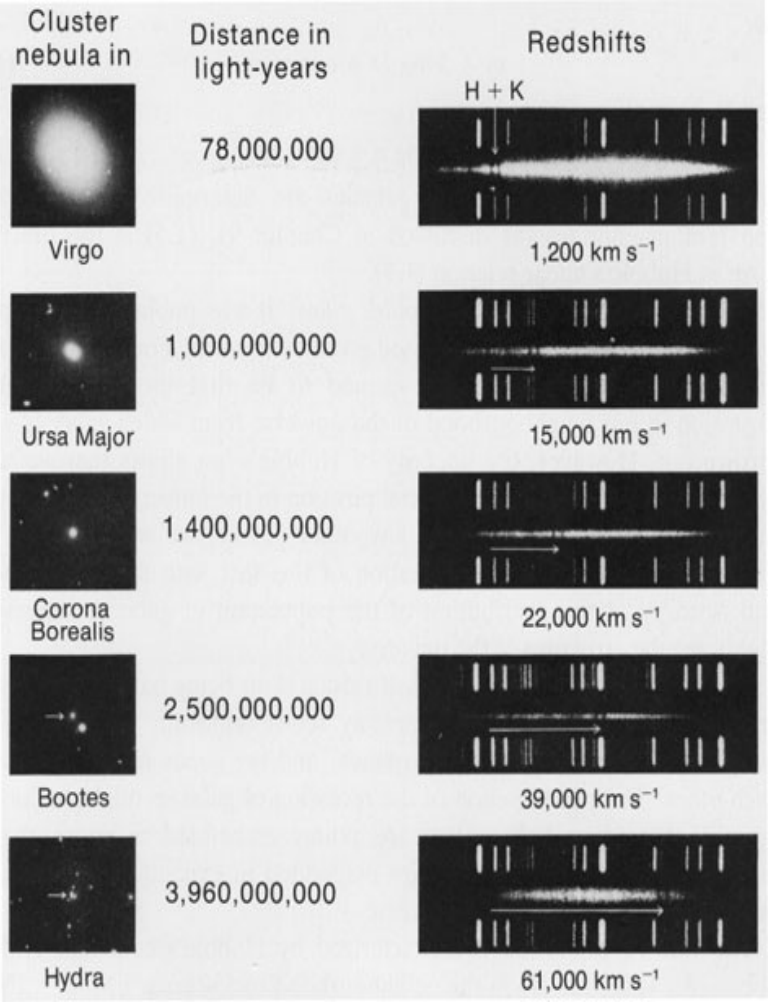
Evidências

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 a idade do Universo na época da emissão da luz.

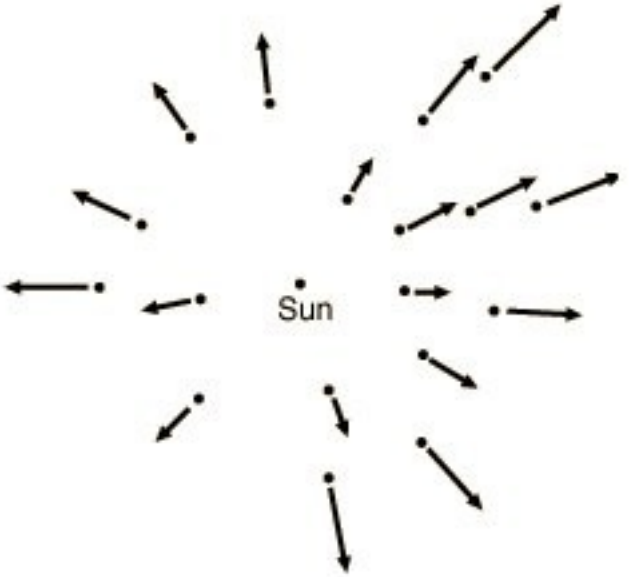
Quanto maior o *redshift*, tanto menor era a idade do Universo na época da emissão.



Evidências

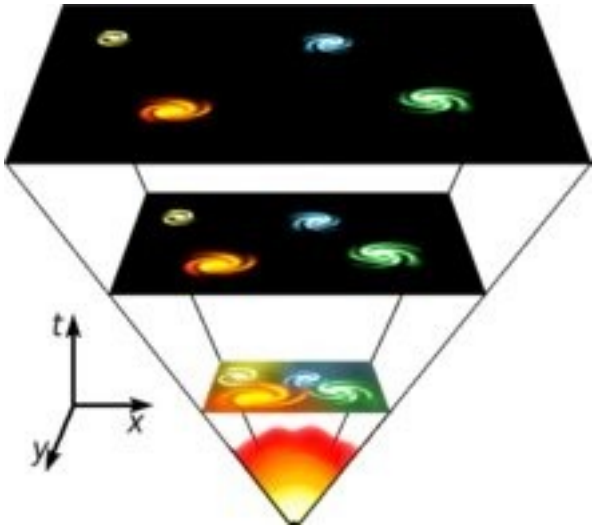
Lei de Hubble-Lemaître (1929):

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

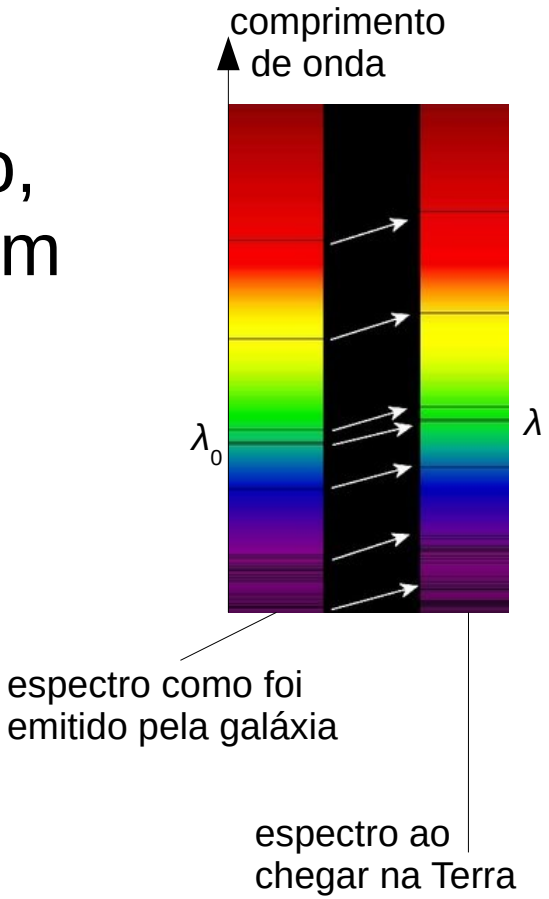
Lei de Hubble-Lemaître (1929):

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:

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

=> Distância $d = v/H_0 = c \cdot z/H_0$

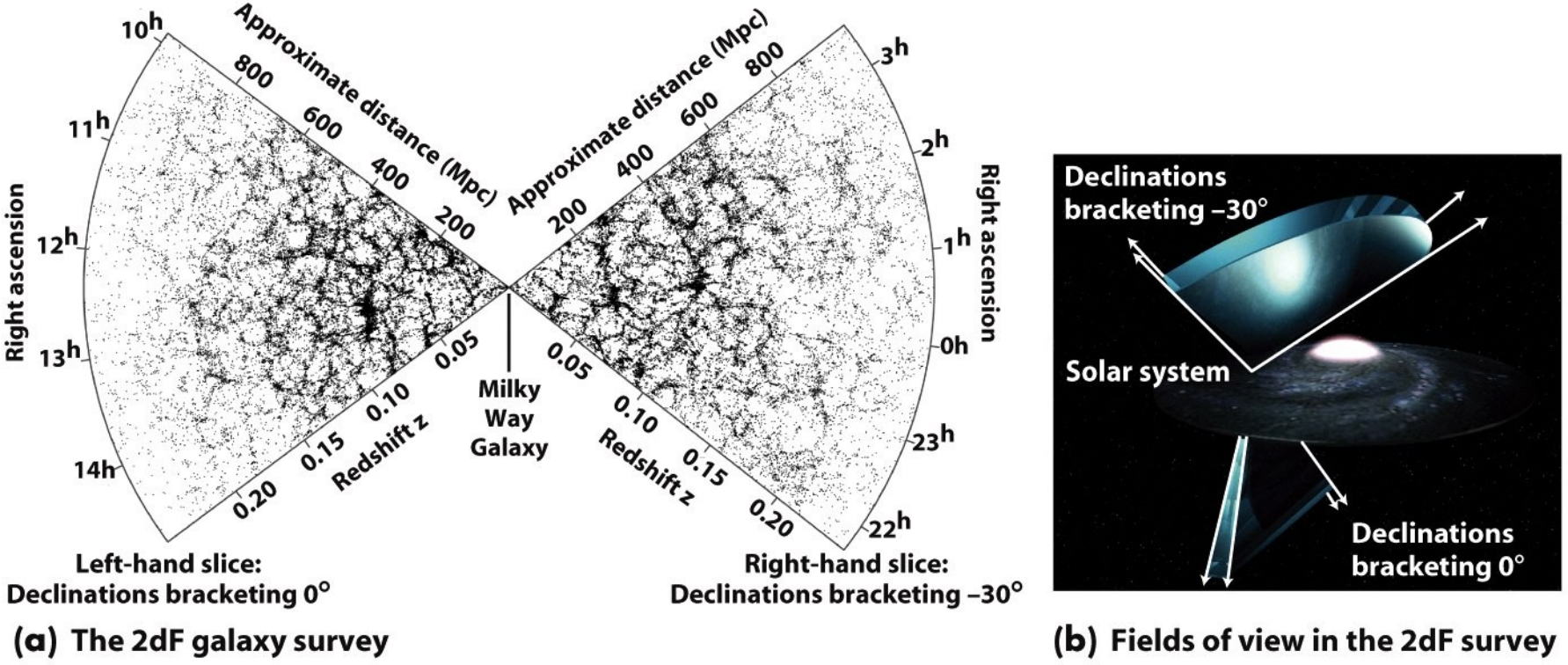


Isto foi feito para milhões de galáxias!

=> Amostras de *redshifts*

Evidências

Amostras de *Redshifts*



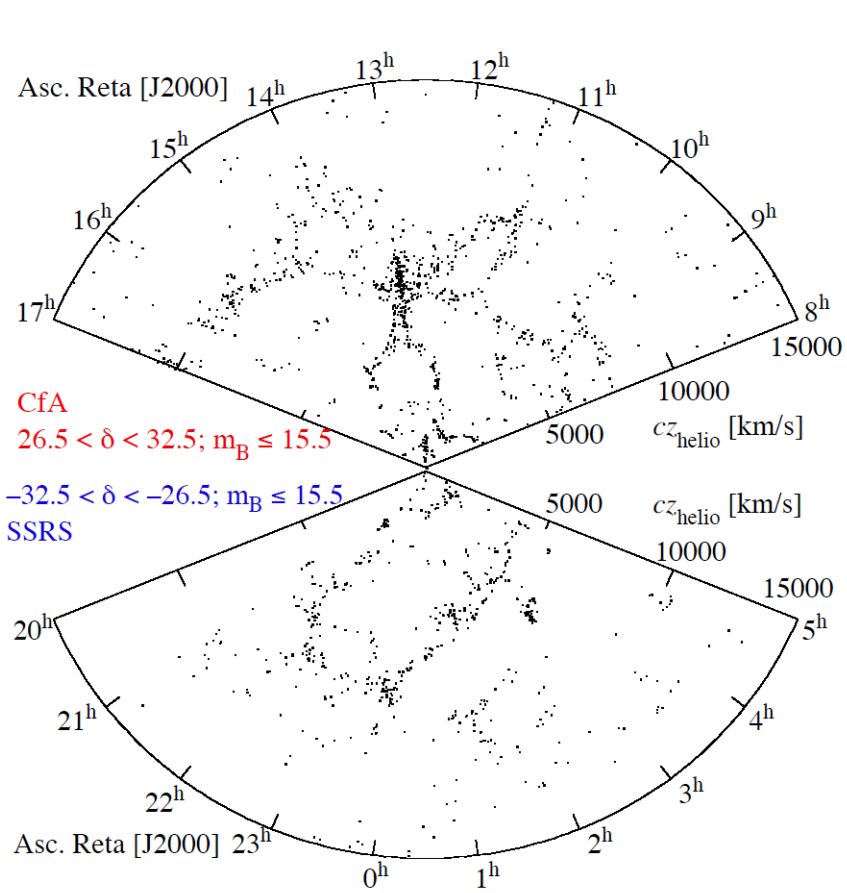
(a) The 2dF galaxy survey

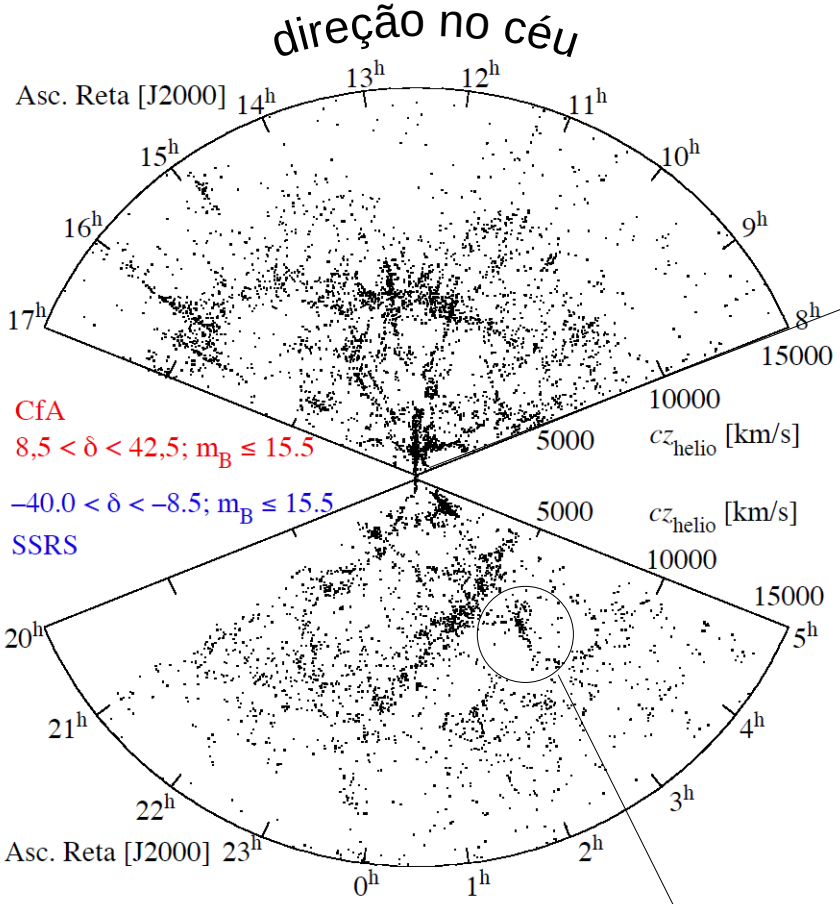
(b) Fields of view in the 2dF survey

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*





redshift z, corresponde à distância

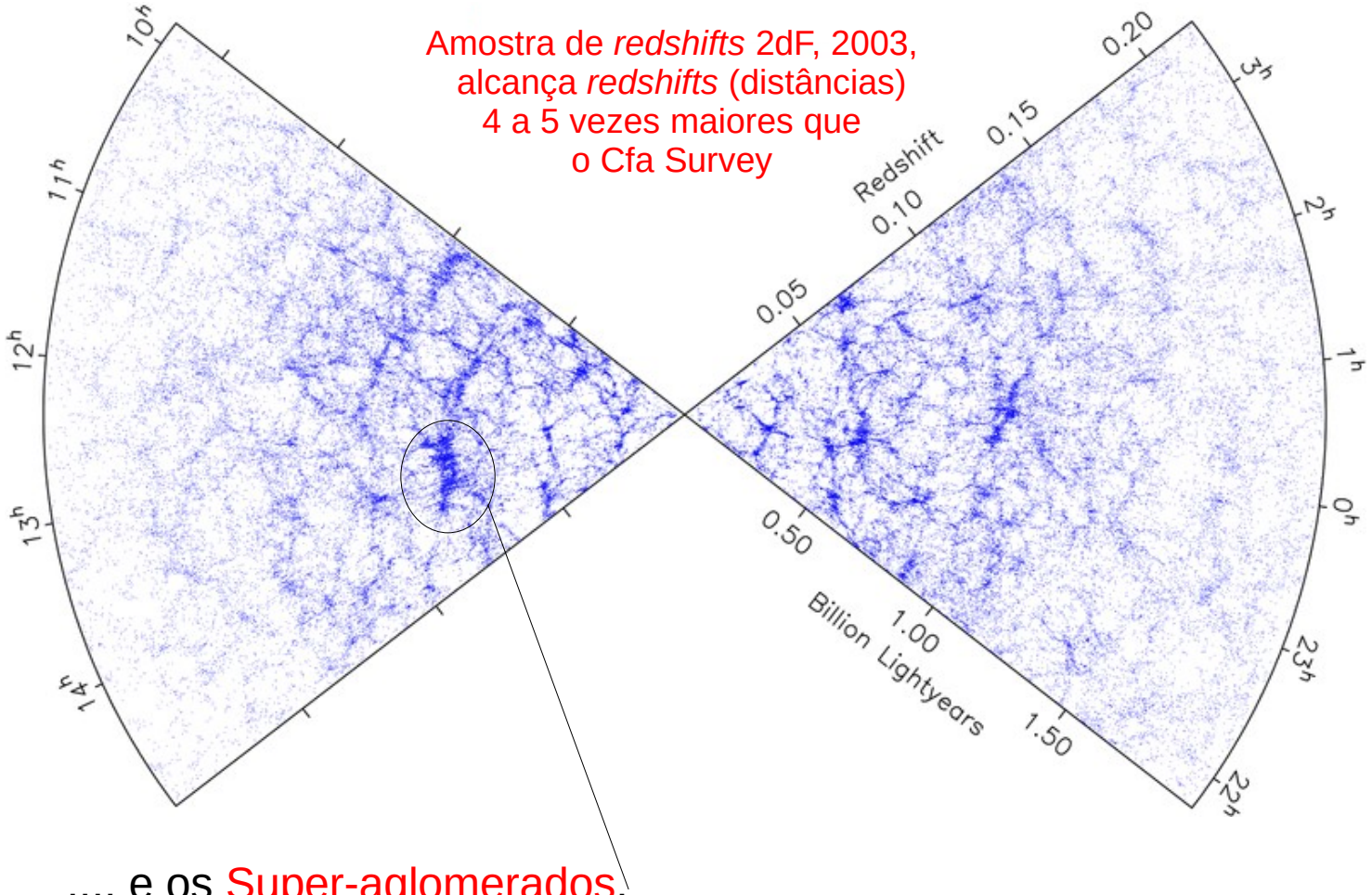
Cfa Survey, 1985

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

Evidências

Amostras de *redshifts*

Amostra de *redshifts* 2dF, 2003,
alcança *redshifts* (distâncias)
4 a 5 vezes maiores que
o Cfa Survey



..., e os Super-aglomerados.

Evidências

Amostras de *redshifts*

Resultados: galáxias agrupados em:

- Grupos: ≤ 50 galáxias, Raios ~ 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 ≥ 100 Mpc: Universo parece homogêneo

Radiacão Cósmica de Fundo

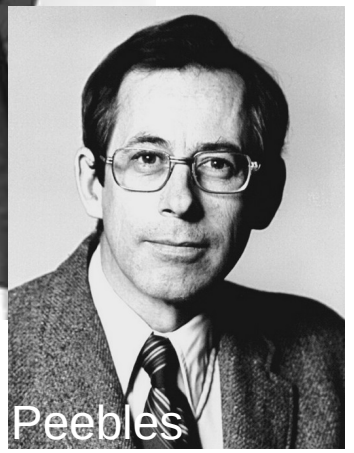
Гамов

- 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

Penzias e Wilson

=> Prêmio Nobel para Penzias & Wilson (1978)

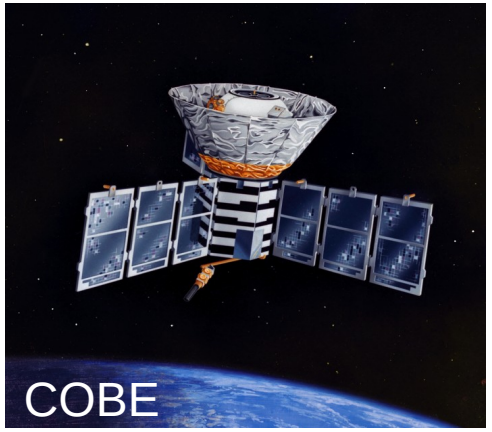
E em 2019, Peebles o recebeu por contribuições na cosmologia teórica

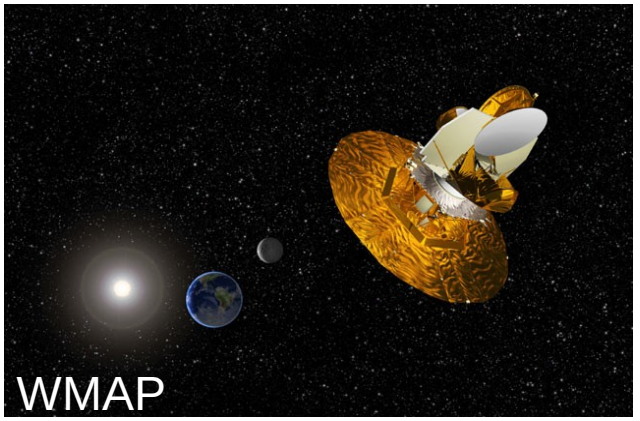

Peebles

Radiacão 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


COBE


WMAP

Planck

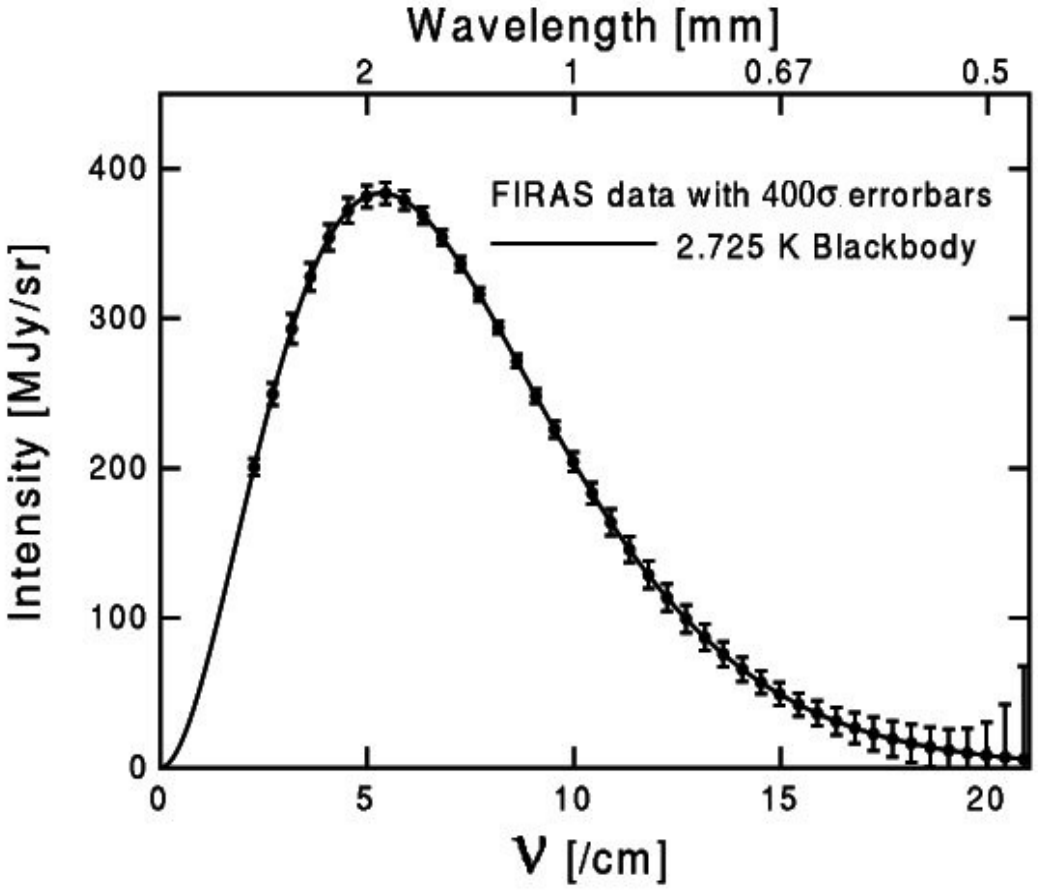
Radiacão Cósmica de Fundo

Espectro de Corpo Negro:

Na emissão (378 000 anos):
~3000 K

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

=> hoje: 2,725 K

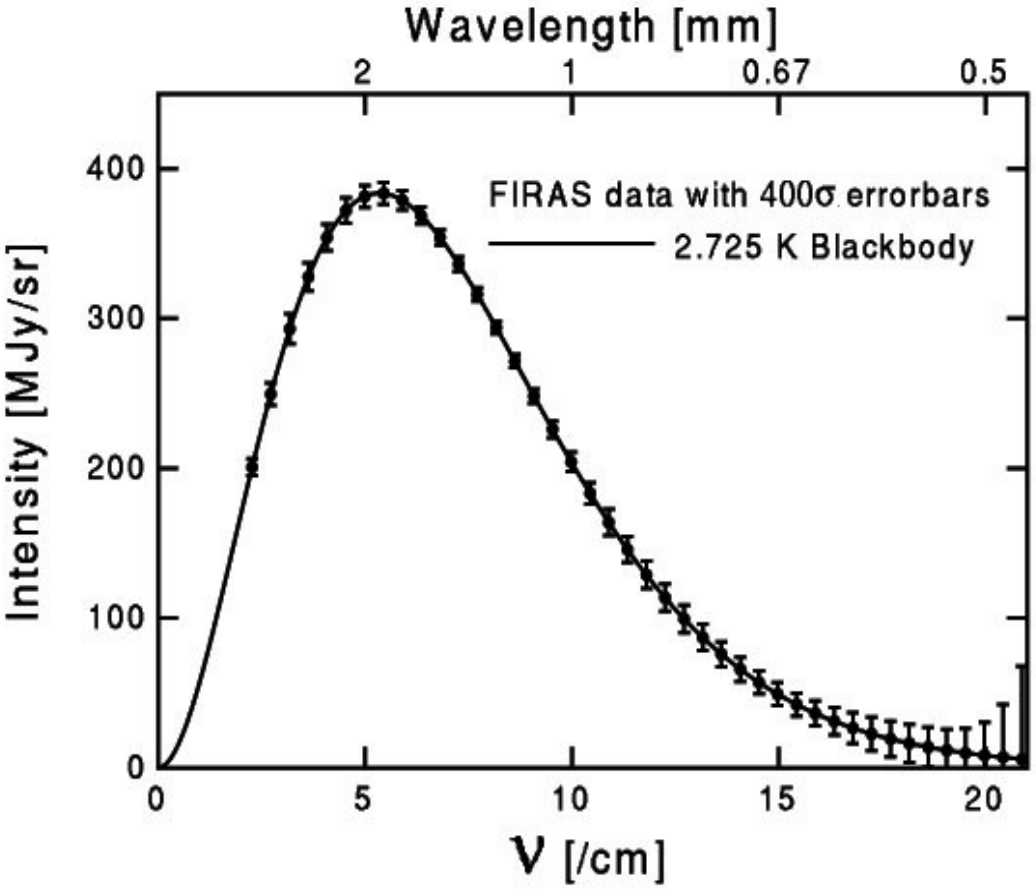


=> Prova, que a “Re-combinação” aconteceu, ou seja, uma evidência experimental d(e uma época logo após)o *Big Bang*, e mais uma prova pra expansão do Universo.

Radiacão Cósmica de Fundo

Espectro de Corpo Negro:

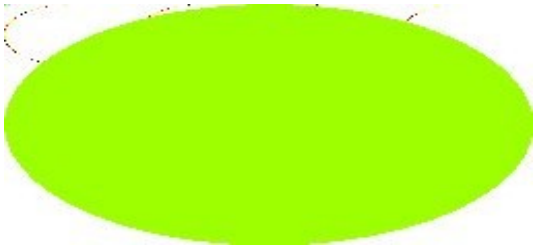
A descoberta do espectro quase perfeito de Corpo Negro e da anisotropia (=> jájá) da Radiacão Cósmica de Fundo rendeu o prêmio Nobel de física de 2006 aos responsáveis pelo projeto COBE, John C. Mather e George F. Smoot



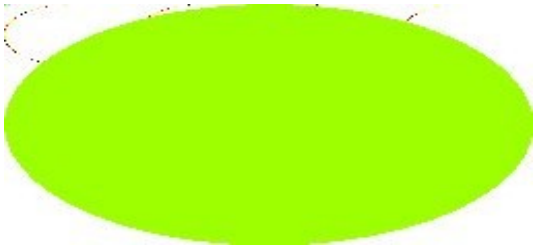
Radiacão Cósmica de Fundo

Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE



WMAP



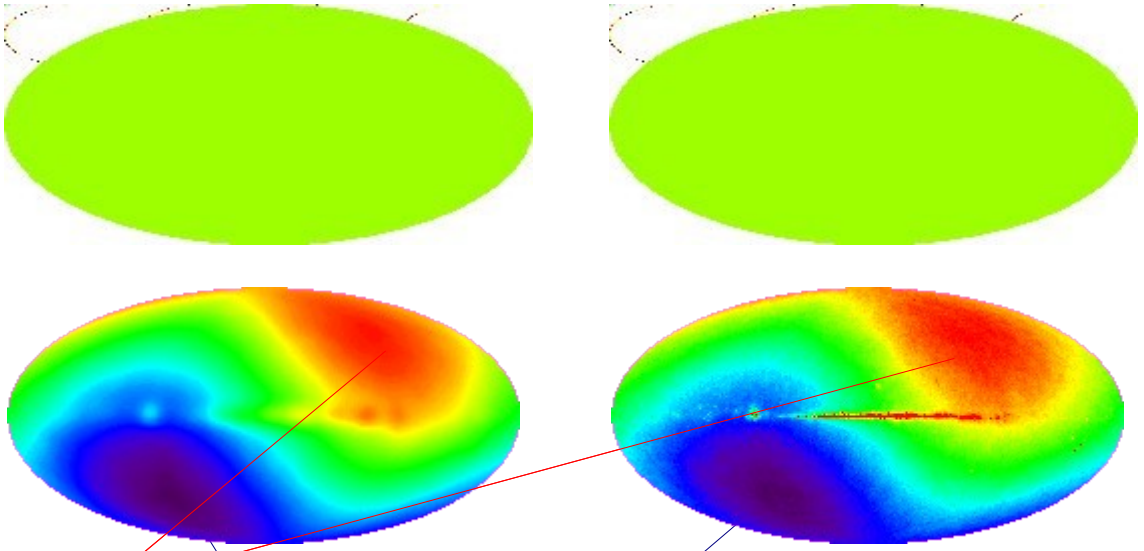
- Extremamente homogênea:
Azul 0 K
Vermelho 4 K

Radiacão 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

O Sol está se movimentando nesta direção (direção constelação do Leão) em relação ao referencial da Radiação Cósmica
=> efeito Doppler: detectamos a radiação com comprimentos de onda mais curtos
=> medimos uma temperatura da radiação mais alta

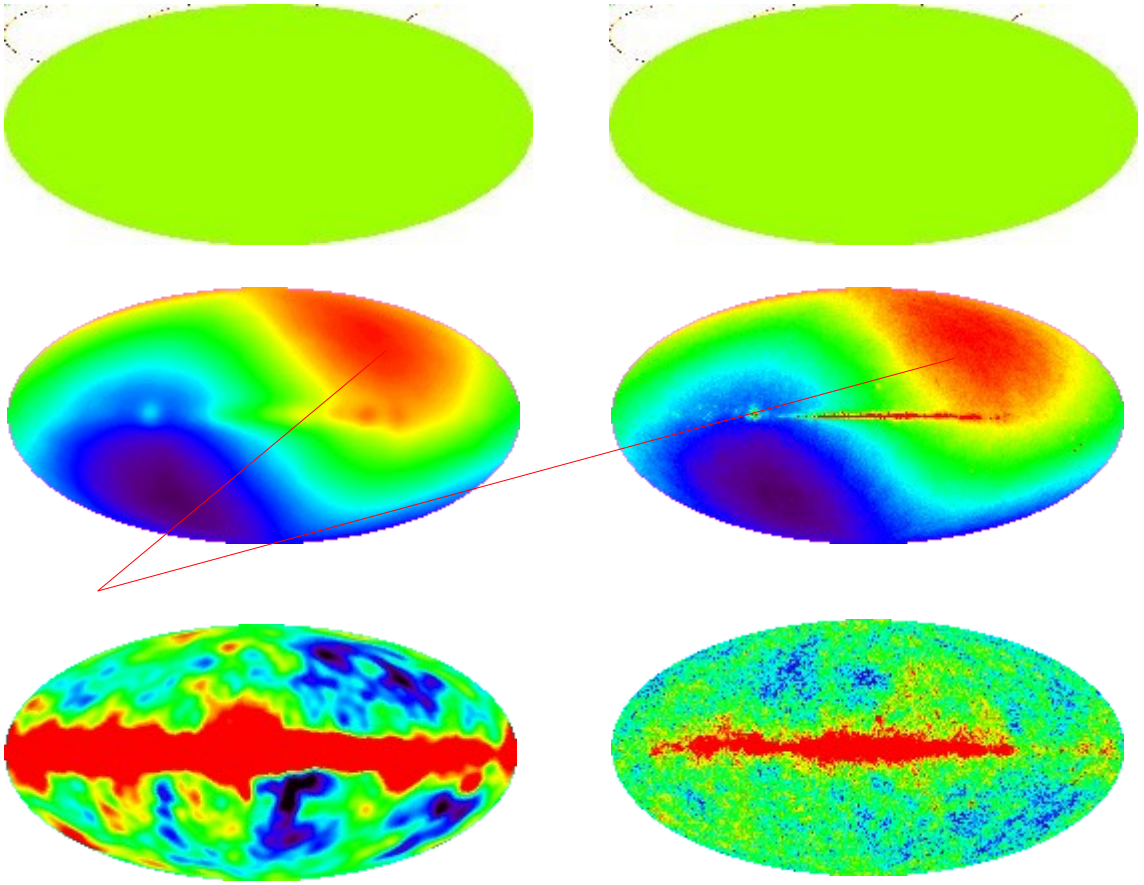
O Sol está indo pra direção oposta a esta direção (Aquário)
=> comprimentos de onda mais compridos => temperatura mais baixa

Radiacão Cósmica de Fundo

Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE

WMAP

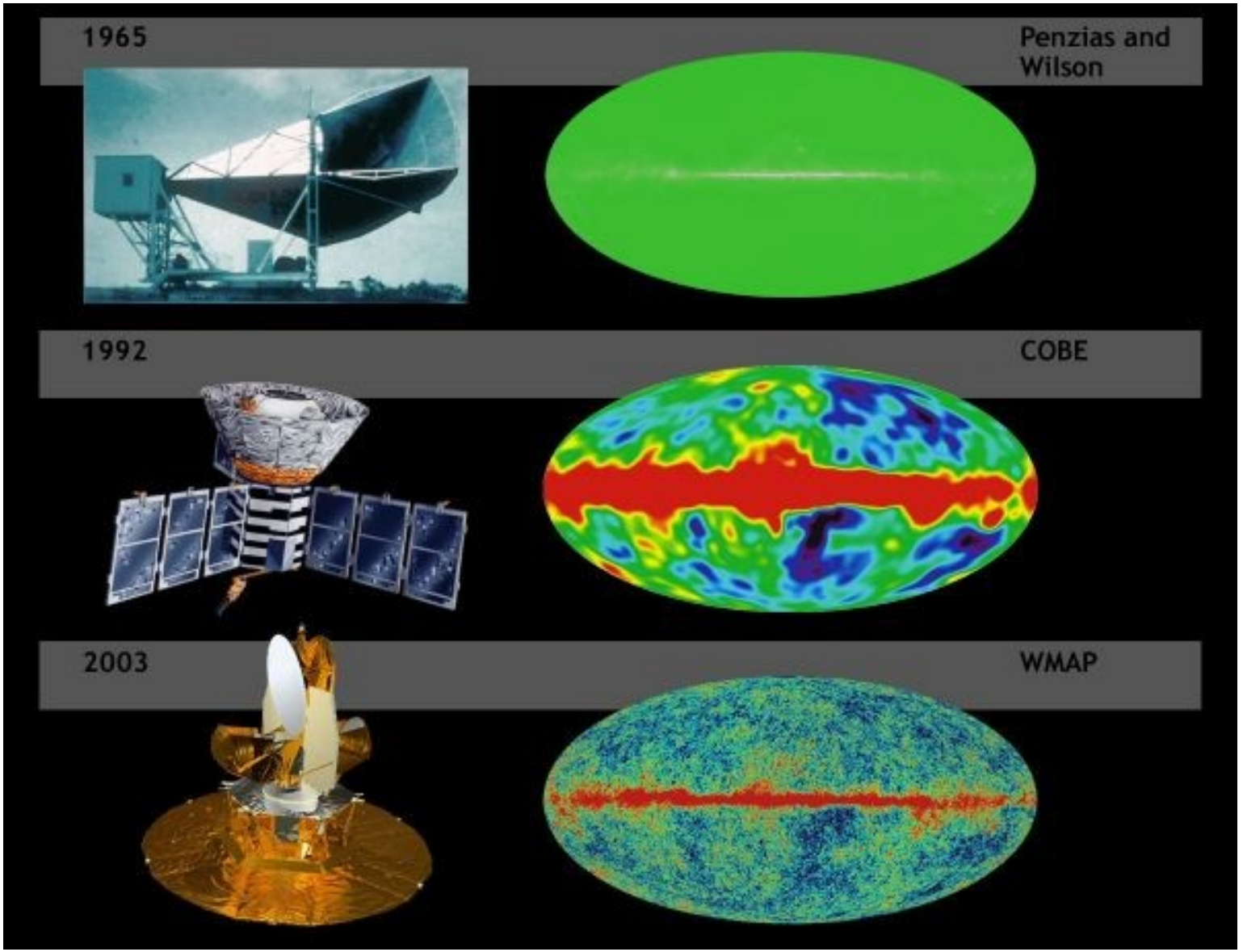


- Extremamente homogênea:
Azul 0 K
Vermelho 4 K

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

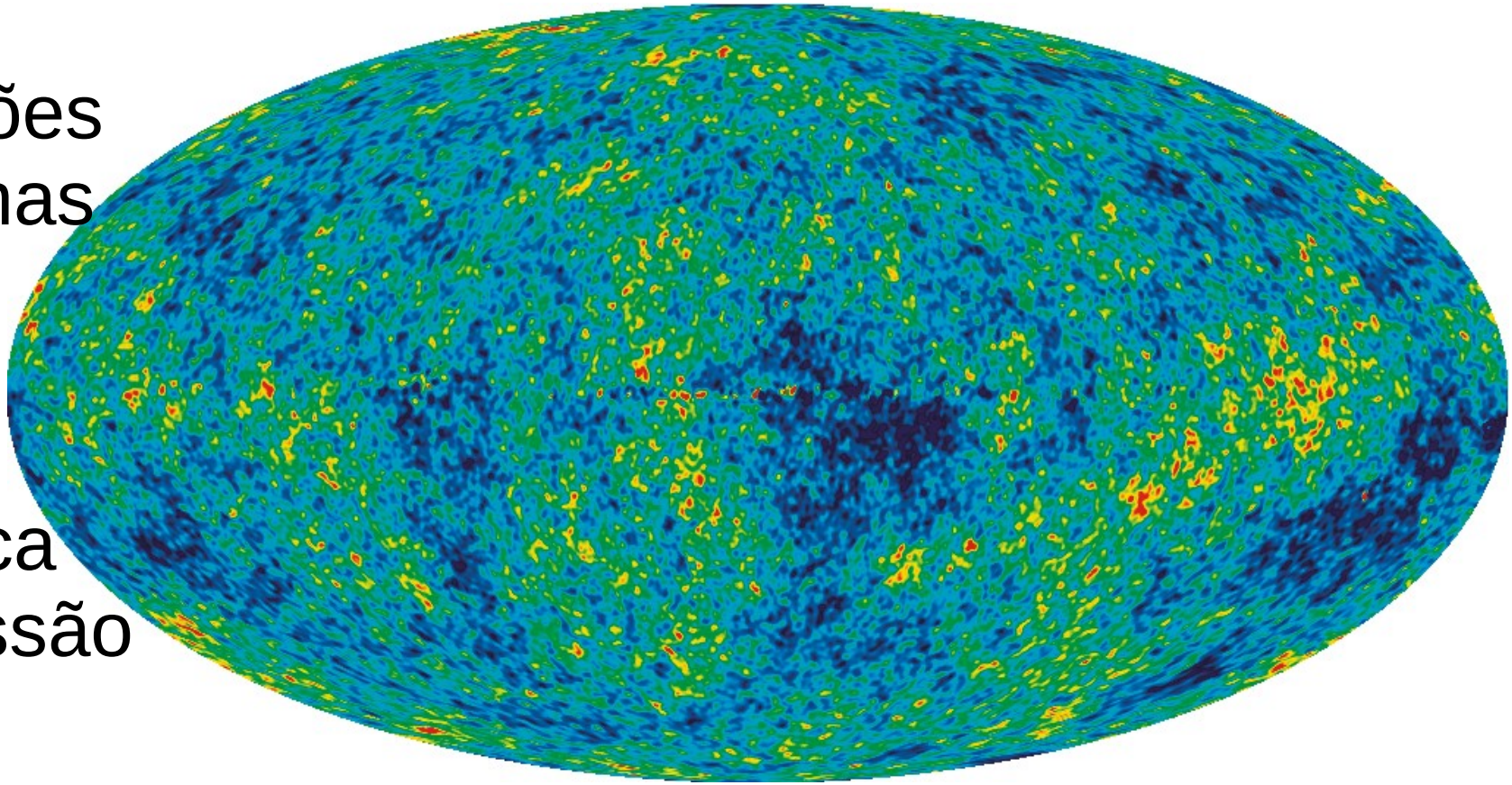
Radiacão Cósmica de Fundo



Radiacão Cósmica de Fundo

Após subtraida a contribuição da Via Láctea:

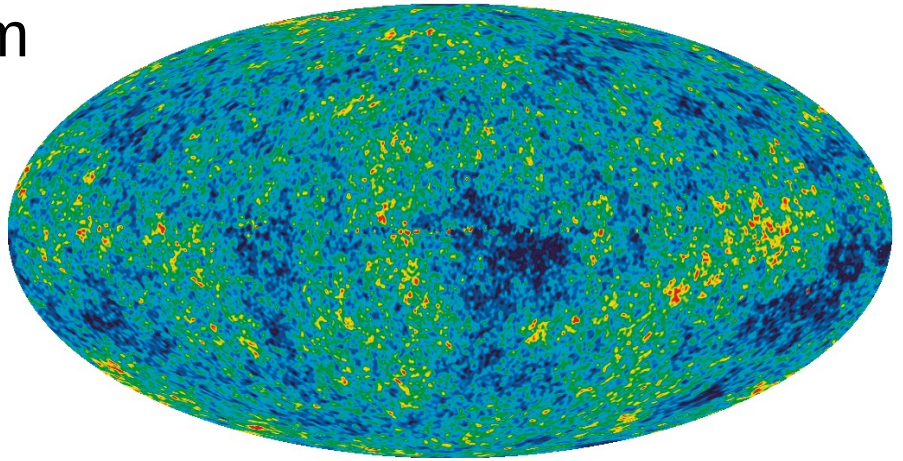
As regiões vermelhas eram mais densas na época da emissão



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

Radiacão 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 evoluido 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.

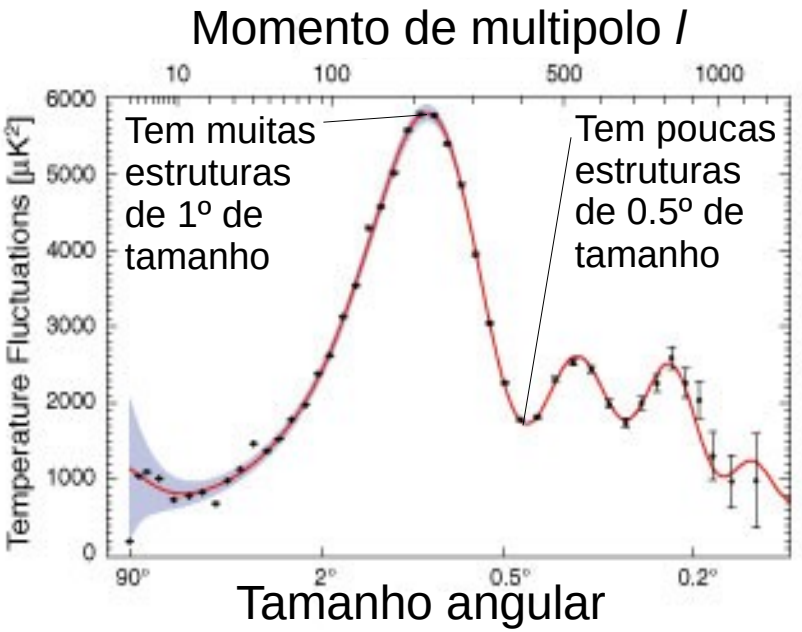
As galáxias e Aglomerados de galáxias se formaram nos poços de potencial gravitacional da Matéria Escura.

Radiacão 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.

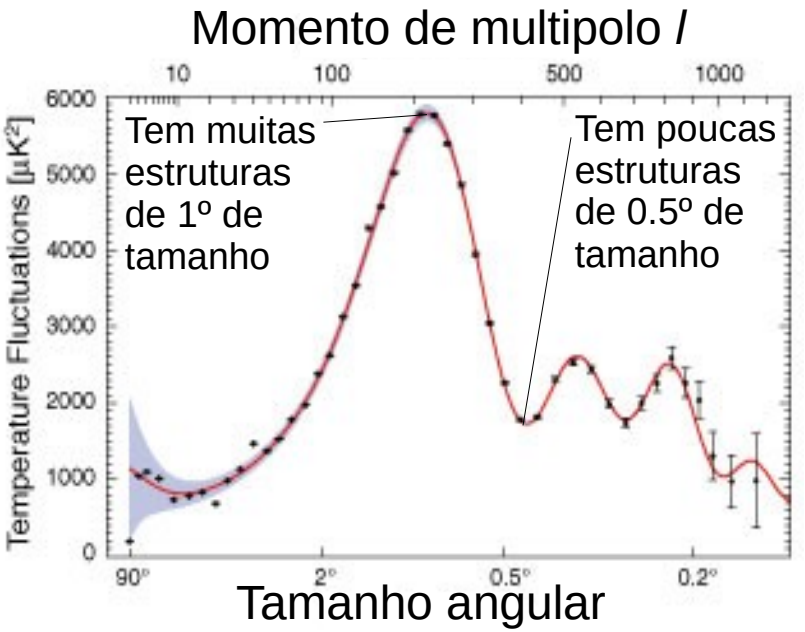


Radiacão Cósmica de Fundo

Espectro Angular da Radiação Cósmica de Fundo

Cálculos complicados mostram, que a posição do primeiro pico, a 1°, é uma medida para a densidade total (matéria visível + Matéria Escura + Energia Escura) no Universo.

=> A densidade total é igual à densidade crítica.



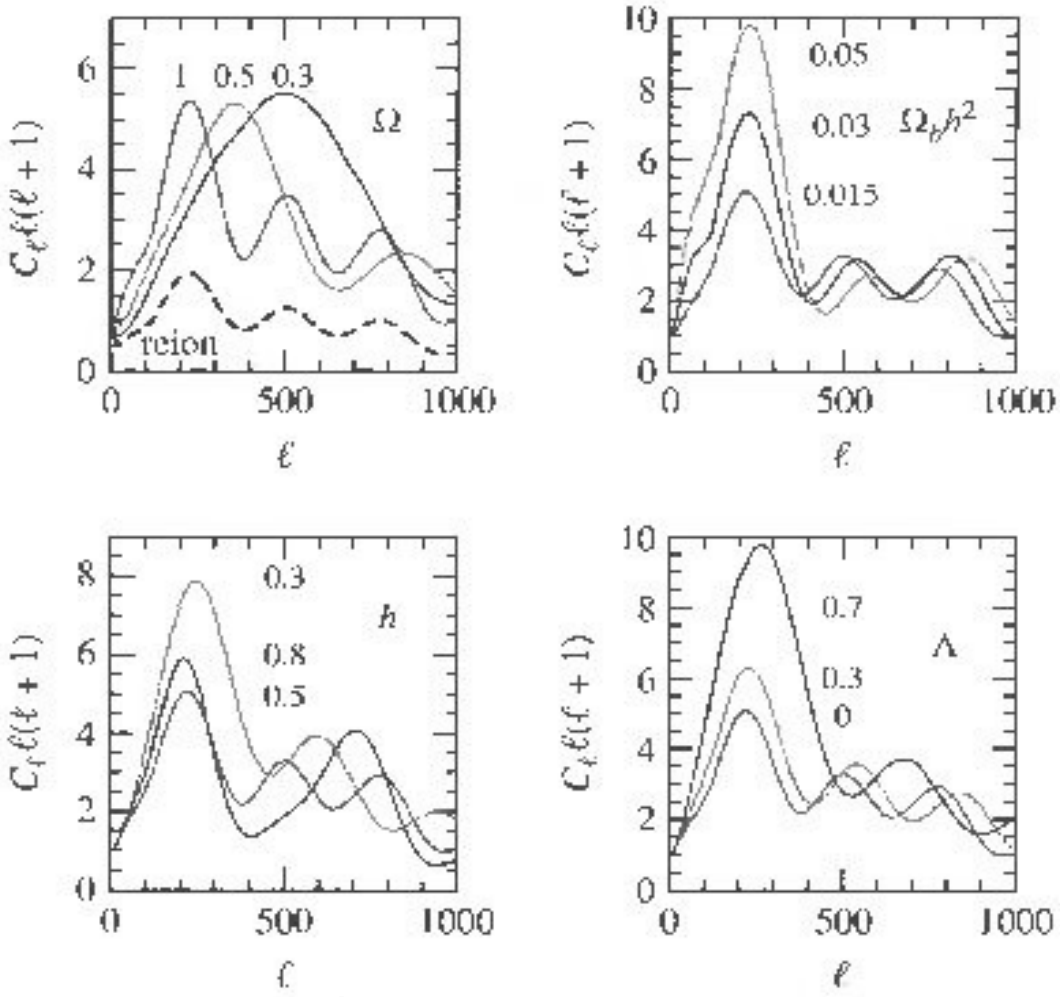
Como já tinhamos determinado a densidade da matéria visível + Escura, ~31 % da densidade crítica, podemos dizer que a densidade da Energia Escura é ~69 % da densidade crítica.

=> Evidência (indireta) para a Energia Escura.

Radiacão Cósmica de Fundo

Espectro Angular da Radiação Cósmica de Fundo

Os mesmos cálculos complicados conseguem prever a forma exata (posições e alturas dos demais picos) do espectro angular para diferentes modelos cosmológicos.



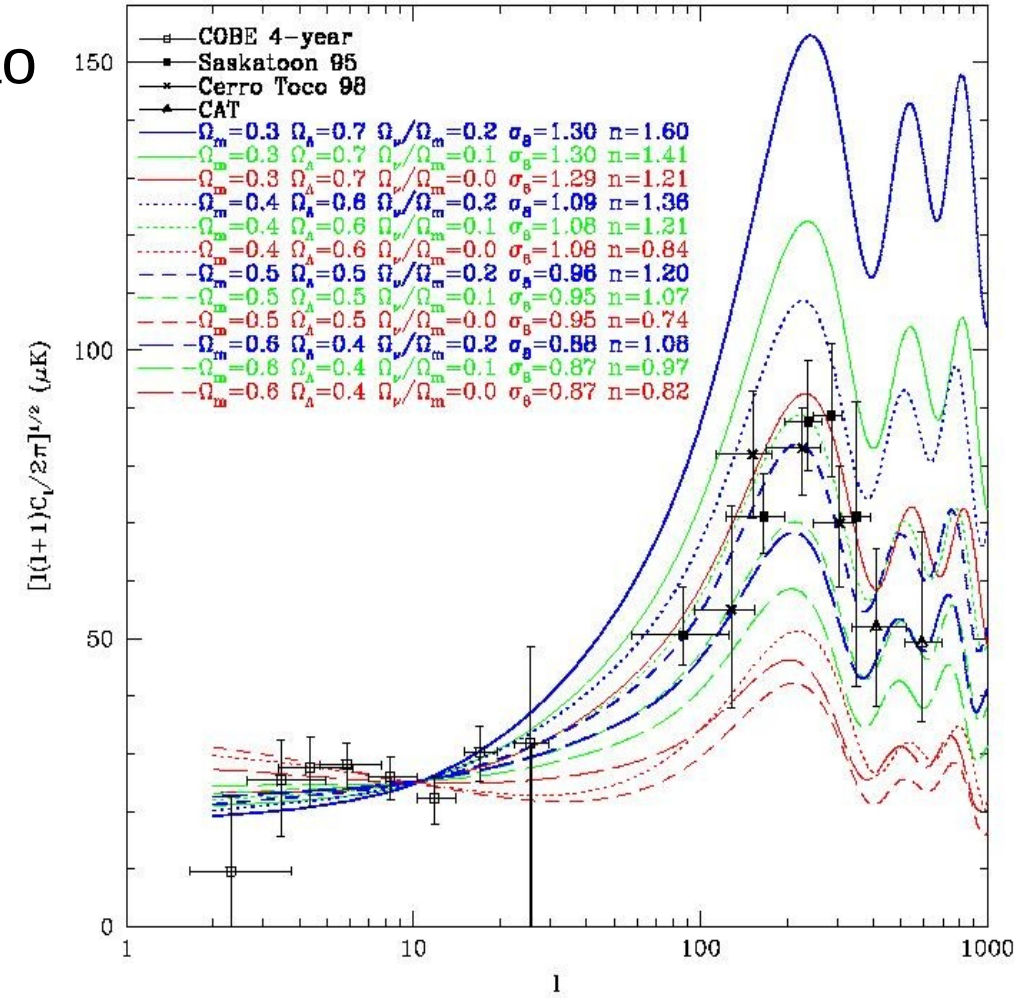
Variando vários parâmetros do modelo

Radiacão Cósmica de Fundo

Espectro Angular da Radiação Cósmica de Fundo

O espectro angular da Radiação Cósmica de Fundo bate exatamente com o espectro previsto para o modelo ΛCDM: Matéria visível compõe 5 %, Matéria Escura, 26 % e Energia Escura, 69 % da densidade crítica.

=> Prova para todo o modelo ΛCDM.

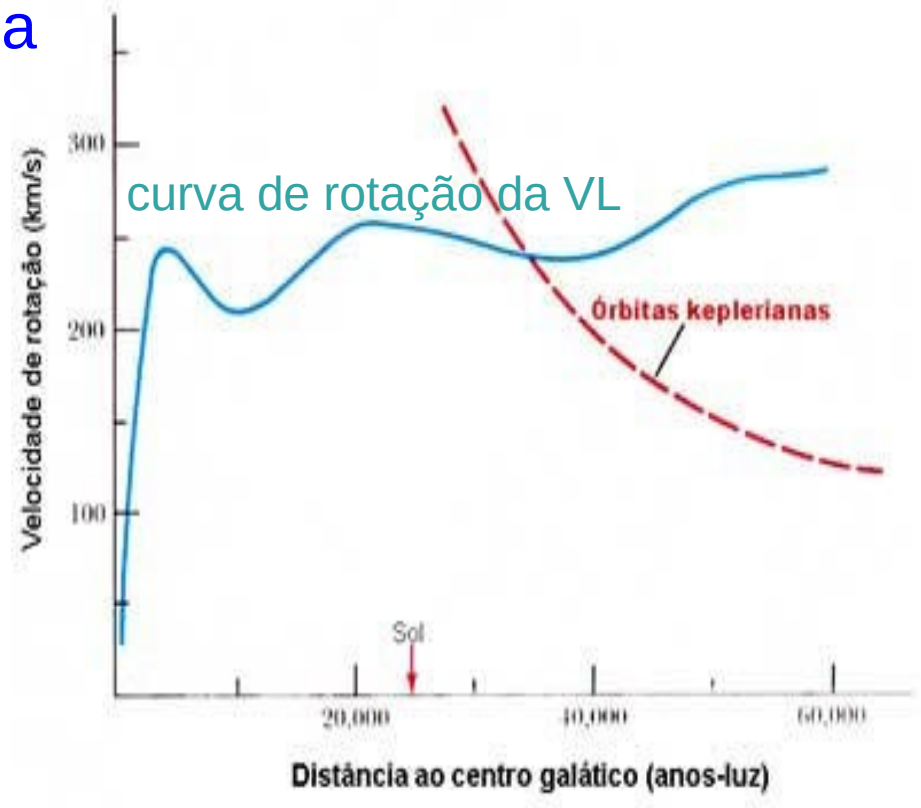


Outras Evidências para a Matéria Escura

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

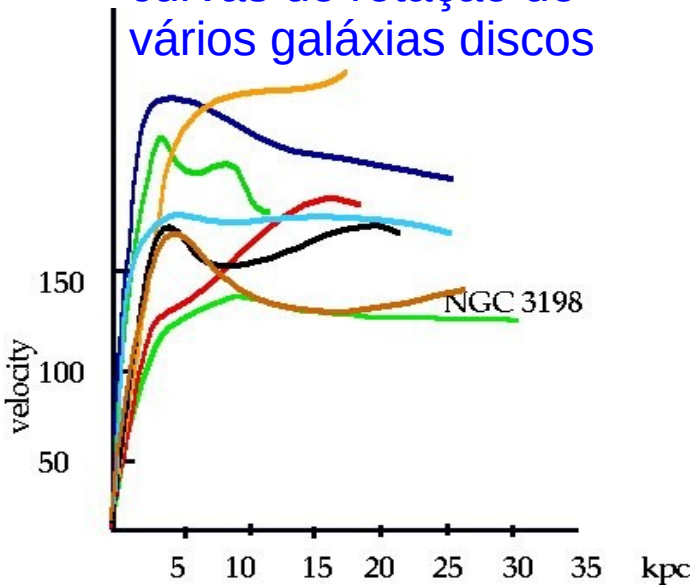
O mesmo se observa em outras galáxias discos, p. e. a galáxia de Andrômeda.

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

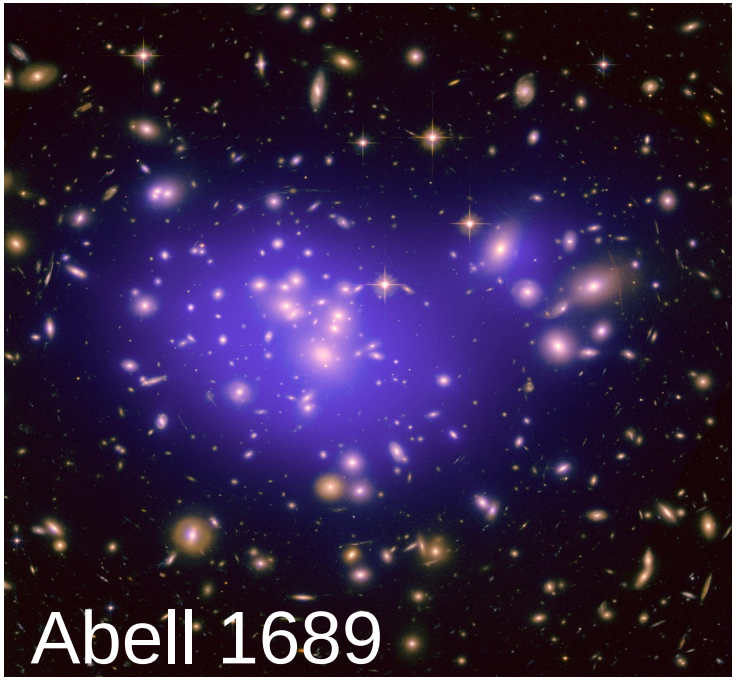
Dinâmica das galáxias

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.

Aglomerado Abell 521 em raios X

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.

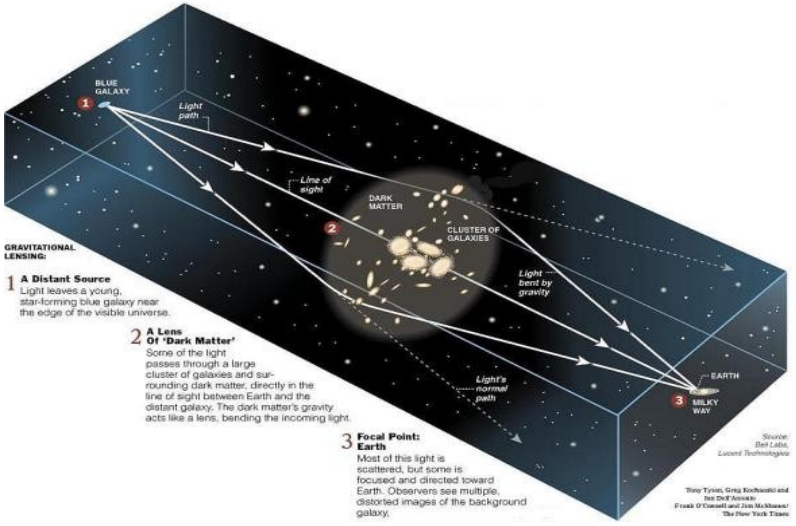
=> Massas de 10^{14} a 10^{15} $M_{\odot}$

Outras Evidências para a Matéria Escura

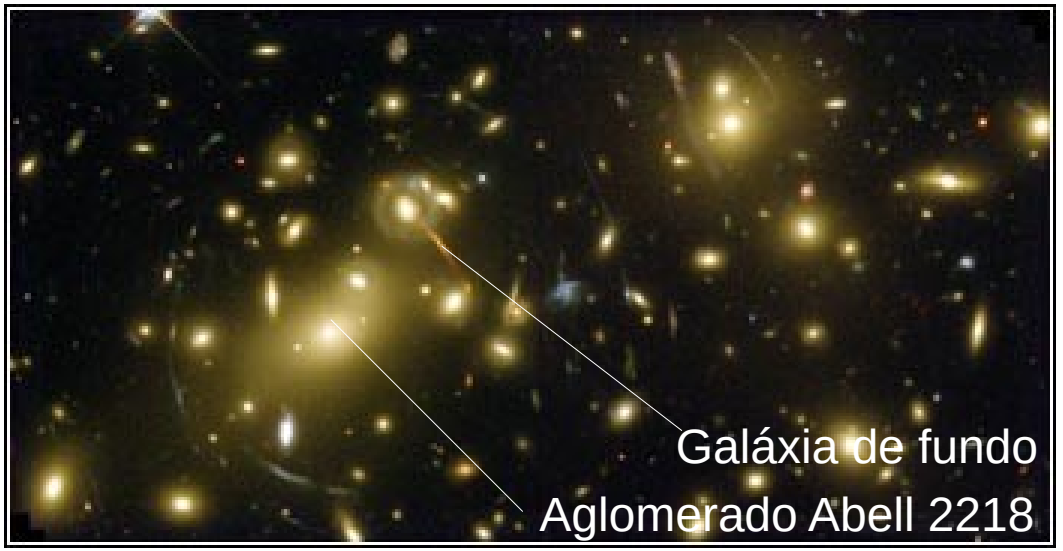
Massas de Aglomerados de galáxias

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: $M_{\text{Aglomerados}} = 10^{14}$ 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).

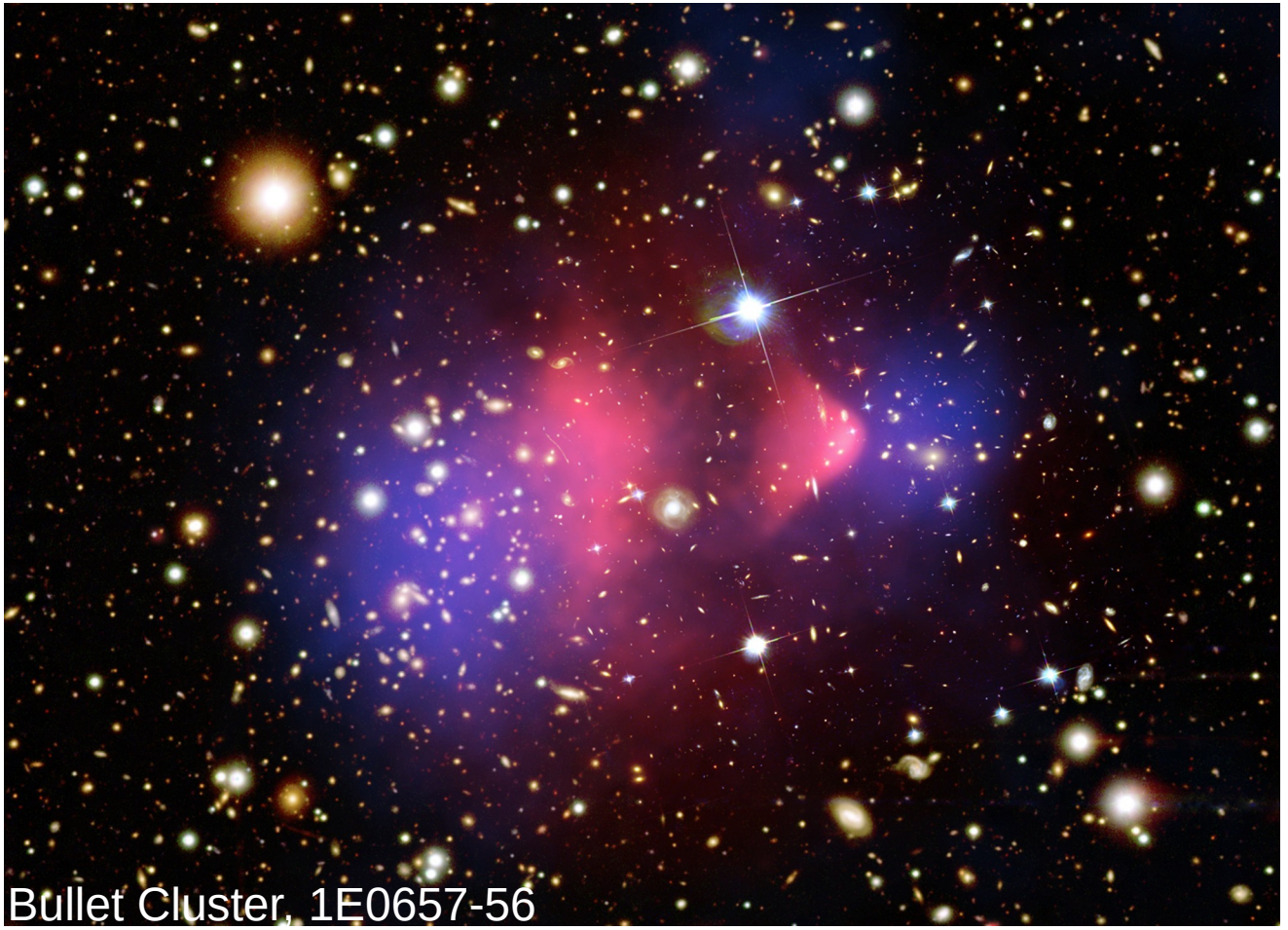
=> Outra evidência para a Matéria Escura não-bariônica.

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).



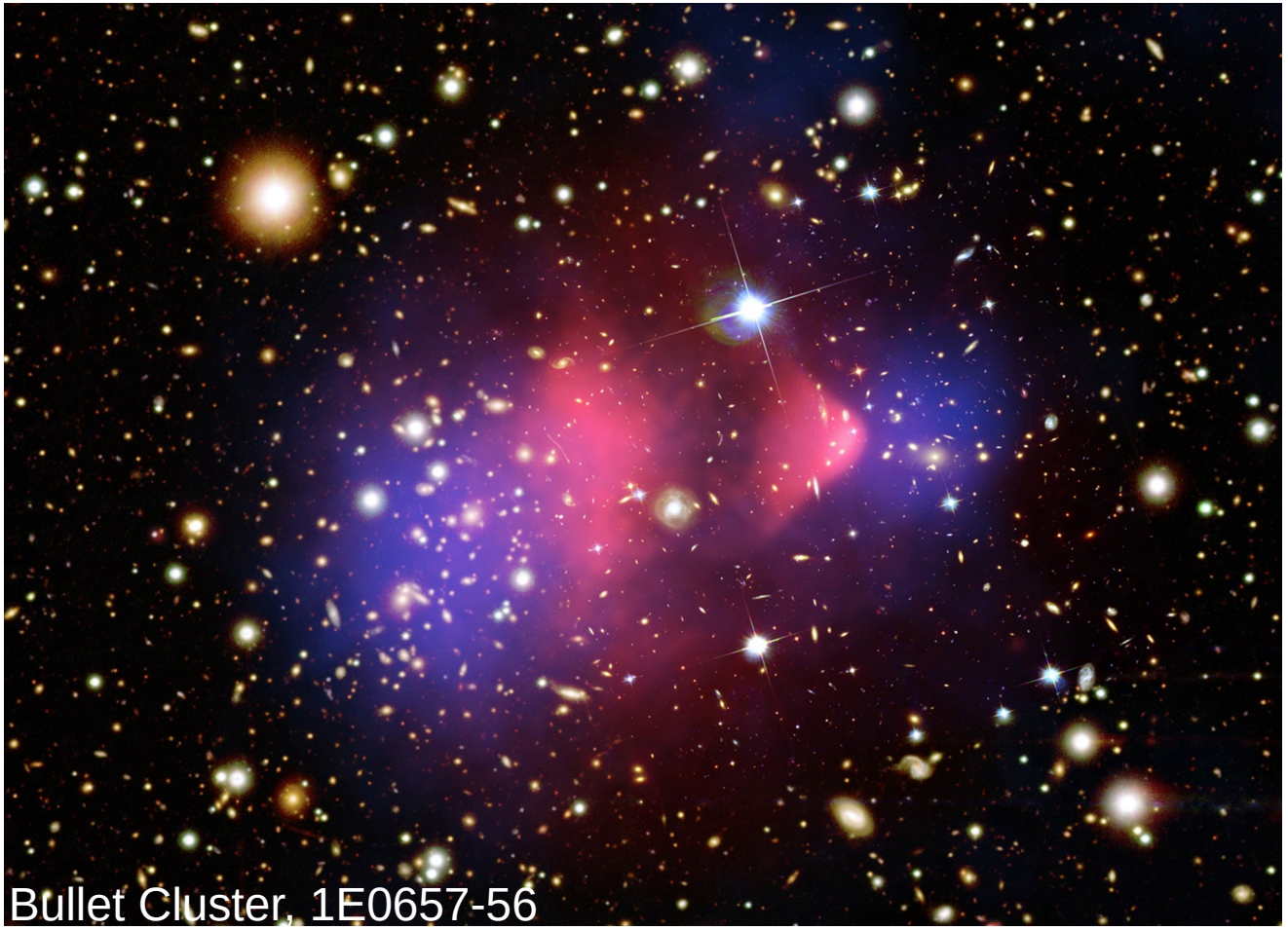
Bullet Cluster, 1E0657-56

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").


Bullet Cluster, 1E0657-56

=> Temos evidências para a Matéria Escura de fontes completamente diferentes e independentes: Radiação Cósmica de Fundo, galáxias, Aglomerados de galáxias (e existem mais).

Do que consiste a Matéria Escura?

Tem que ser algo que quase não interage com materia “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 (~10^{-36} kg) ou outras partículas hipotéticas

- *Cold Dark Matter* (Matéria Escura Fria):
  Partículas ou até objetos com massa mais alta,
  e velocidades baixas:
  “axions” (~10^{-41} kg),
  WIMPs (ingl. *Weakly Interacting Massive Particles*,
  “partículas massivas interagindo fracamente”, 10^{-26} - 10^{-24} kg),
  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 estrutuuturas 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 prevêem distribuições de galáxias diferentes nas duas hipóteses.

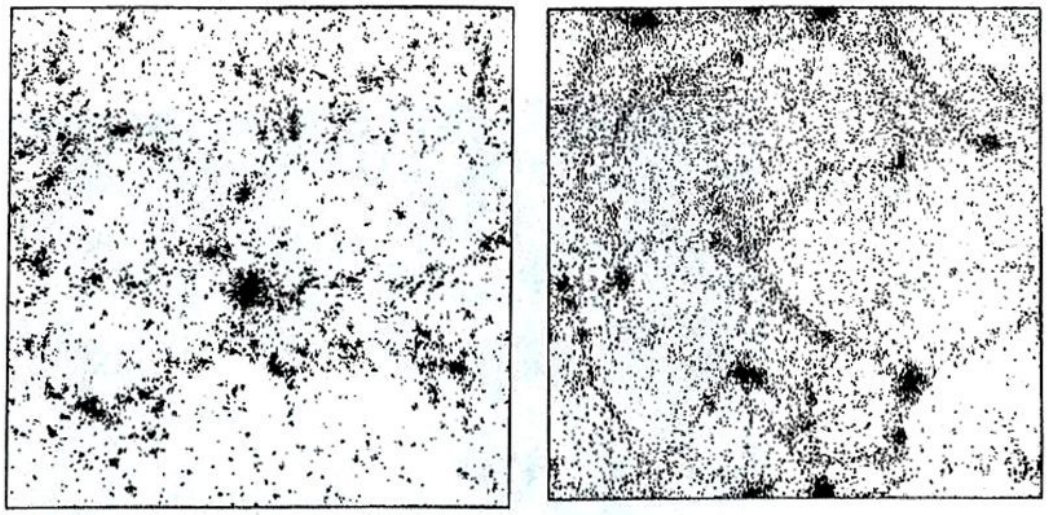


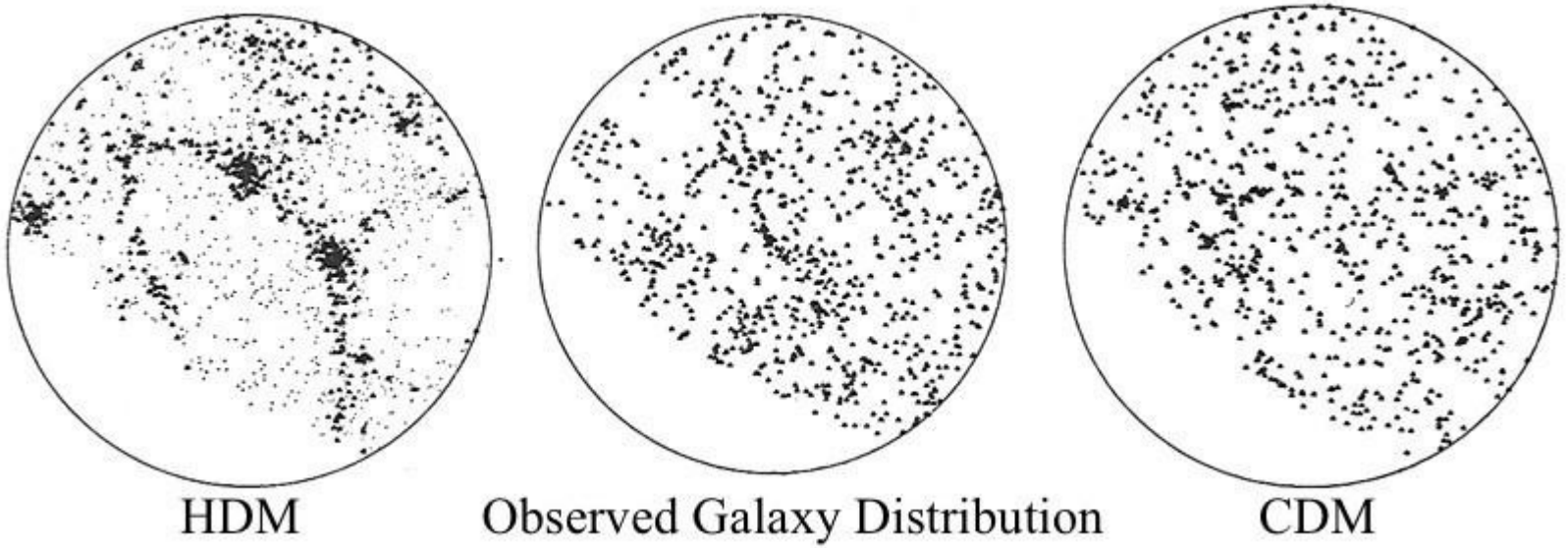
FIGURE 30.10 The results of numerical simulations of the formation of structure in the universe from the bottom-up clumping of cold dark matter (left), and the top-down fragmentation of hot dark matter (right). Both models assume $\Omega_0 = 1$ and $h = 0.5$. (Figure from Frenk, *Physica Scripta*, *T36*,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

Do que consiste a Matéria Escura?

Simulações da evolução das grandes estruturas no Universo

Cada ponto é uma galáxia.

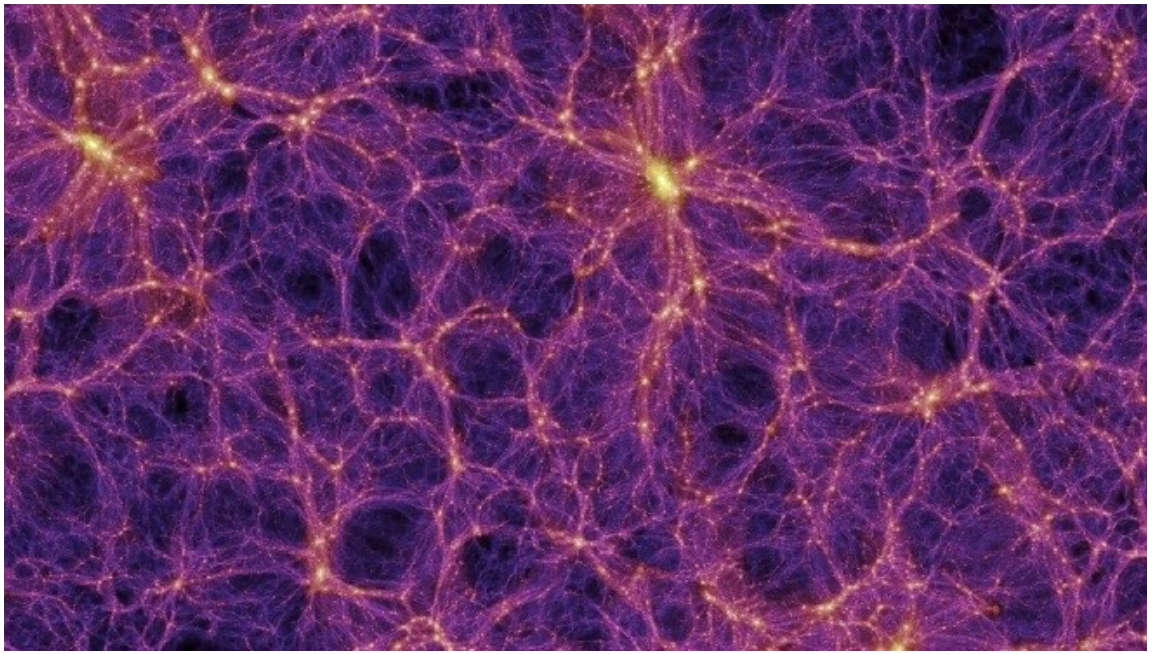
Com Matéria Escura Quente | Distribuição Observada | Com Matéria Escura Fria



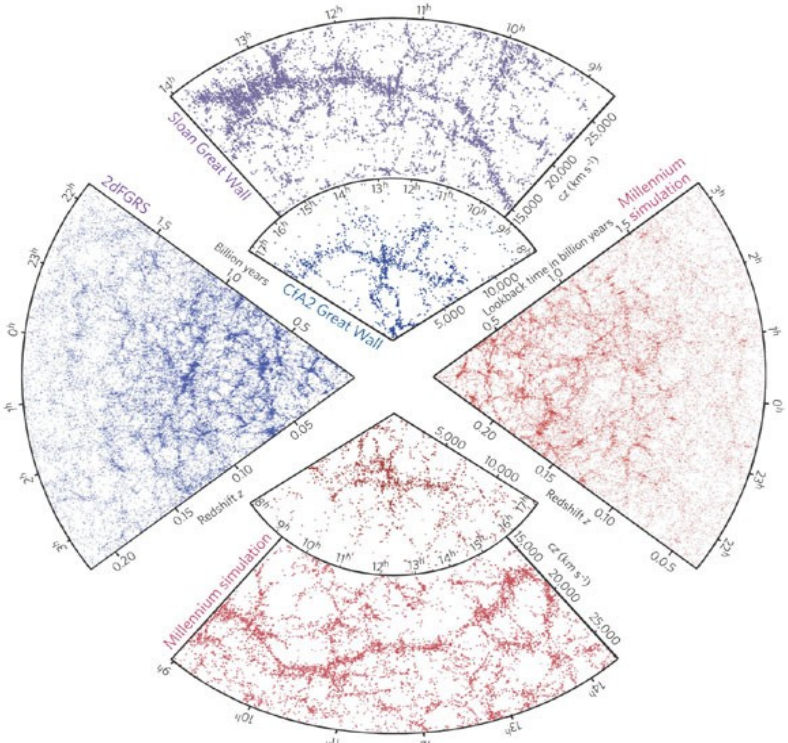
=> A simulação com Matéria Escura Fria reproduz a distribuição observada melhor

Do que consiste a Matéria Escura?

Simulação mais recente com Matéria Escura Fria



Dark Matter Millenium Simulation



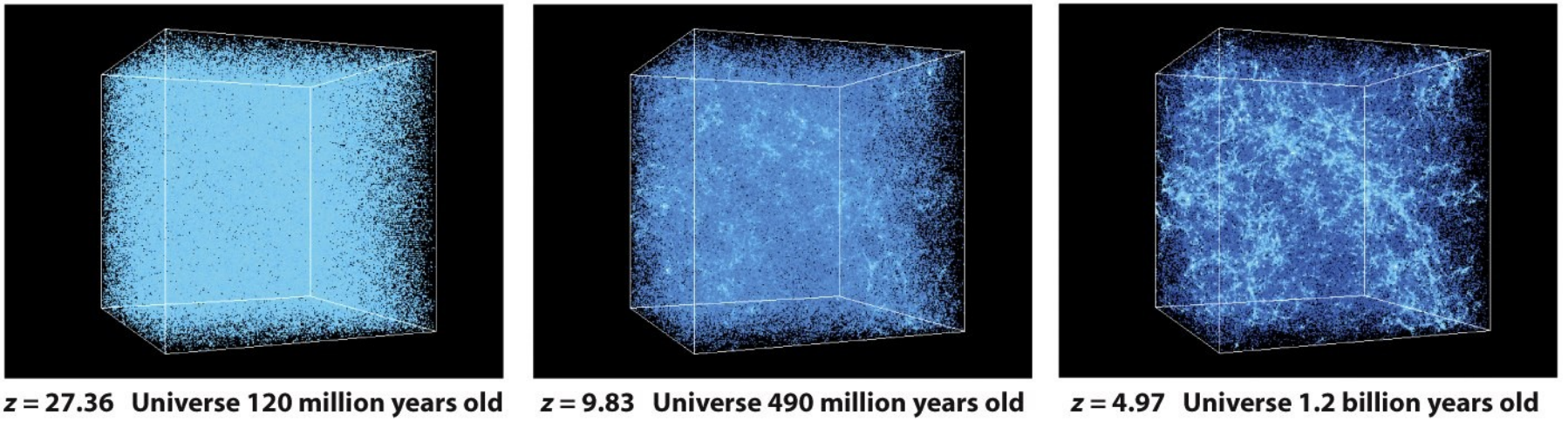
Comparação com uma amostra de *redshifts*

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 occoreram "perto daqui".
Se diz que SNs Ia são velas padrão.

A luminosidade apparente (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.

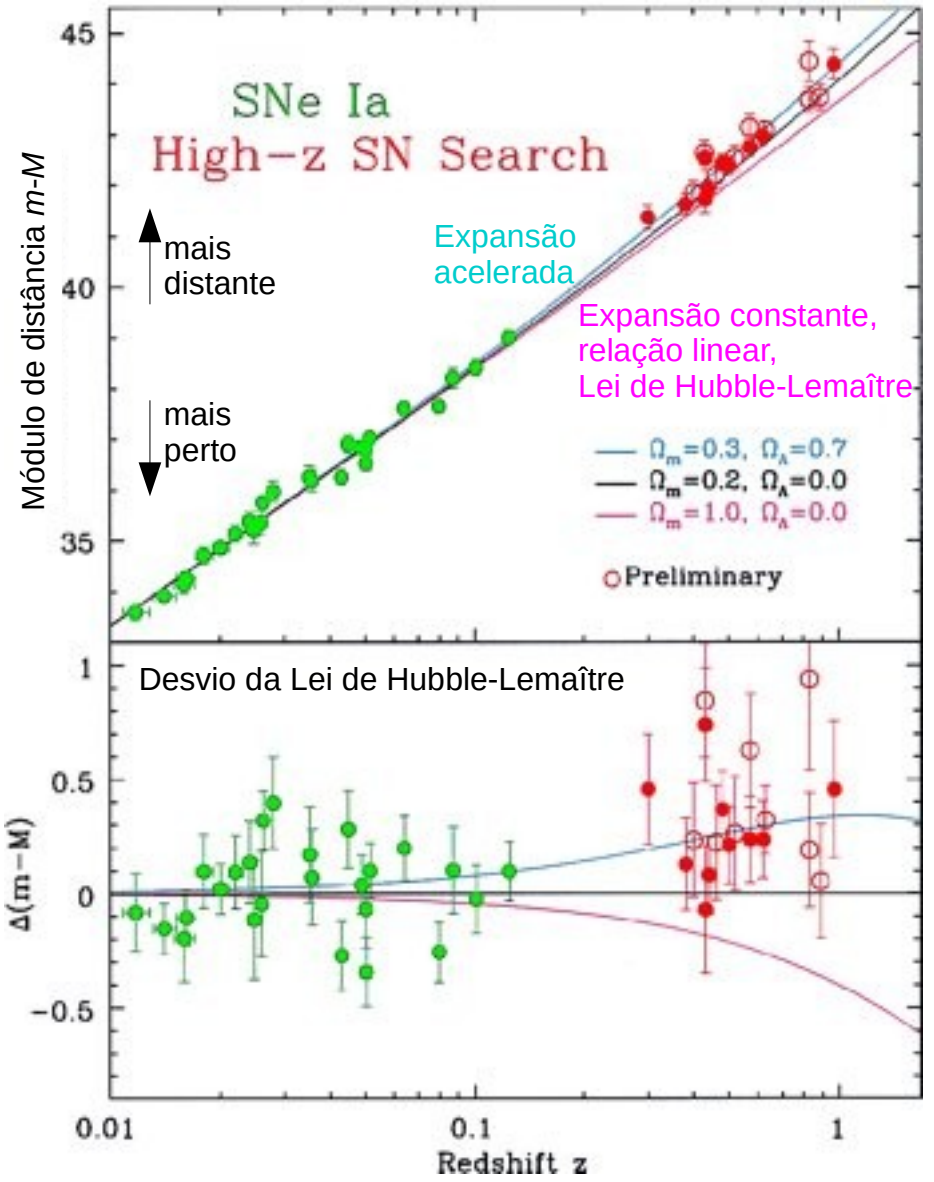
Outras Evidências para a Energia Escura

Luminosidades de Supernovas Ia

Em 1998, astrônomos descobriram que em *redshifts* altos, ou seja, no passado distante, as distâncias das SNs 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.

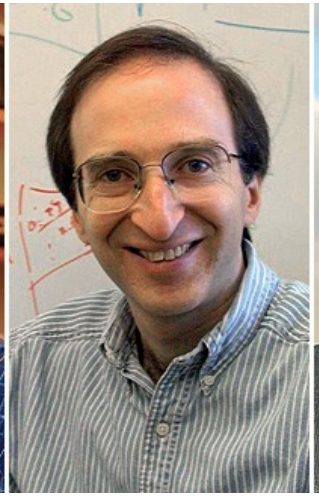


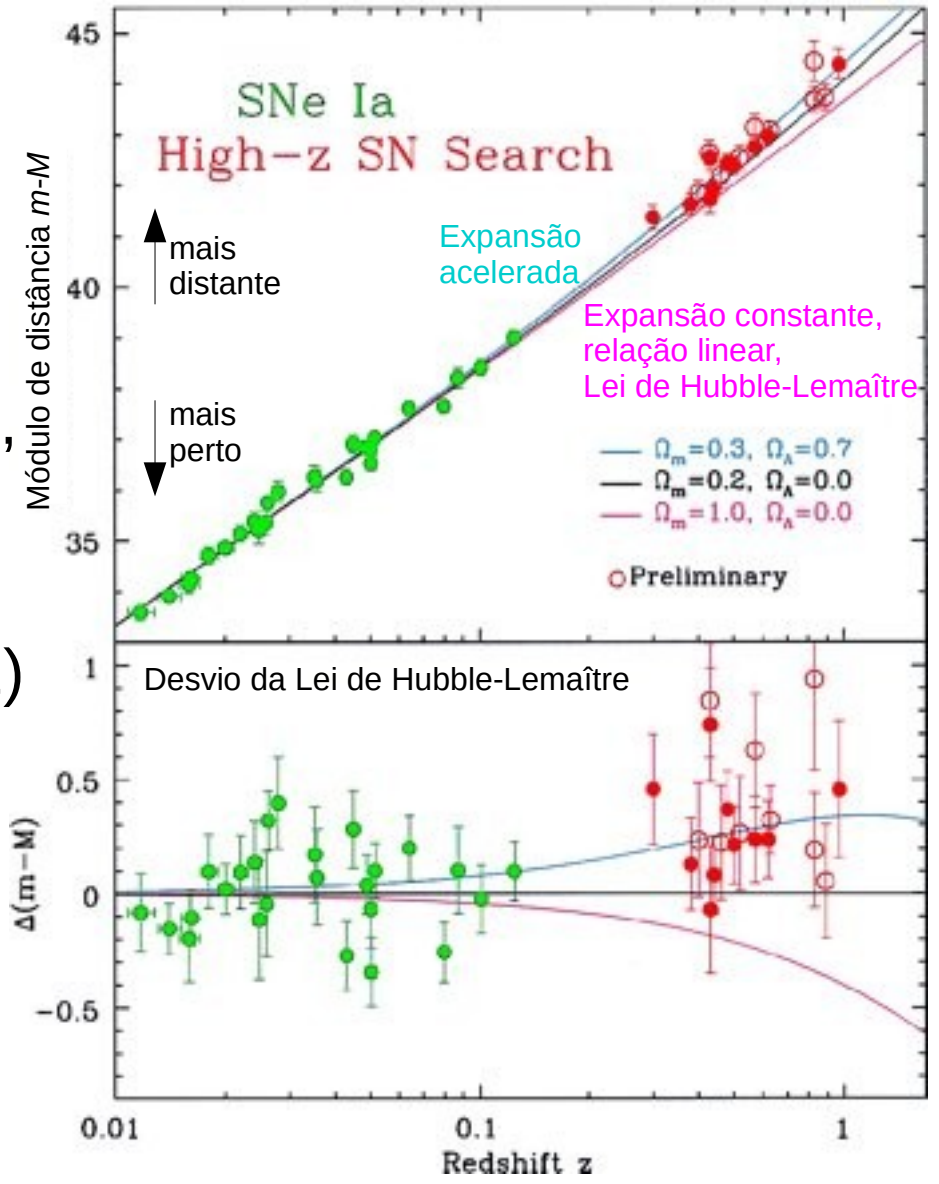
Outras Evidências para a Energia Escura

Luminosidades de Supernovas Ia

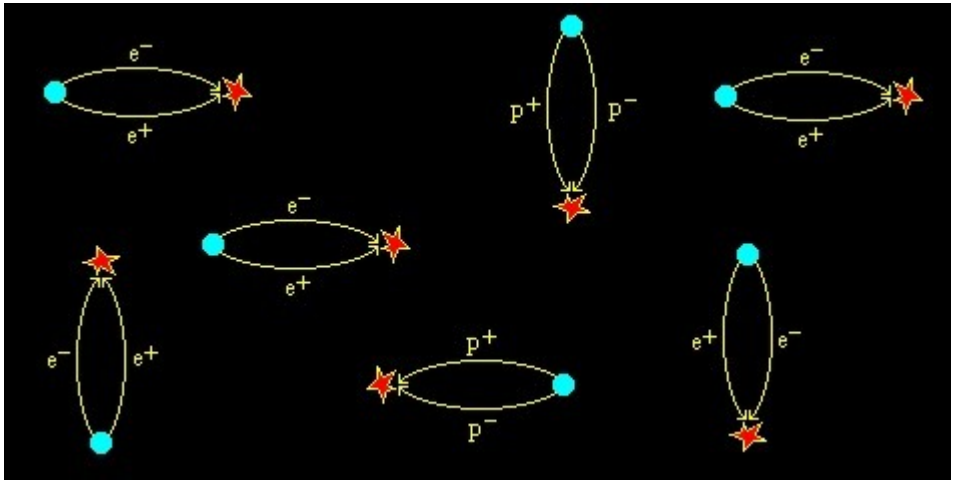
O valor da densidade da Energia Escura determinado através das distâncias das SN Ia bate bem com a valor determinado pela Radiação Cósmica de Fundo, 69 % da densidade crítica.

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





Do que consiste a Energia Escura?

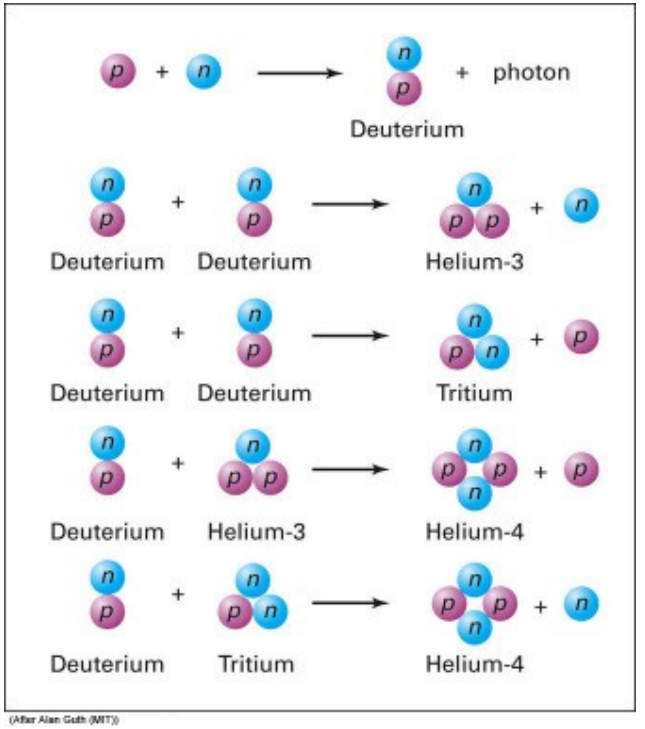


Ela é, às vezes, asociada com a “energia do vácuo”.
Um nome melhor seria energia do estado fundamental do espaço.
Segundo a teoria, o espaço “vazio” não é nada vazio:
Consiste de partículas e anti-partículas sendo criadas e aniquilando-se constantemente. Só que a densidade de energia calculada para este 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).

Núcleossintese primordial

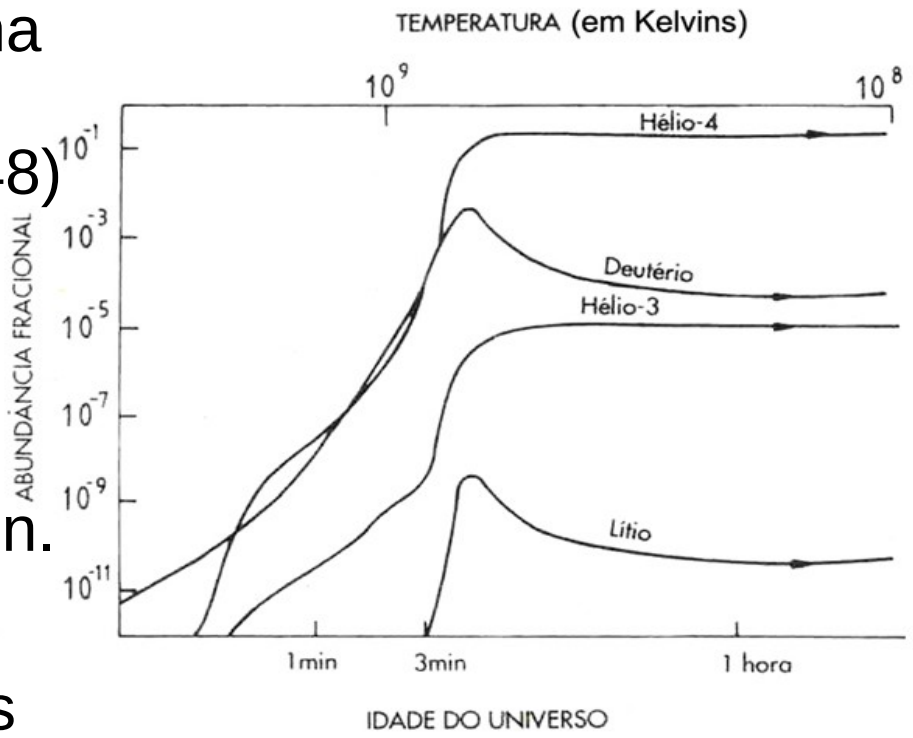


Nestas nuvens, e no resto do Universo, 23 a 24 % (ou mais) dos átomos são de hélio, que só podem ter sido formados na Época da Núcleossíntese, de 1 ms a 5 min depois do *Big Bang*, quando densidade e temperatura do Universo eram altas o suficiente para possibilitar a fusão nuclear, ou nucleossíntese,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

Abundâncias dos Elementos Primordiais

Através do montante de hélio na composição primordial, dá pra calcular (Alpher e Herman, 1948)
- a duração da Época da Núcleossíntese, ~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 Núcleossintese (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 %).

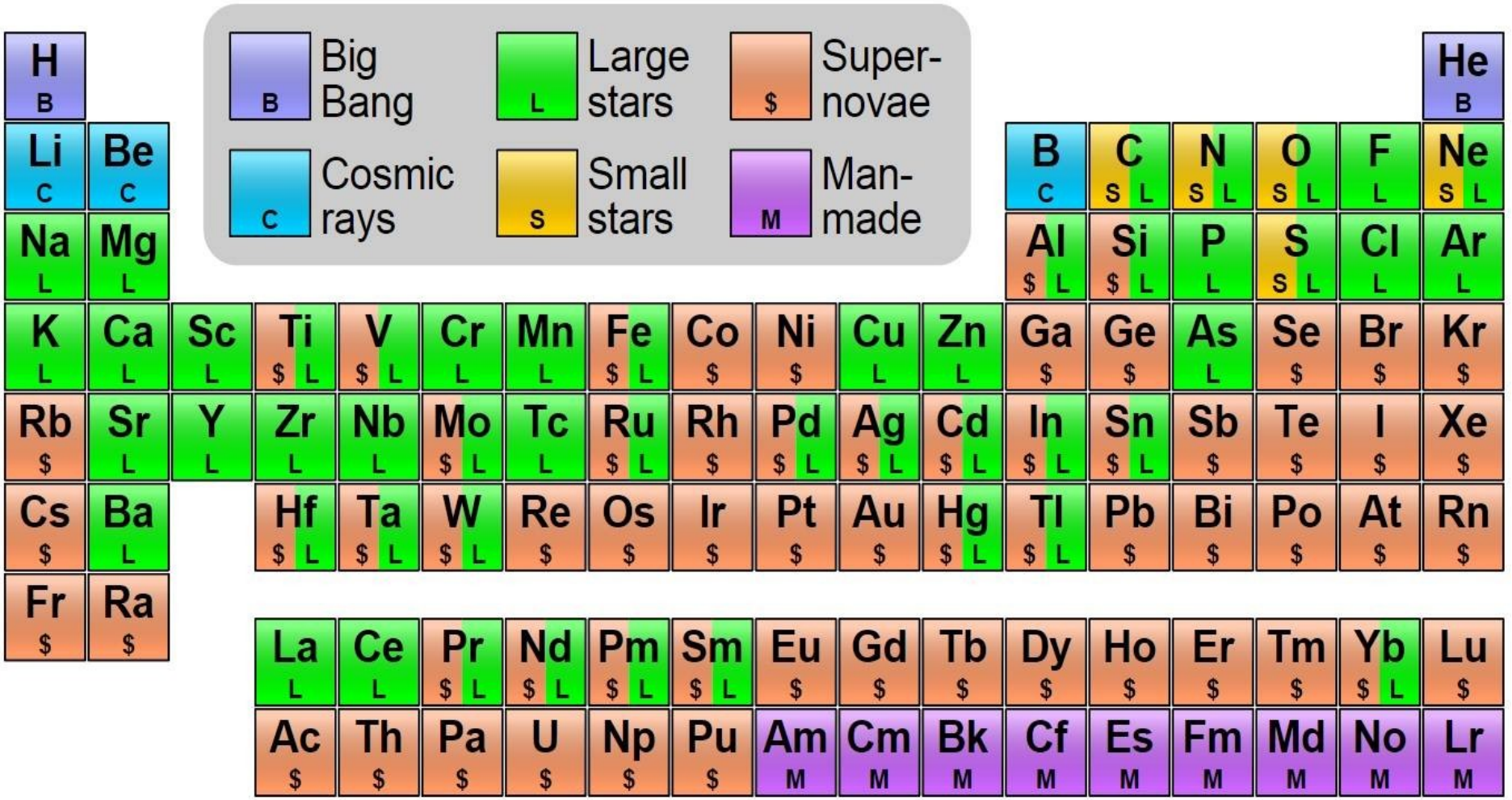
- E os outros 2 %, ou seja todos os outros 105 elementos estáveis?

- 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.

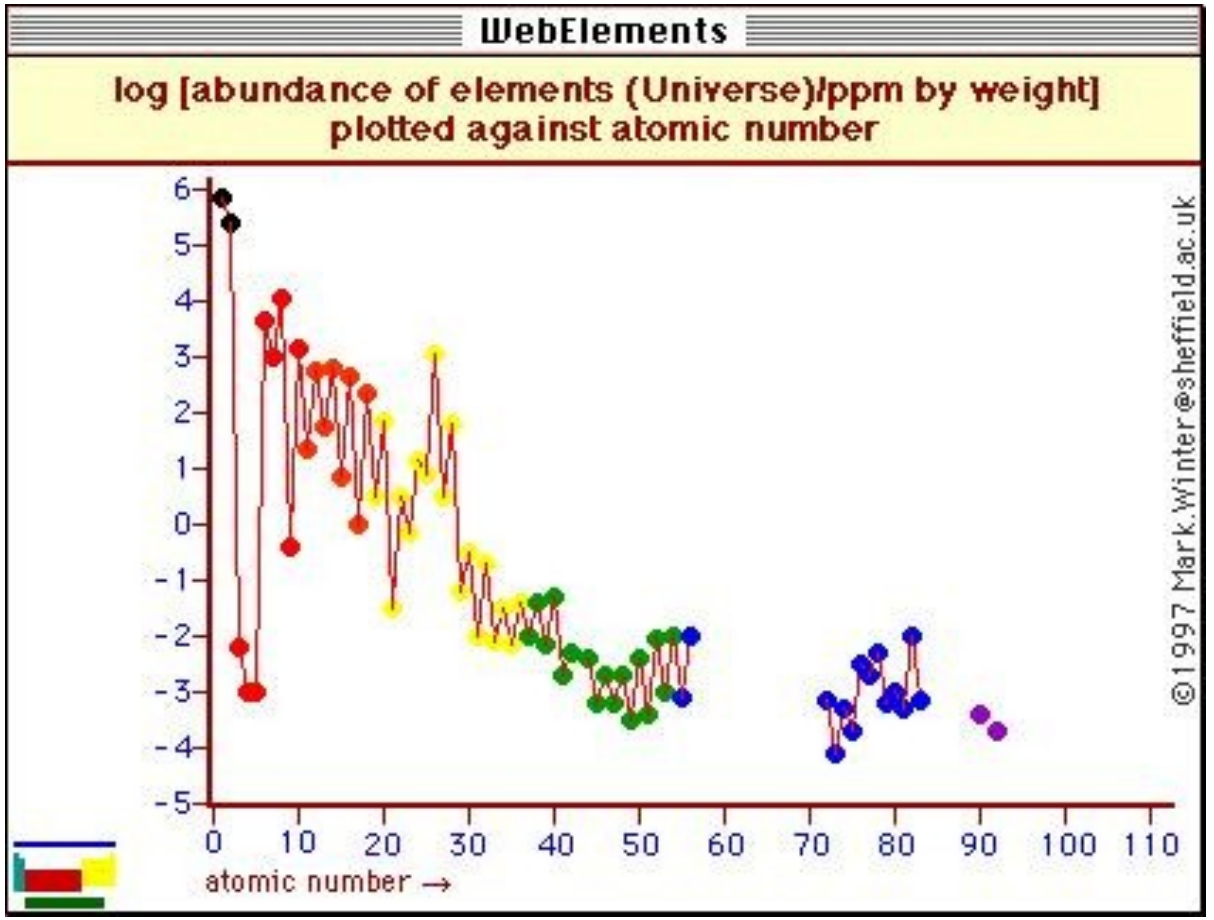
Origem dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:



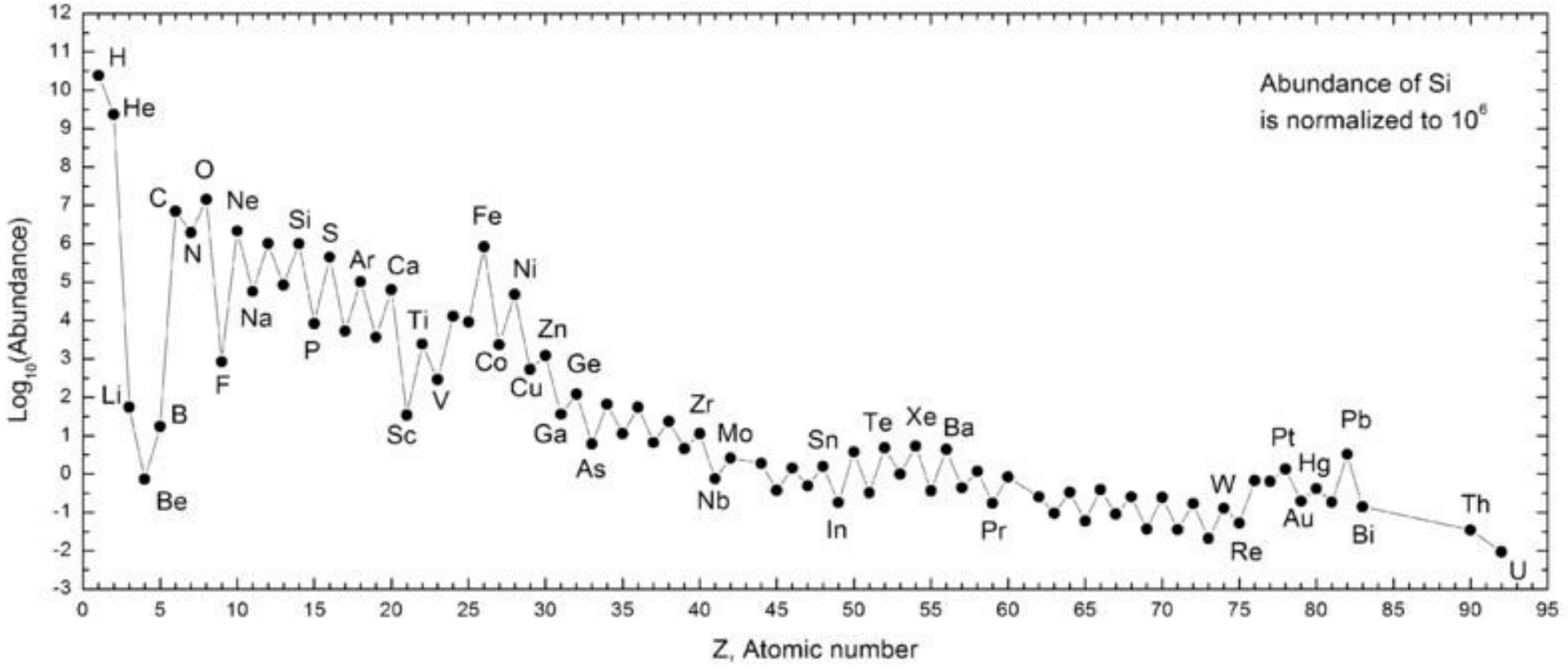
Origem dos Elementos

Abundâncias dos Elementos no Universo



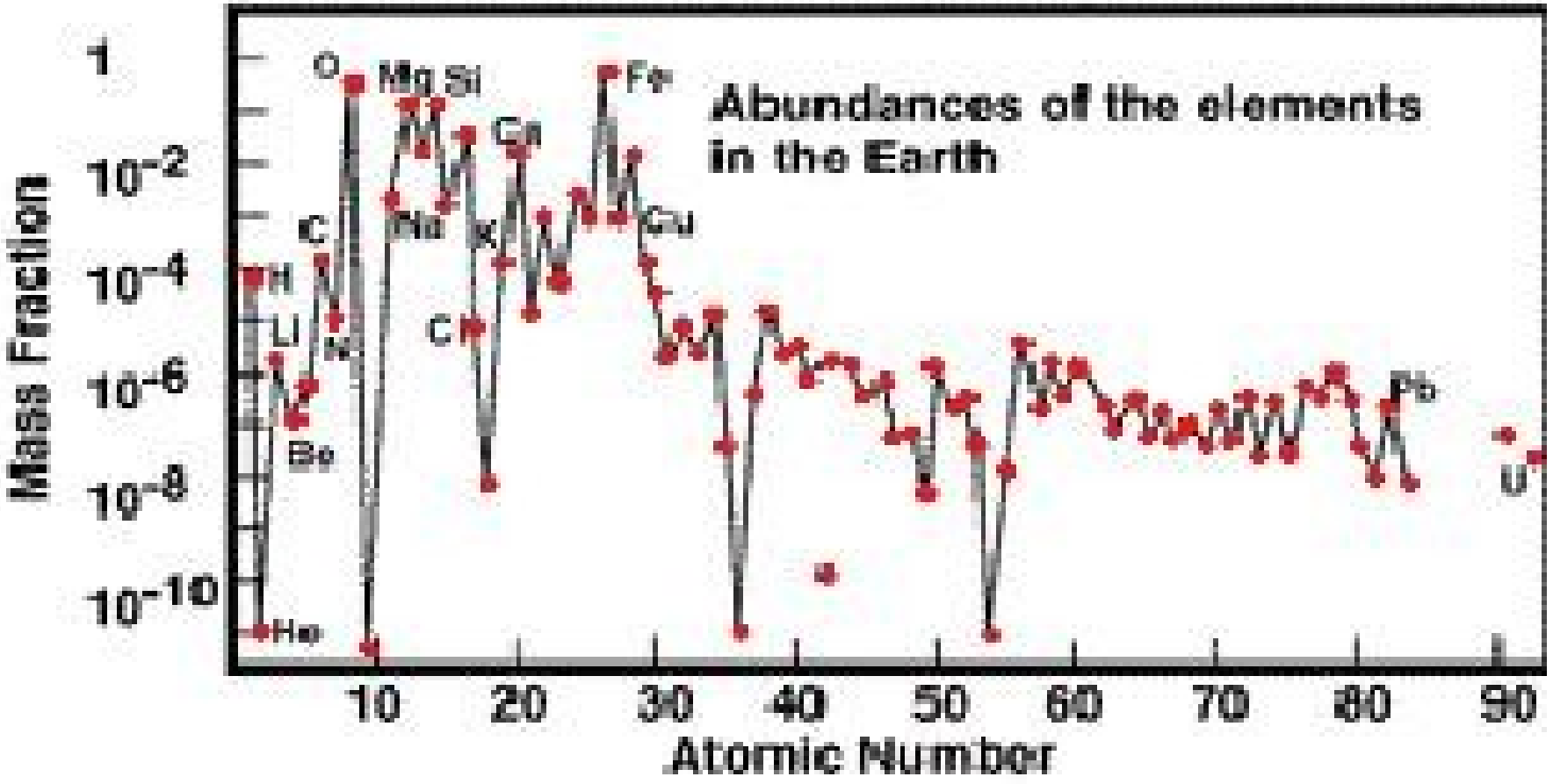
Origem dos Elementos

Abundâncias dos Elementos no Sistema Solar



Origem dos Elementos

Abundâncias dos Elementos na Terra

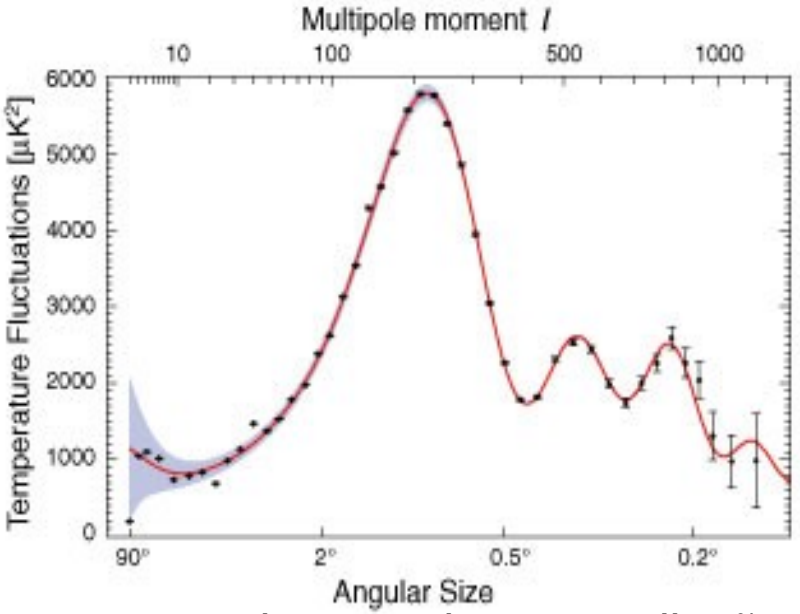


Outras Evidências

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° no céu) na Época da "Recombinação", estas estruturas devem ter evoluído para tamanhos típicos hoje.



Espectro de tamanhos na radiação cósmica de fundo

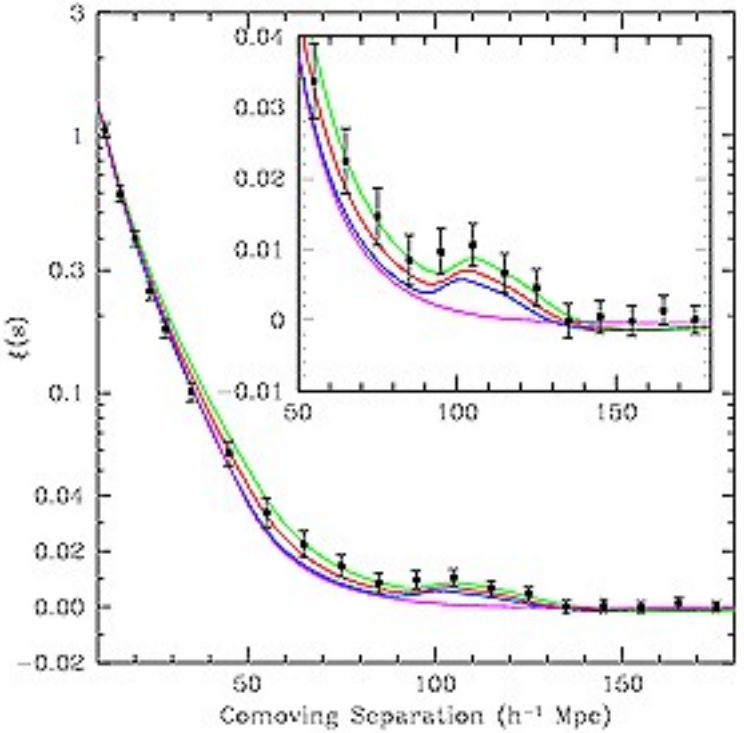
Pelo modelo ΛCDM estruturas de 1° na Radiação Cósmica de Fundo, ~200 kpc na época, deveriam ter tamanhos de 140 Mpc hoje.

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 aleatórea de galáxias.

=> Evidência para a evolução de estruturas primordiais até as estruturas em grande escala hoje, de maneira predita pelo modelo ΛCDM.



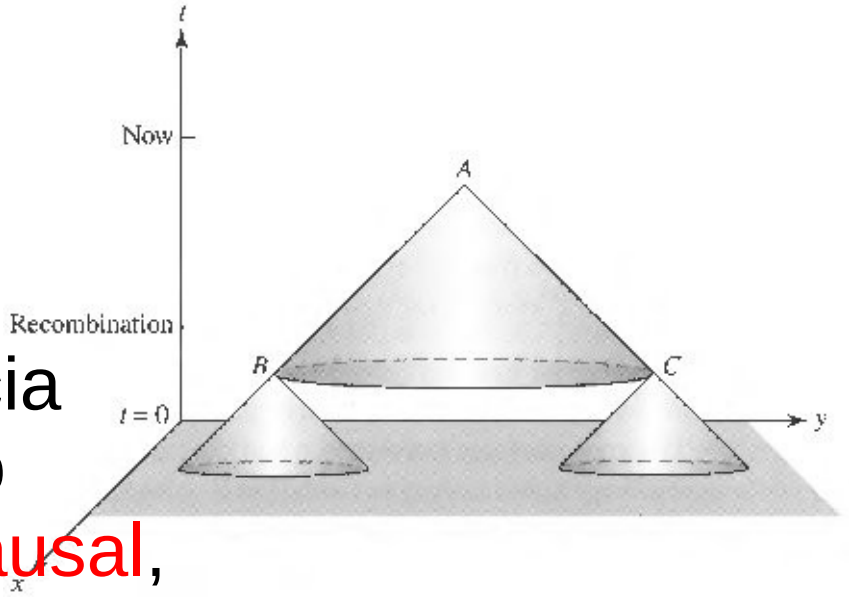
Função de correlação de distâncias intergalácticas

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° 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, ρ_0, possa estar dentro de 2 % da densidade crítica, $\rho_{crit,0}$ (Planck: $\rho_0 = (1{,}0023 \pm 0{,}0055) \cdot \rho_{crit,0}$), ele deve ter sido dentro de 0,001 % da densidade crítica naquela época, $\rho_{crit}(t_{Recombinação})$.

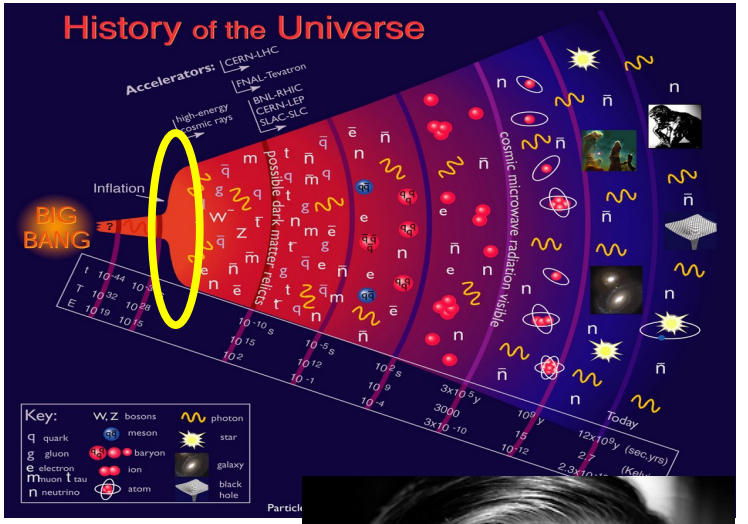
Se ρ não tivesse sido tão perto de ρ_{crit} naquela época, o Universo já teria se desfeito ($\rho < \rho_{crit}$) ou recolapsado ($\rho > \rho_{crit}$), e nós não existiríamos.

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 ≥ 10^{43} em < 10^{-34} s,
sugerido em 1980 por Alan Guth,
consegue explicar os dois fenômenos.



Alan Guth

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.

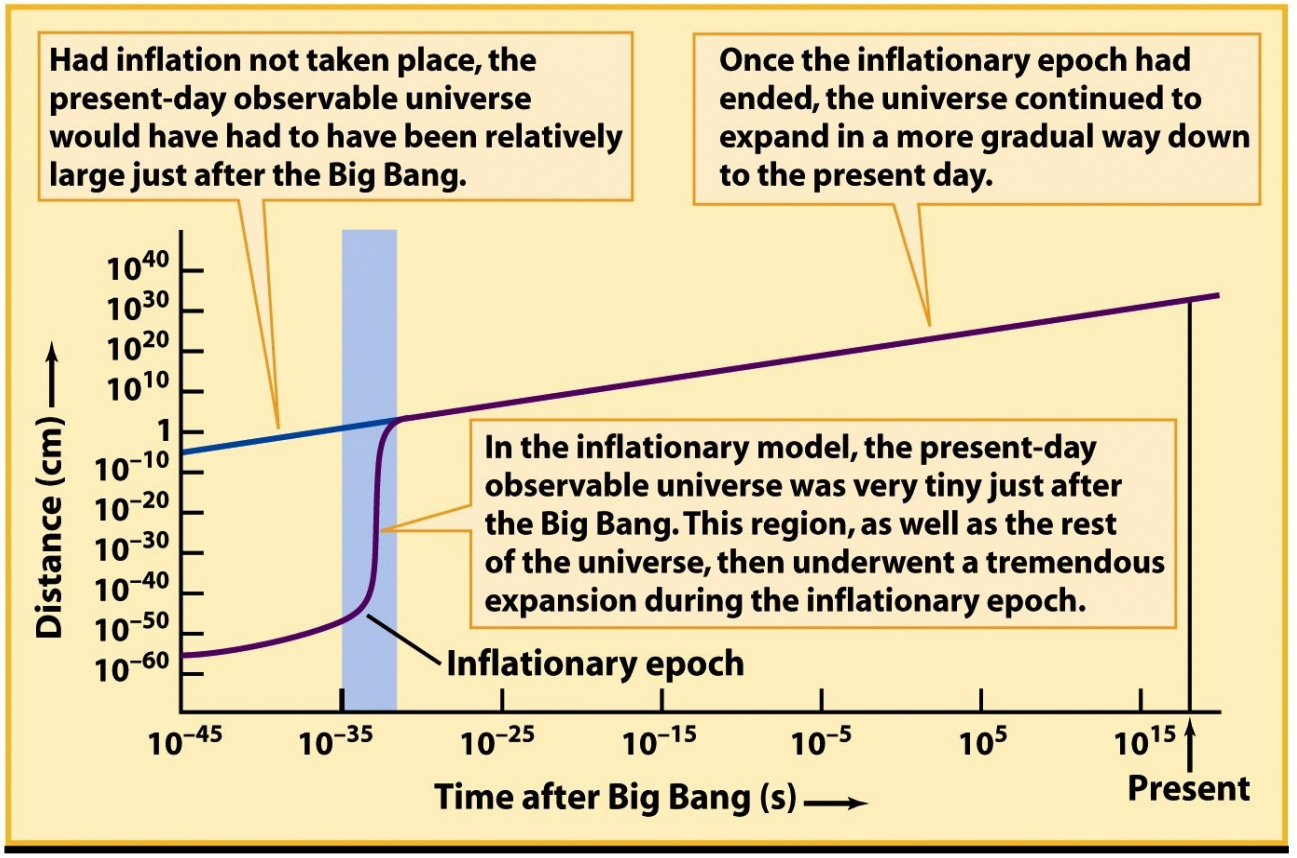


Figure 27-2
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Outras Evidências

Evidências para a Inflação

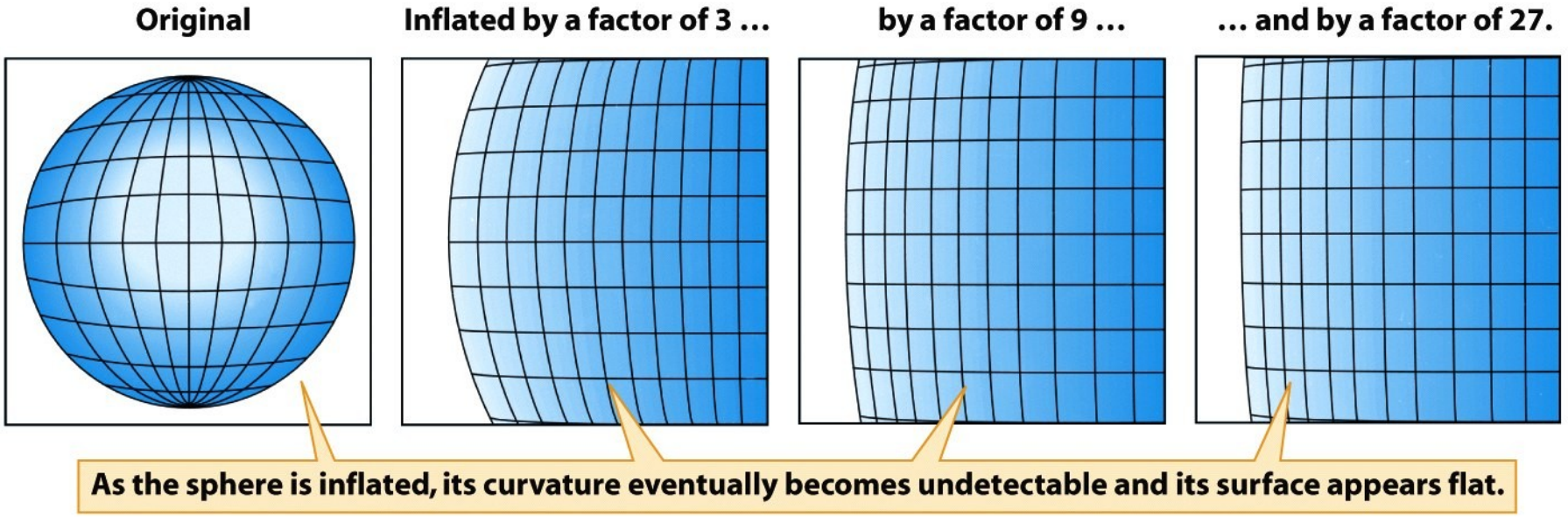


Figure 27-3
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

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

=> Bons argumentos a favor da Inflação.

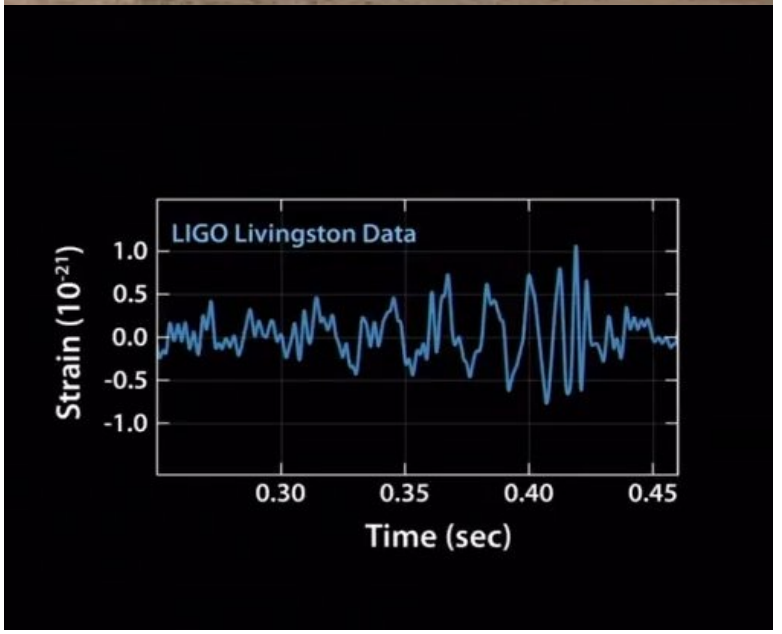
Evidências para Ondas Gravitacionais

(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)

LIGO detector em Hanlon

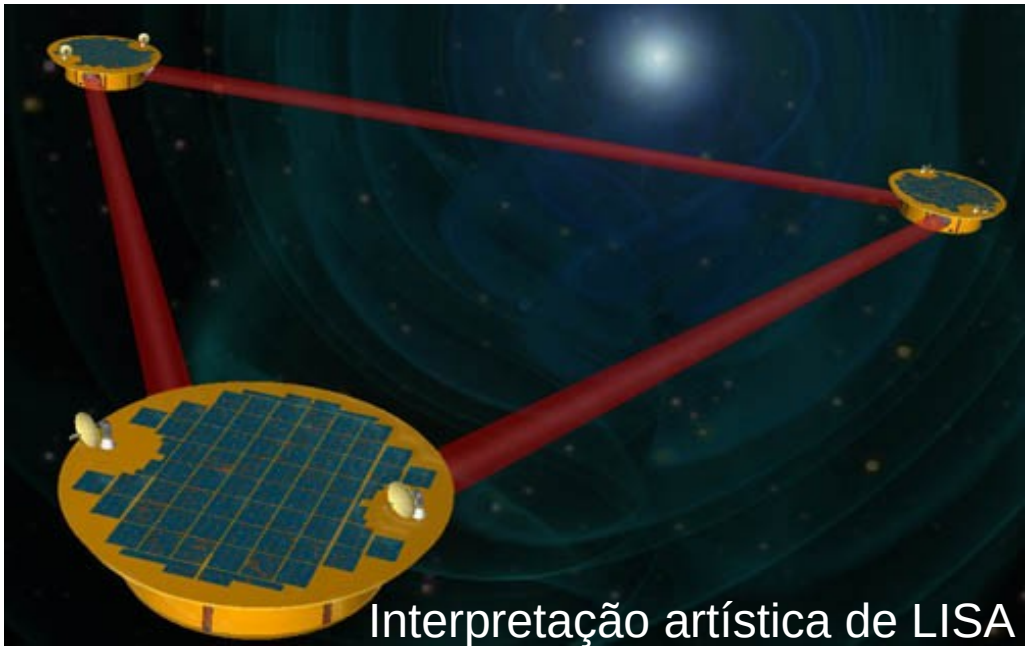
14/09/2015 (anunciado 11/02 2016)
LIGO (Hanford e Livingston, EUA):
Detecção de ondas gravitacionais
devidas a um evento de fusão de
2 Buracos Negros.



Uma segunda detecção foi feita
26/12/2015 (anunciada 16/06/2016)

“Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Se a detectabilidade de ondas gravitacionais se confirma, talvez algum dia poderemos observar aquelas emitidas na época da Inflação.


Interpretação artística de LISA

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

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 2034 (?).

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

O Futuro do Universo

Como se desenvolverá o Universo no futuro?

Se o modelo ΛCDM 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 ingediente
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” cosmológico 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).

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 ΛCDM (não são favorecidos pela Navalha de Occam).

Por enquanto, o modelo ΛCDM 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 cosmológicos:

- 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 (Suiça/França).
- Elaboração de detectores para a detecção direta da Matéria Escura (difícil sem saber, o que ela é...)
- Detectar as ondas gravitacionais emitidas na época da Inflação (muito fracas segundo a previsão...).
- ...

FIM PRA HOJE