



Universidade Federal do ABC

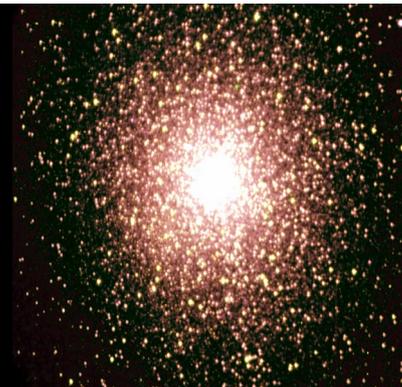
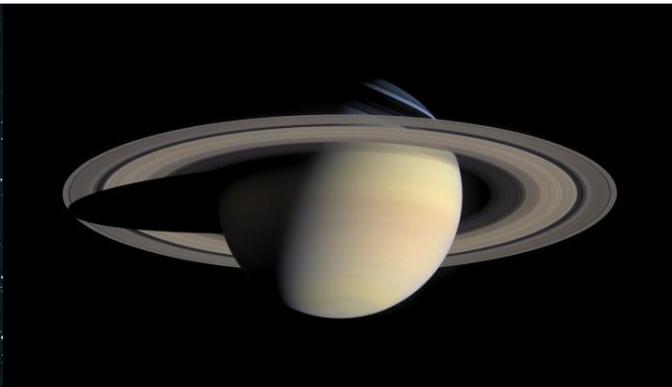
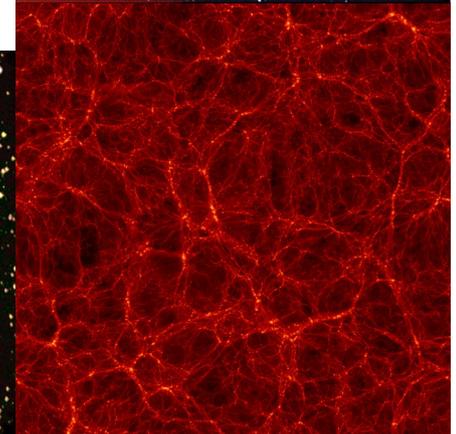
Noções de Astronomia e Cosmologia

16. Cosmologia II: Evidências

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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



Evidências

O **modelo Λ CDM** apresentado na aula anterior é bem bizarro.

Evidências fortes são **necessárias** para acreditar num modelo destes.

Nesta aula são apresentadas as **evidências principais**.

Evidências

Algumas evidências já conhecemos, como o *redshift* (\Rightarrow aula galáxias I),

as dicas pra existência da **Matéria Escura** na Via Láctea e em outras galáxias (\Rightarrow aulas Via Láctea, galáxias)

e as observações de **galáxias** e **Aglomerados** (\Rightarrow aula galáxias I),

as **idades finitas** (< 13 Ganos) de todos os objetos observados,

mas tem mais...

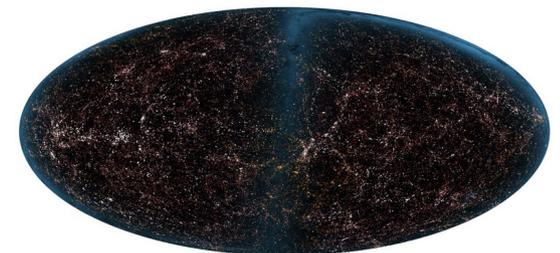
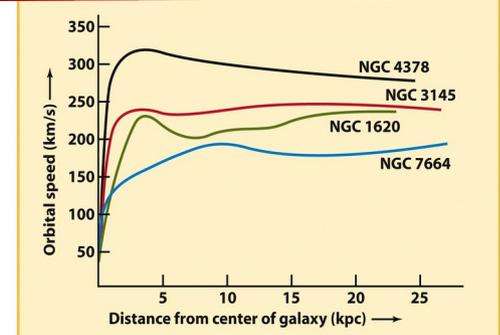
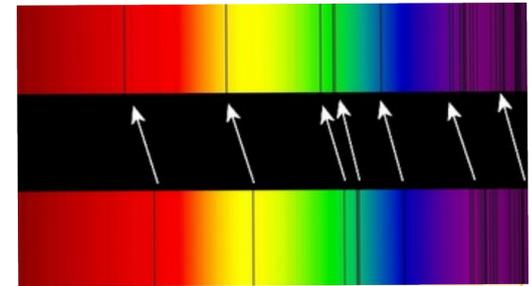
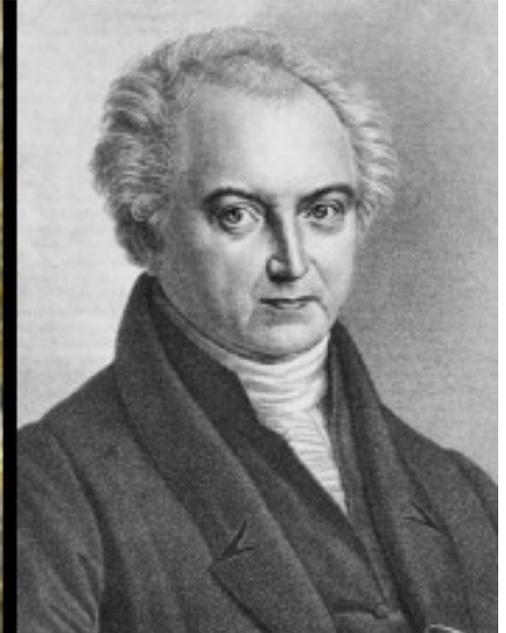


Figure 24-23
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Paradoxo de Olbers (1823)

Análogo a uma floresta de extensão infinita:



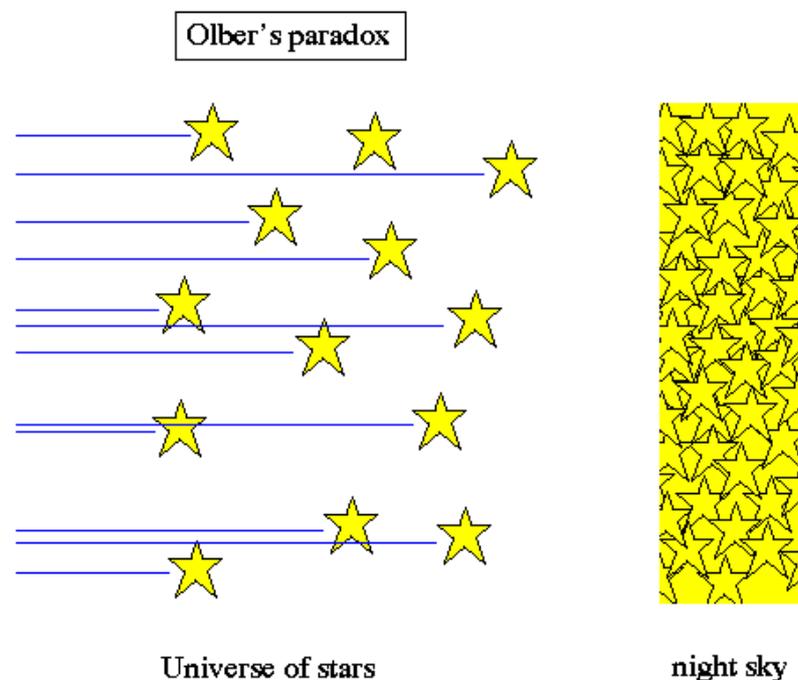
Heinrich W. M. Olbers
1758-1840

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.

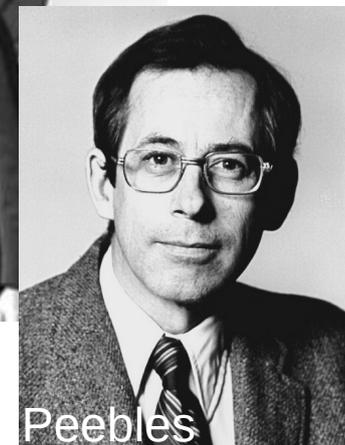


Já que o **céu** de noite é **escura**, um dos dois (ou ambos), o tamanho ou a idade do Universo, deve ser **finito** (hoje sabemos que pelo menos a idade é finita).

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.

Radiação Cósmica de Fundo

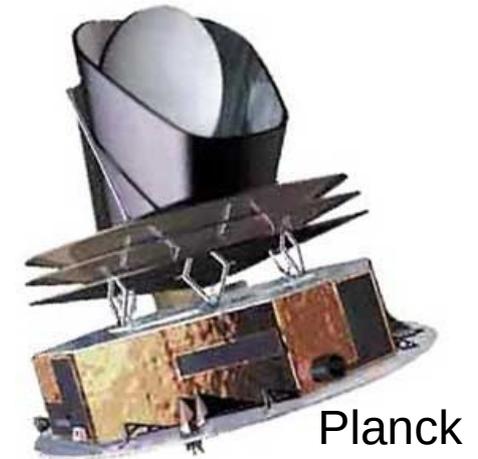
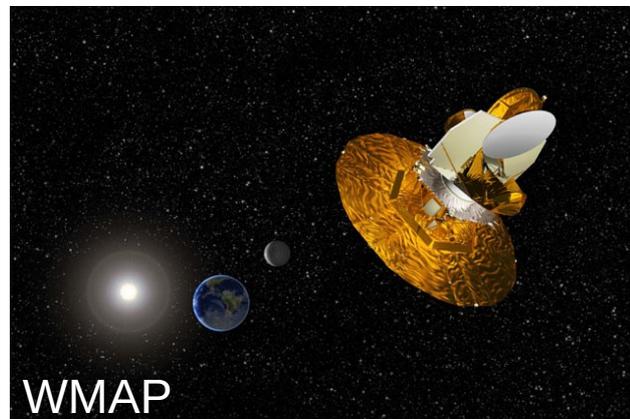
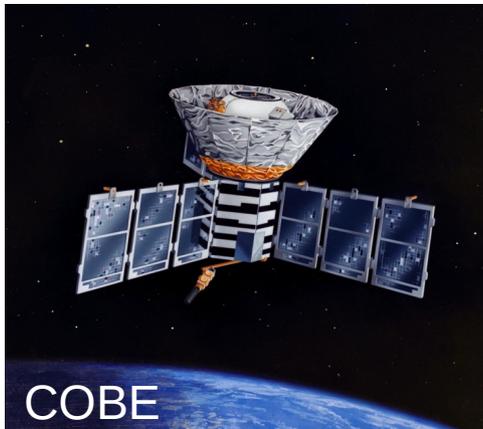
- **Emitida** na época da “**re-combinação**” (formação de átomos a partir de núcleos e elétrons), quando o Universo tinha **~378 000 anos** de idade
 - **Prevista** por Гамов (Gamov), Alpher e Hermann em **1948**
 - **Descoberta** por acaso por Penzias & Wilson (**1965**)
 - Explicada por Burke, Dicke 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**: (*Cosmic Background Explorer*): lançado em 1989, resultados 1992
- **WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*): lançado em 2001, resultados 2003/2006
- **Planck**: lançado em 2009, mediu até 10/2013, mediu polarização também



Radiação Cósmica de Fundo

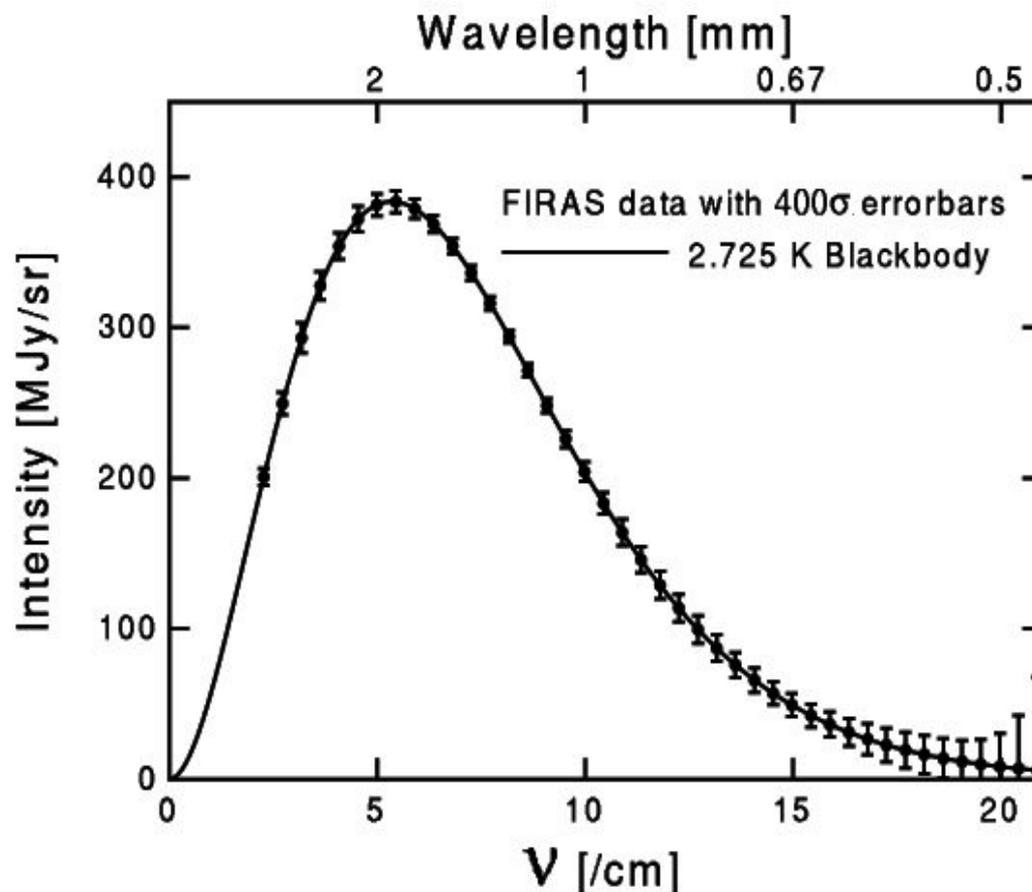
Espectro de Corpo Negro:

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

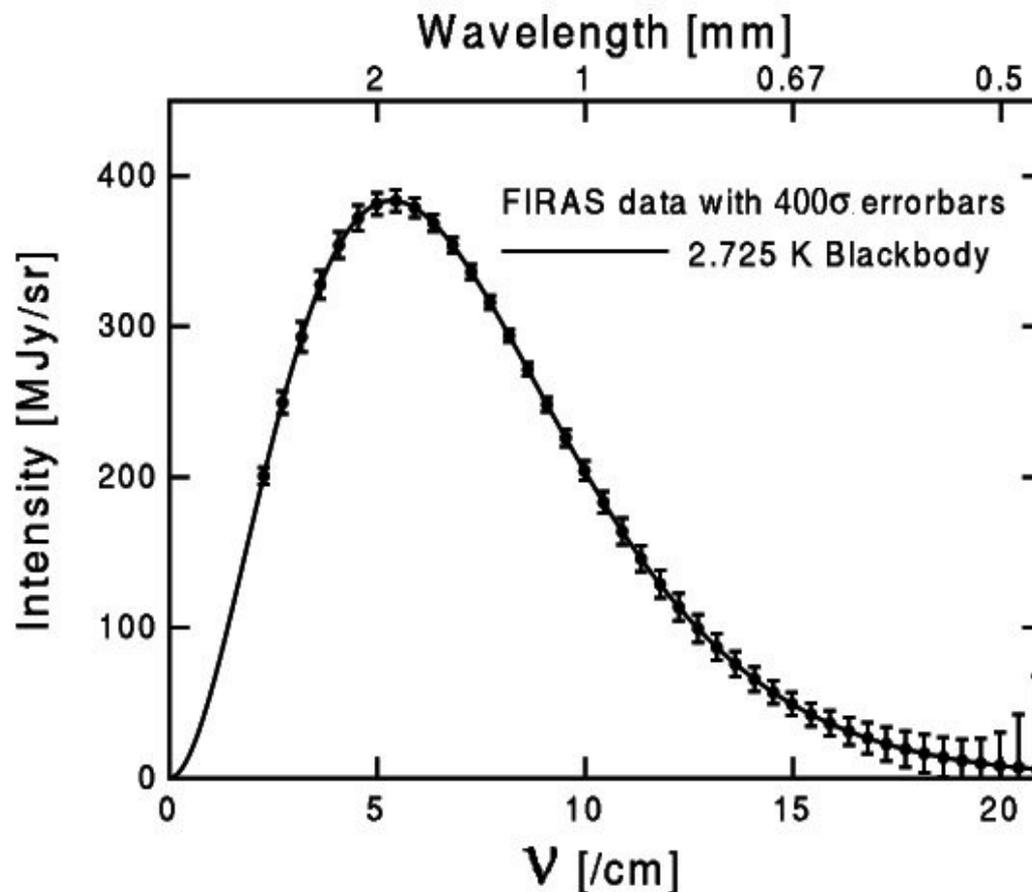
=> Prova, que a “re-combinação” aconteceu, ou seja, uma evidência experimental de uma época logo após o *Big Bang*, e mais uma prova pra expansão do Universo.



Radiação Cósmica de Fundo

Espectro de Corpo Negro:

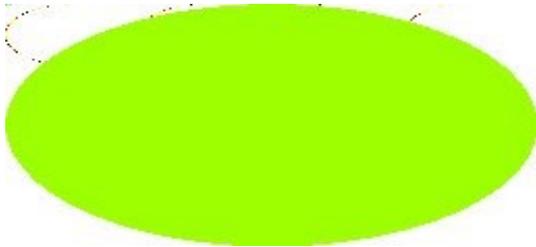
A descoberta do espectro quase perfeito de Corpo Negro e da anisotropia (\Rightarrow jájá) da Radiação Cósmica de Fundo rendeu o prêmio Nobel de física de 2006 aos responsáveis pelo projeto COBE, John C. Mather e George F. Smoot 



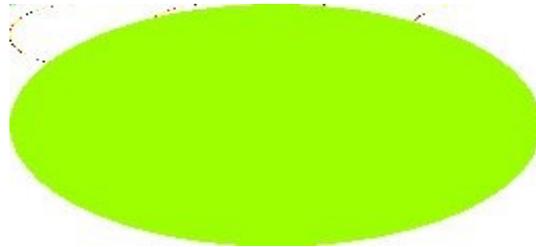
Radiação Cósmica de Fundo

Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

Dados COBE



WMAP



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

Radiação Cósmica de Fundo

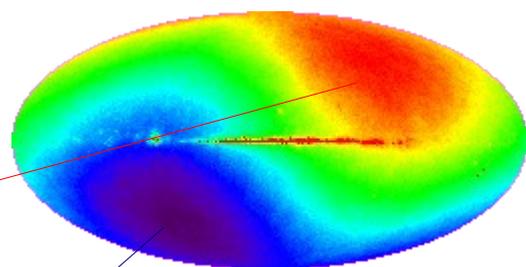
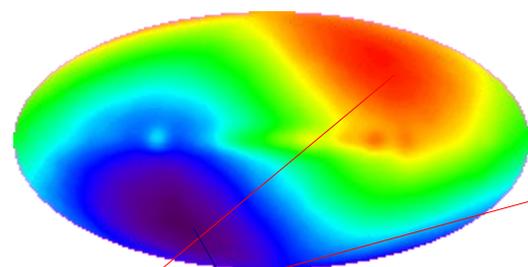
Mapas de temperatura da Radiação de Fundo do céu

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) com 371 km/s 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**

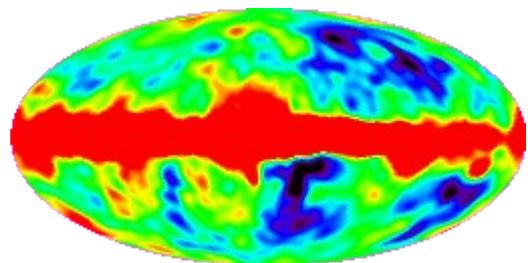
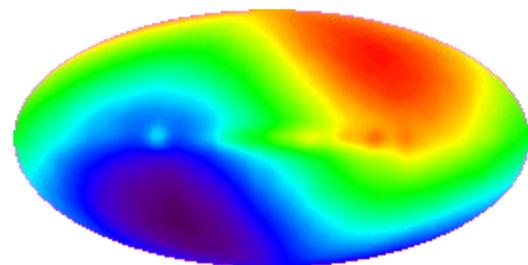
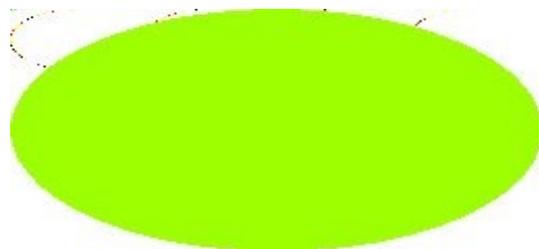
O Sol está indo pra **direção oposta** desta direção (Aquário)

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

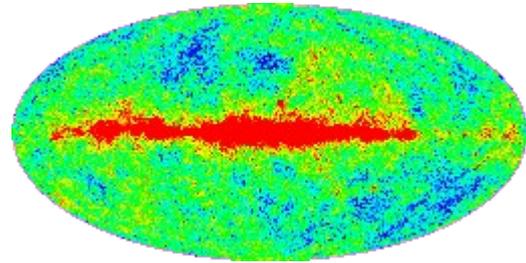
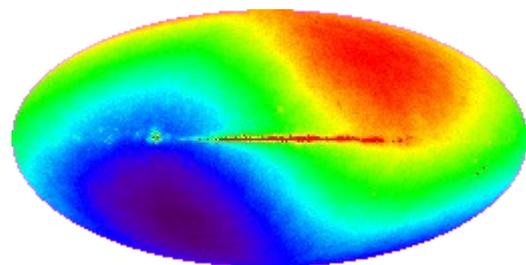
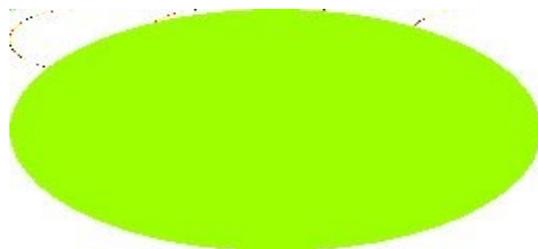
Radiação Cósmica de Fundo

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



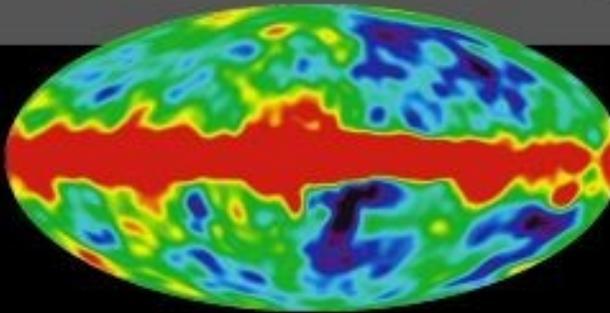
Penzias and
Wilson



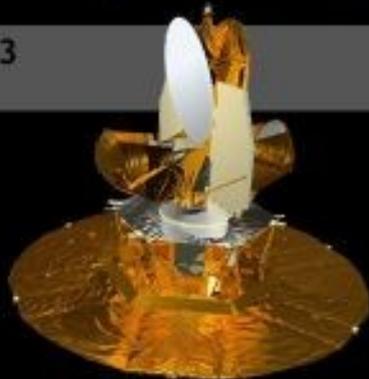
1992



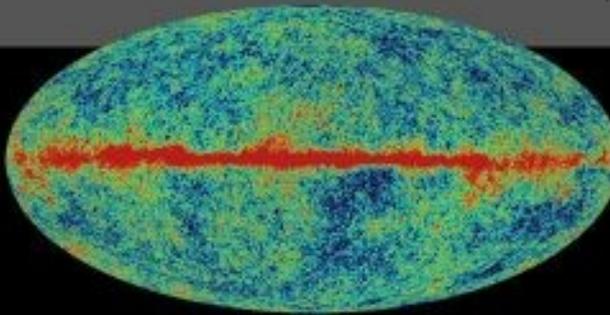
COBE



2003



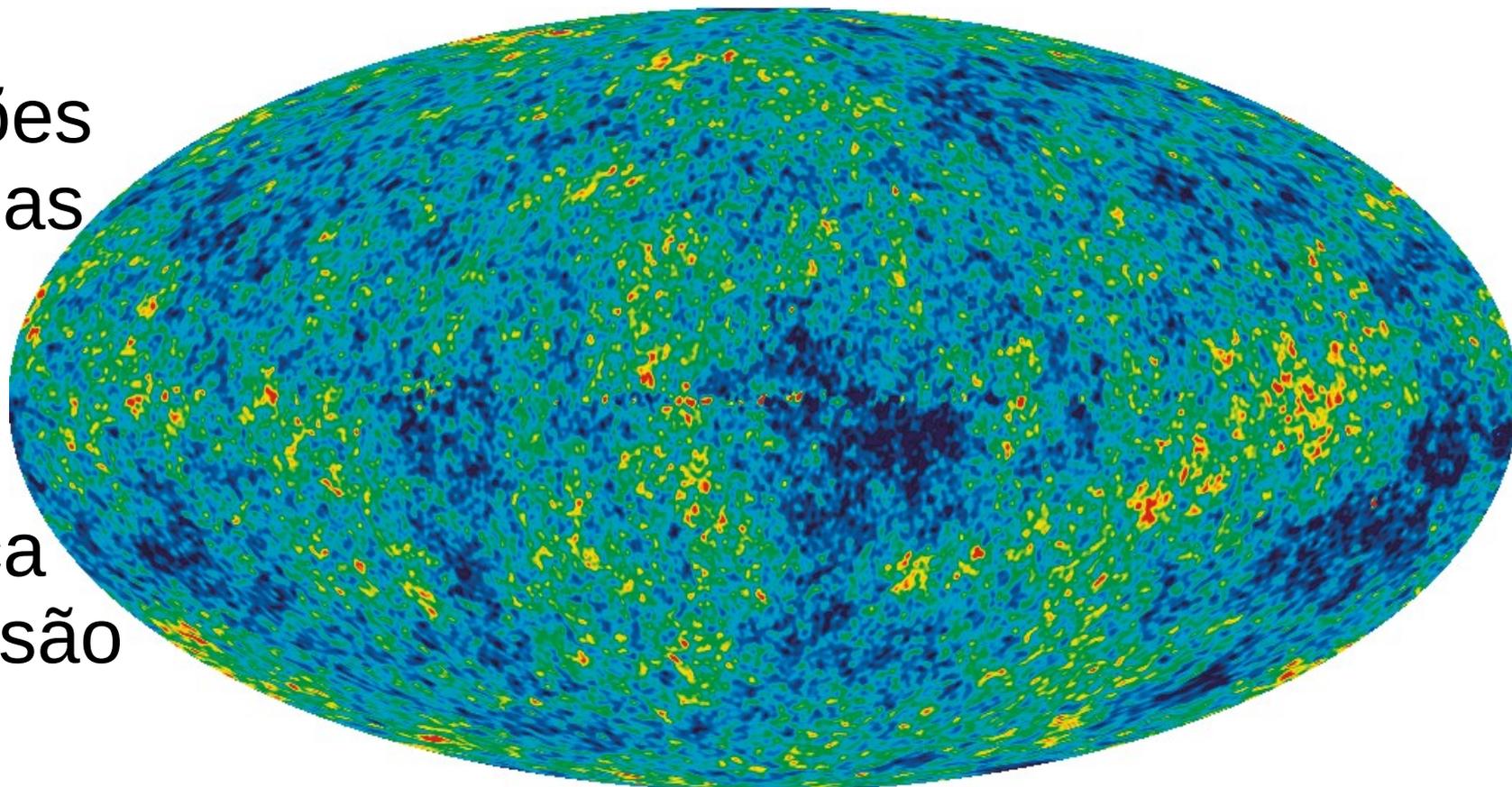
WMAP



Radiação Cósmica 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.

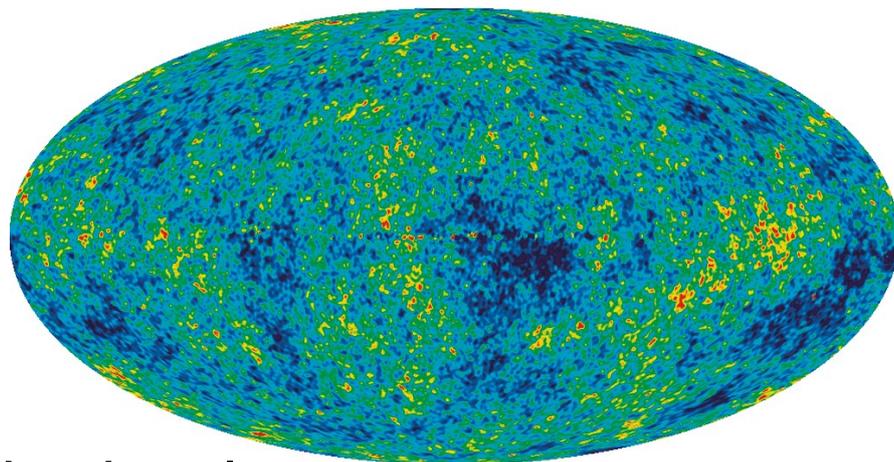
=> As sobredensidades da matéria visível **não** eram **suficientes** para **formar** as **estruturas observadas hoje** (**galáxias, Aglomerados de galáxias, ...**).

Elas deviam ter sido uns 1000 vezes maiores.

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

=> **Evidência para a Matéria Escura não-bariônica.**

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

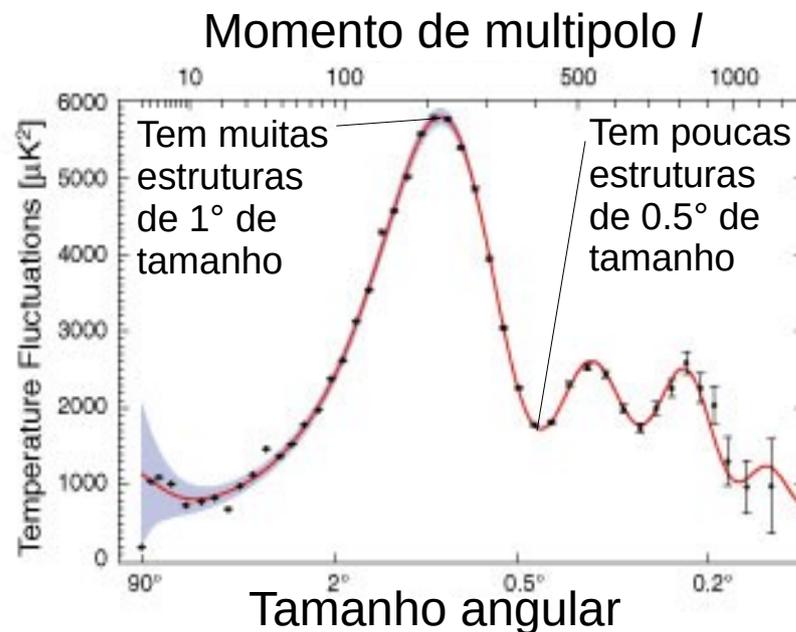


Radiação Cósmica de Fundo

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 Cósmica de Fundo

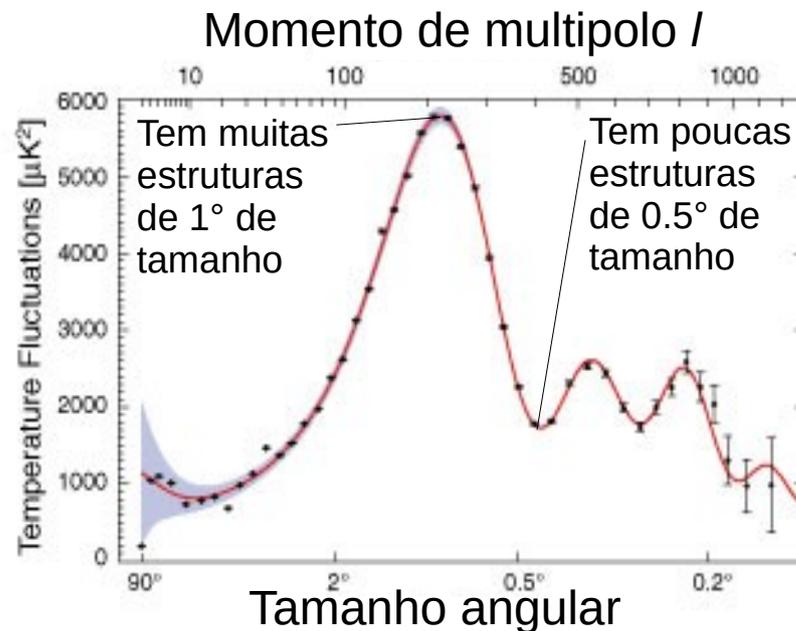
Espectro Angular da Radiação Cósmica de Fundo

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 tínhamos 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.**

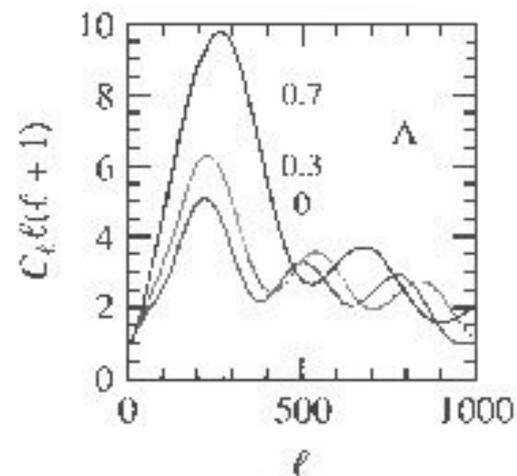
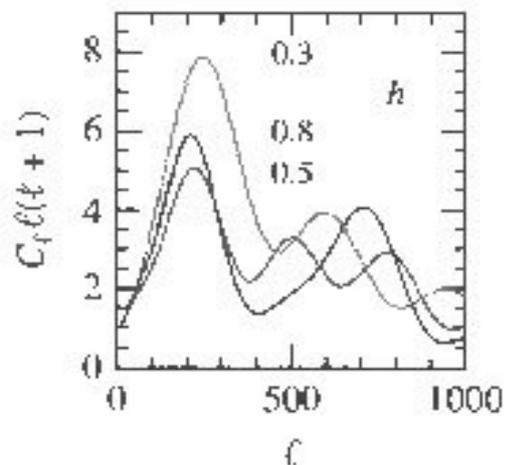
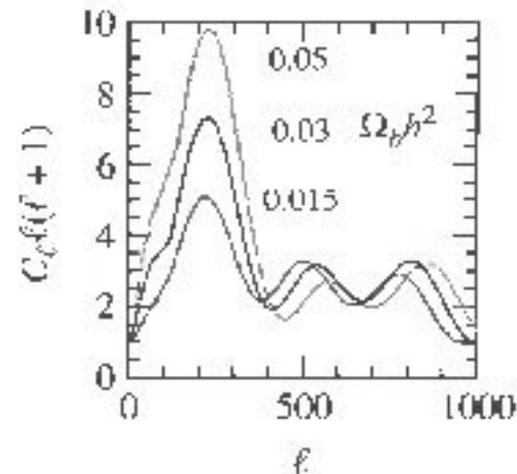
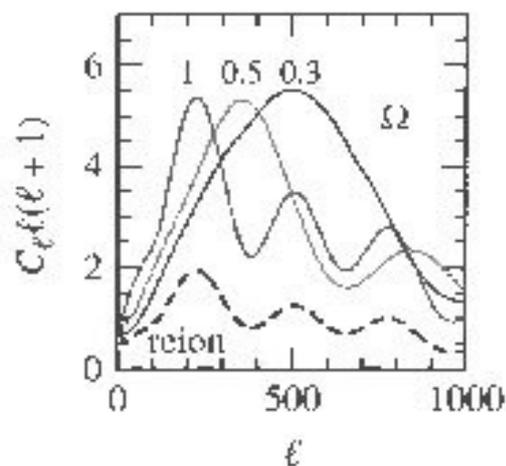


Radiação C3smica de Fundo

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**.

Por exemplo: A raz3o entre as alturas do primeiro e do segundo pico nos diz qual fra33o da mat3ria 3 bari3nica.



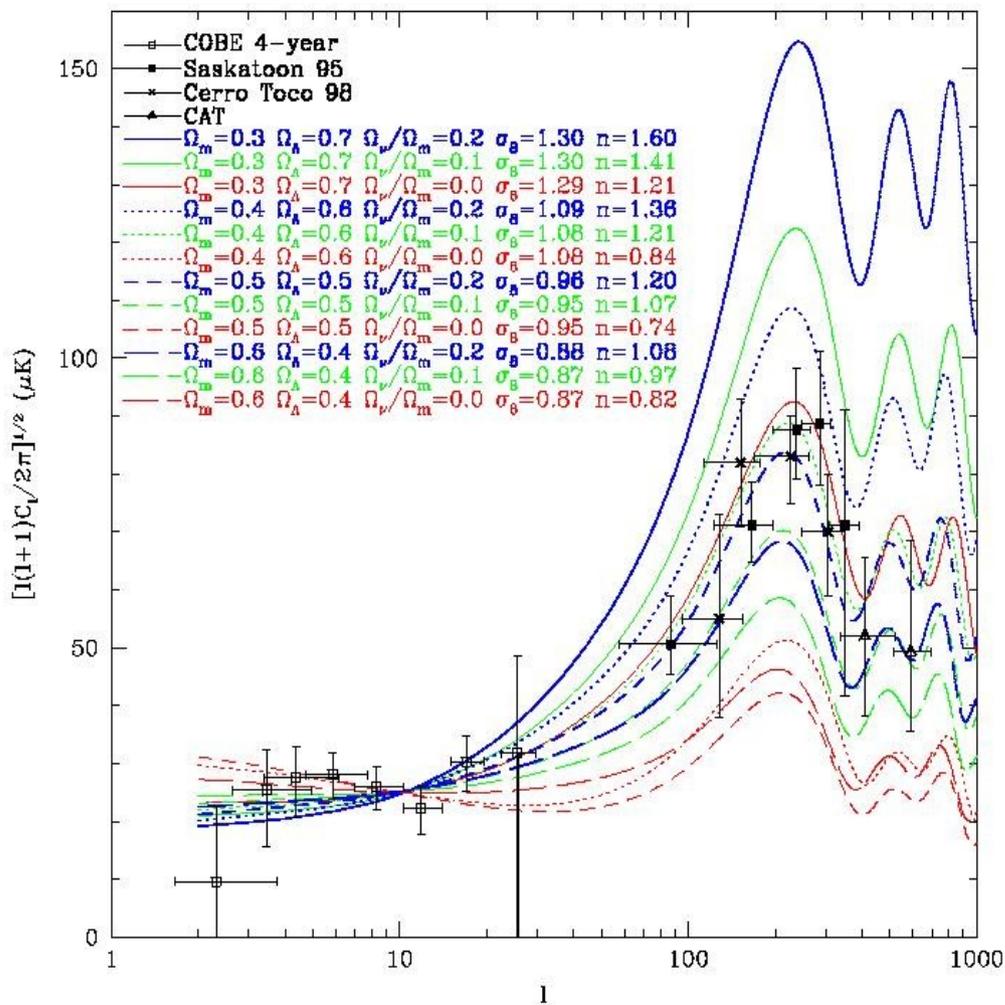
Variando v3rios par3metros do modelo

Radiação C3smica de Fundo

Espectro Angular da Radia33o C3smica de Fundo

O espectro angular da radia33o c3smica de fundo **bate exatamente** com o espectro previsto para o **modelo Λ CDM**: Mat33ria vis33vel comp33e 5 %, Mat33ria Escura, 26 % e Energia Escura, 69 % da densidade cr33tica.

=> **Prova para todo o modelo Λ CDM.**



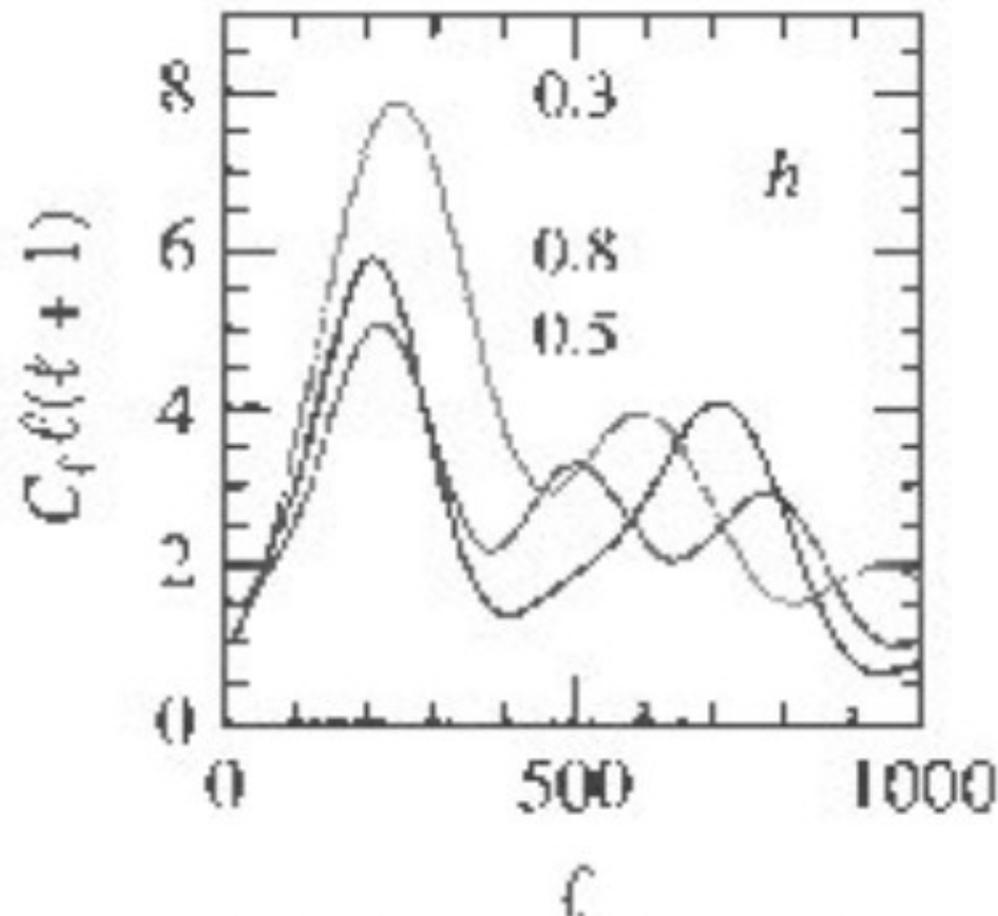
Radiação C3smica de Fundo

A Tens3o de Hubble

Como dito, um dos parâmetros que dá para achar pelo **ajuste** do **espectro** de **pot3ncia angular** da **RCF** é a “**constante**” de **Hubble**.

A colabora3o Planck achou

$$H_0 = 67.7 \text{ km/sMpc}$$



Varia3o do espectro de pot3ncia angular da RCF com a constante de Hubble ($h = H_0$ em unidades de 100 km/sMpc)

Radiação Cósmica de Fundo

A Tensão de Hubble

Porém, **medidas recentes** de maneira “tradicional”, i.e., medindo **magnitudes aparentes** e **redshifts** de **velas padrão** e usando a definição da constante de Hubble, $H_0 = v/d = zc/d$, resultam em valores da ordem de 74 km/sMpc, uns 10% mais altos

=> **Tensão de Hubble**

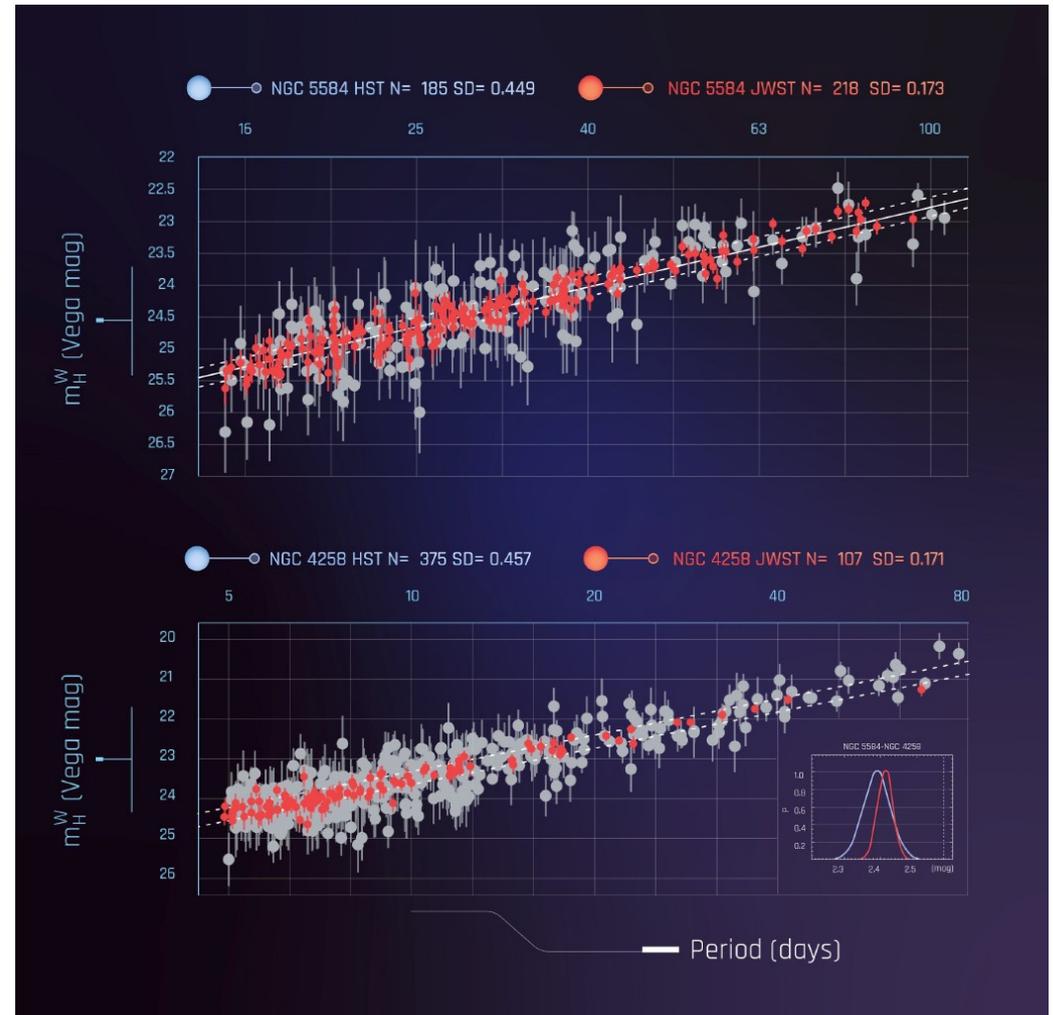
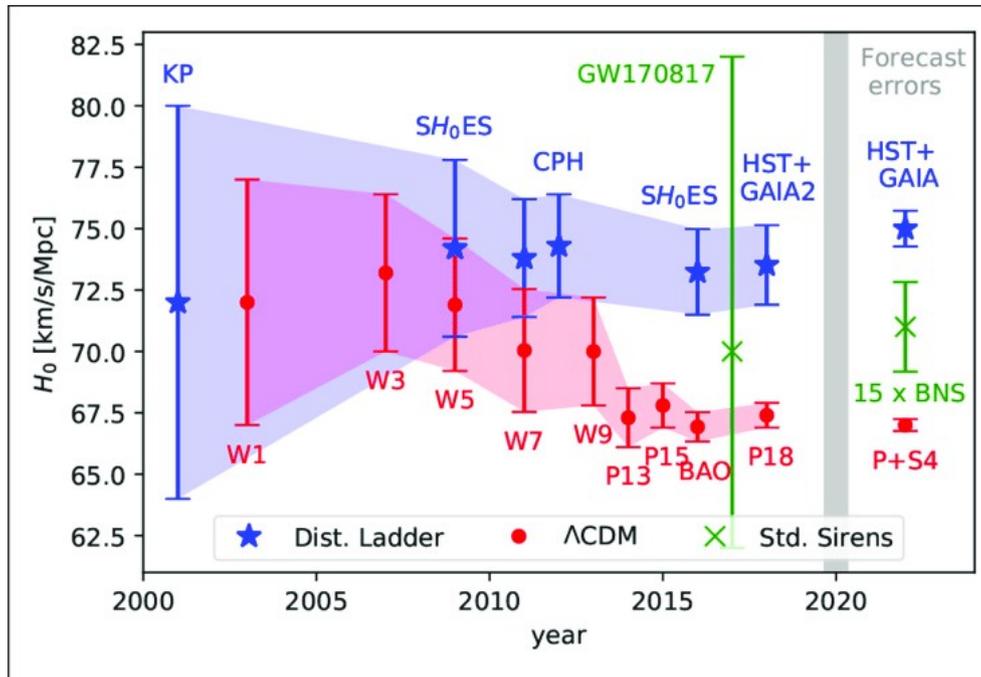
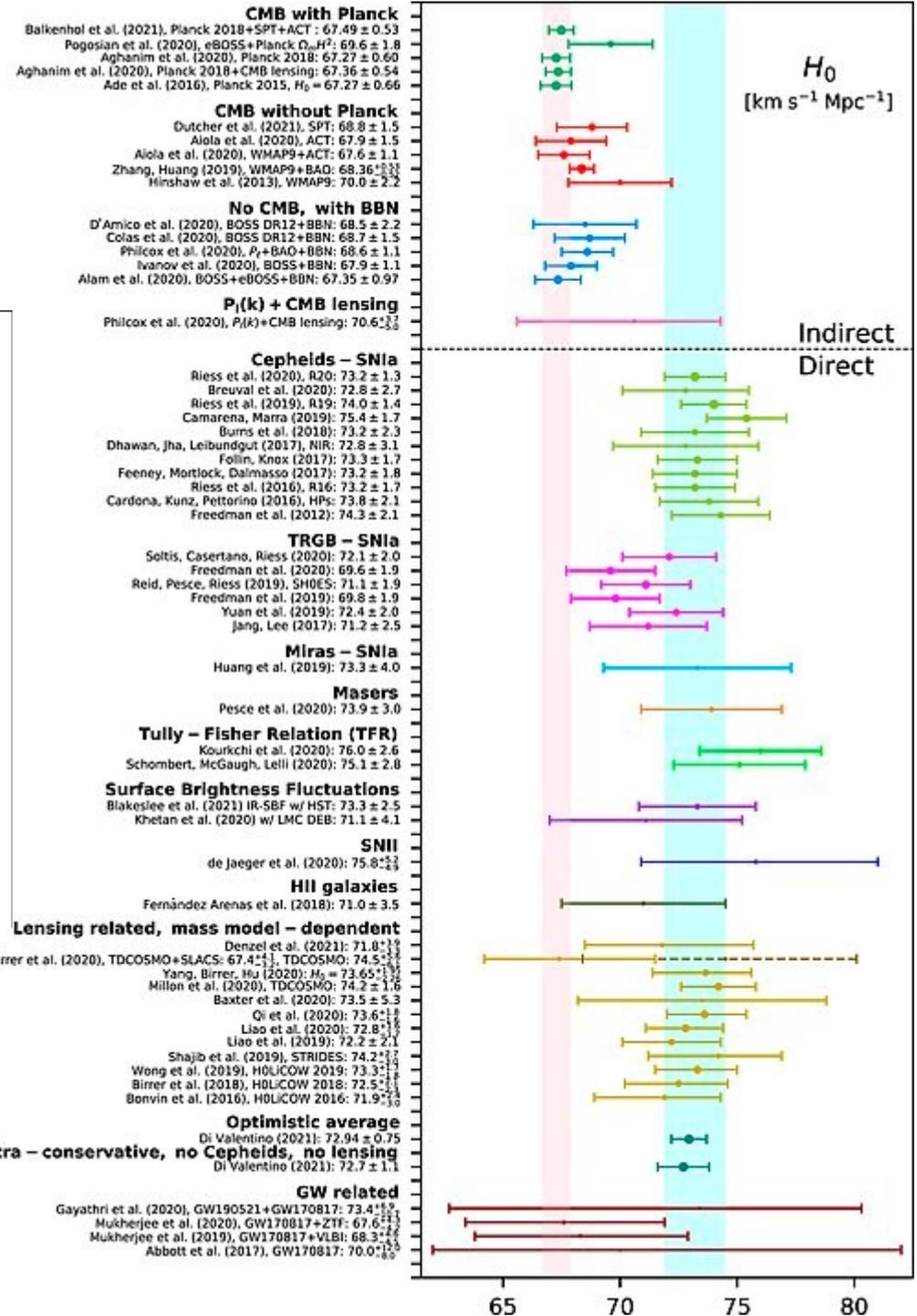


Diagrama de Hubble usando dados de Cefeidas de HST e JWST

Radiação Cósmica de A Tensão de Hubble



Vários trabalhos acham a mesma coisa...



Radiação Cósmica de Fundo

A Tensão de Hubble

Possíveis explicações:

- **Erro sistemático** em um dos métodos?
Requereria **múltiplos efeitos não-relacionados**.
- **Princípio cosmológico inválido**
Deveríamos estar num **void enorme** até $z \sim 0.5$?
- **Nova física**, i. e. além de Λ CDM?
 - teoria modificada da gravitação (MOND)
 - Energia Escura com equação de estado variável
 - Matéria Escura decaindo em “radiação escura”Cada hipótese cria **outros problemas**

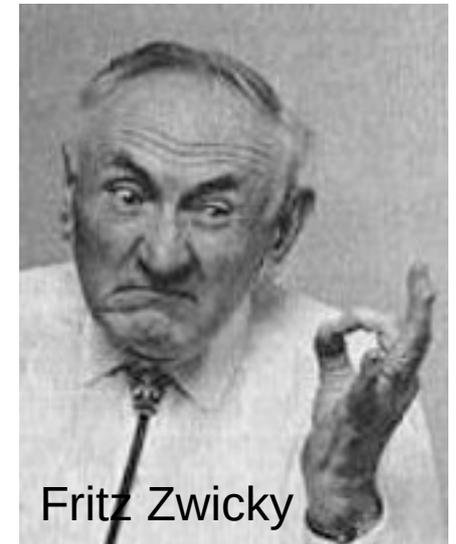
Outras Evidências para a Matéria Escura

Além dos movimentos das estrelas em galáxias (=> aulas Via Láctea, galáxias I)

Massas de Aglomerados de galáxias

Dinâmica das galáxias

1933: Zwicky postulou Matéria Escura em Coma
(massa estimada pelo teorema de virial)



Fritz Zwicky



Aglomerado de Coma

Outras Evidências para a Matéria Escura

Massas de Aglomerados de galáxias

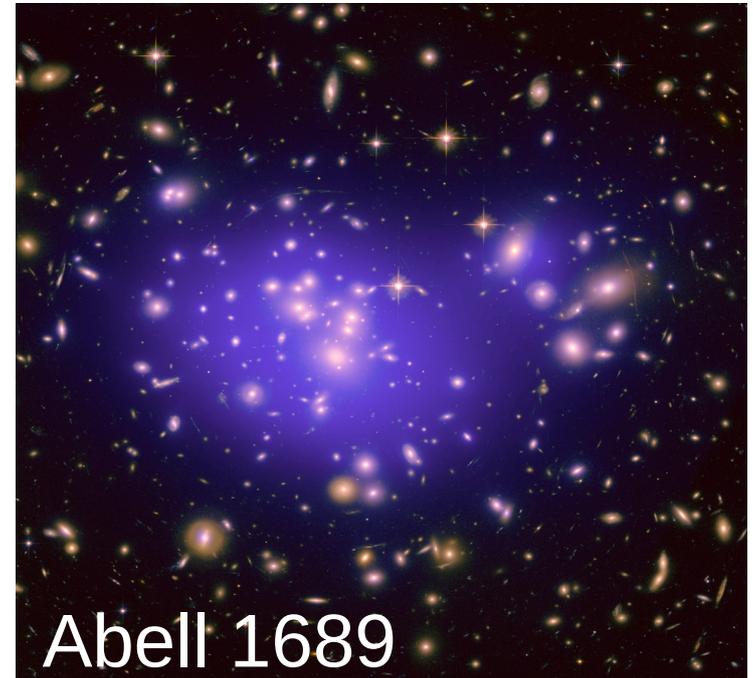
Dinâmica das galáxias

As galáxias em um Aglomerado se movimentam, com velocidades cujos componentes radiais podem ser medidos através dos seus espectros, pelo efeito Doppler.

A dispersão de velocidades σ_r depende da massa do Aglomerado, que pode, então, ser calculada usando o teorema de virial*: $M \approx 5\sigma_r^2 R/G$

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

*da mesma maneira que a massa de uma galáxia elíptica pode ser estimada a partir da dispersão de velocidades das suas estrelas (aula galáxias II)



Abell 1689

Outras Evidências para a Matéria Escura

Massas de Aglomerados de galáxias

Radiação do gás inter-aglomerado

Além de galáxias, os Aglomerados contêm **gás**, de **massa maior** do que as galáxias, que irradia em **raios X** devido a 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 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

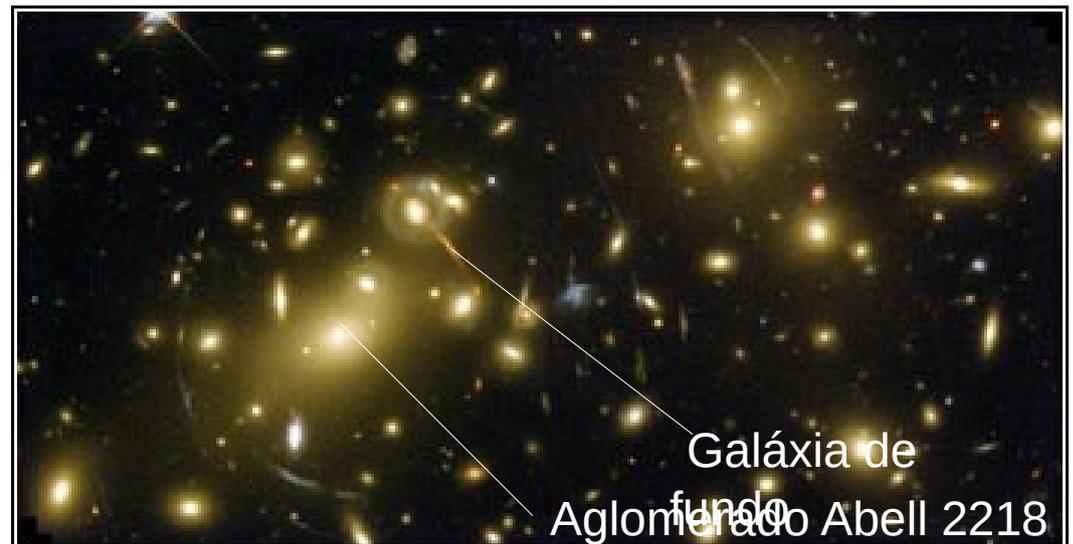
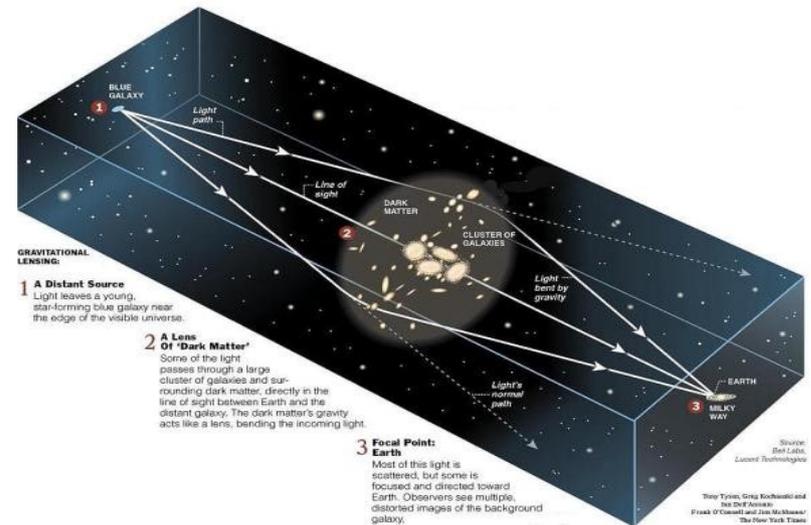
Massas de Aglomerados de galáxias

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** (=> aula Relatividade).

Medindo a **distorção** das imagens destas galáxias “de fundo”, pode se determinar a **massa** do objeto **na frente** (a lente, no caso, 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).

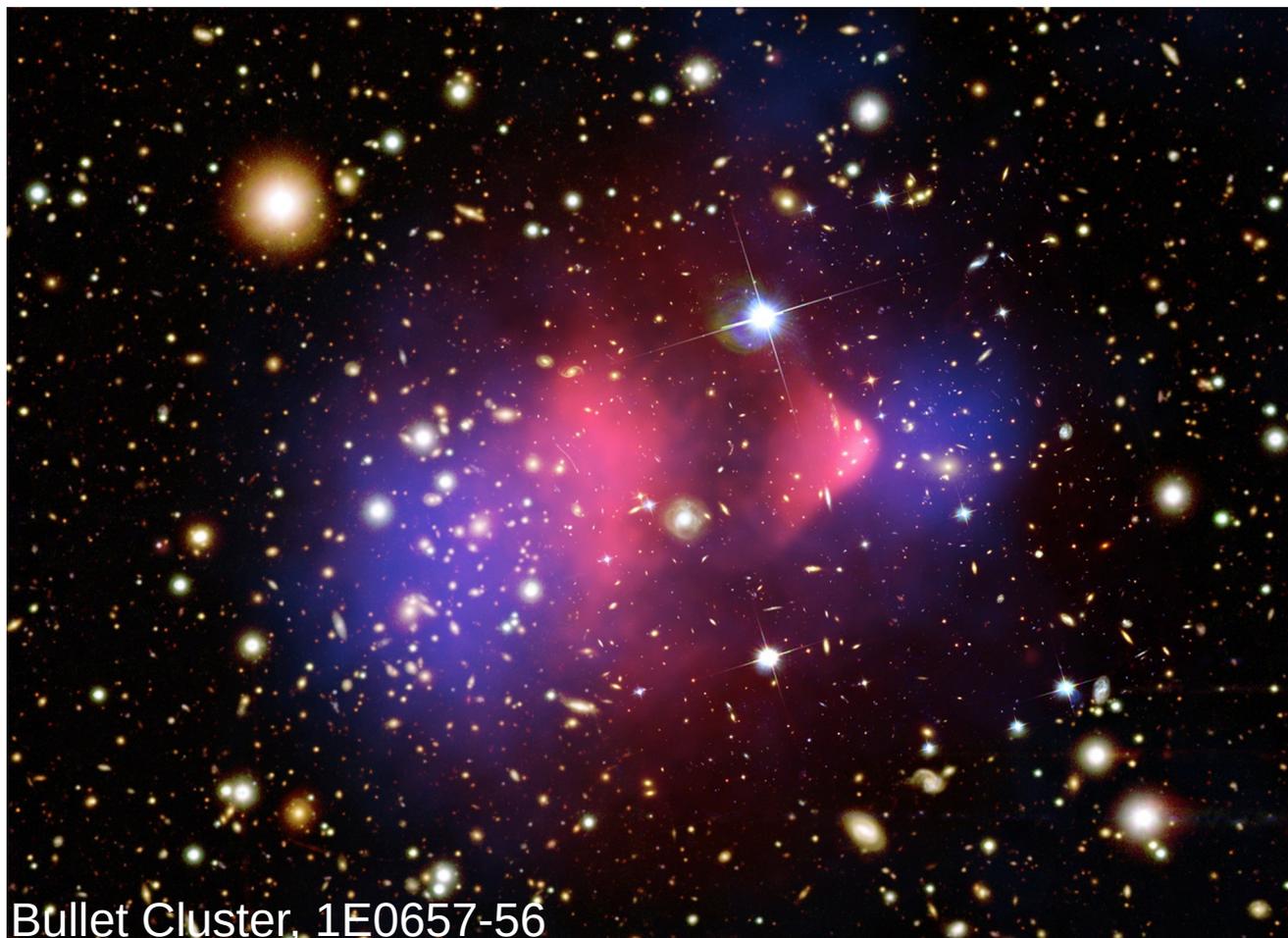
=> **Outra evidência para a Matéria Escura** não-bariônica.

Outras Evidências para a Matéria Escura

Distribuição de Massa em Aglomerados de galáxias

O Bullet Cluster (“Aglomerado Bala”) é, 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).



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

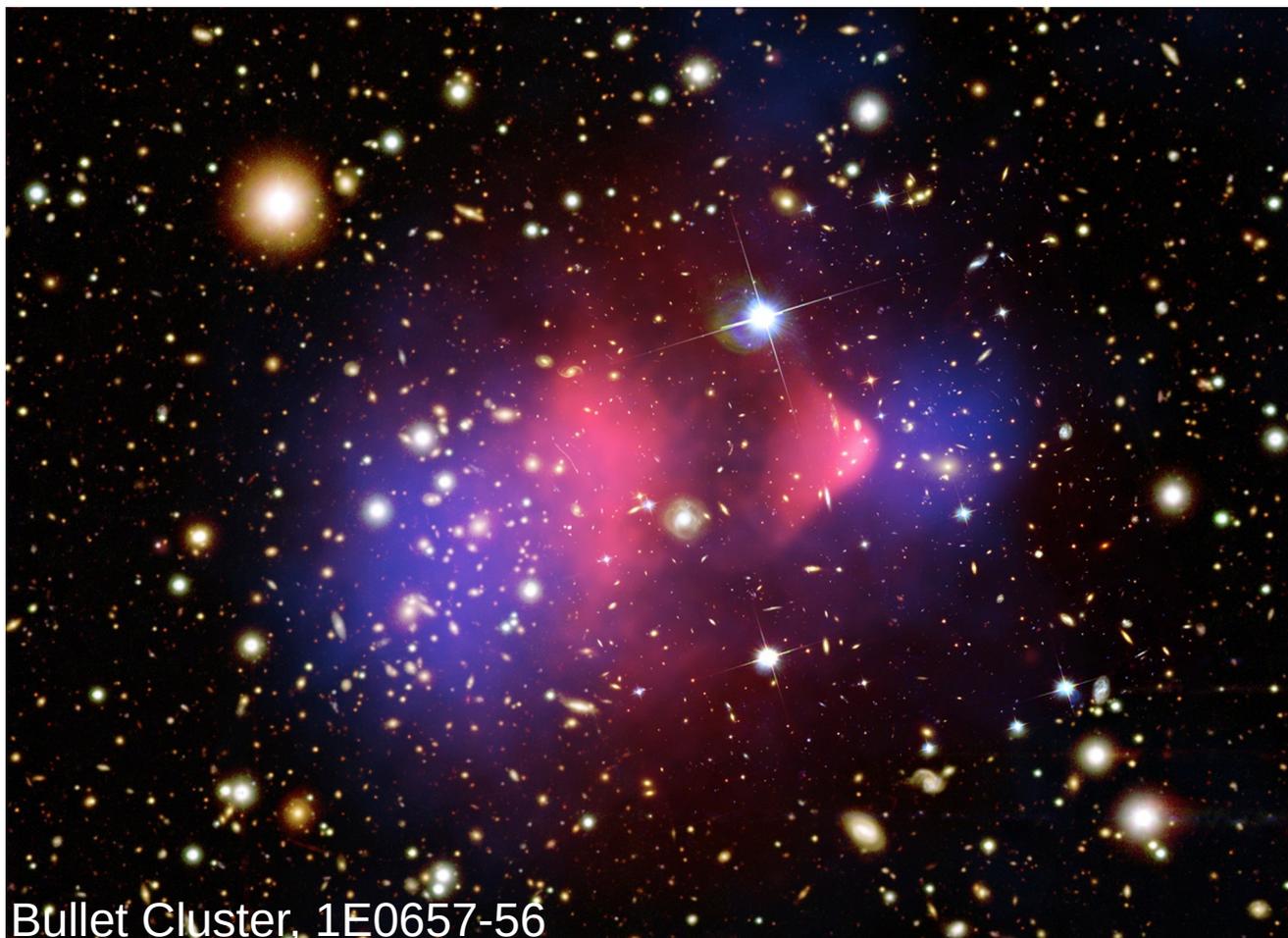
Outras Evidências para a Matéria Escura

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.

Já sabemos que não são MACHOs (=> aula Via Láctea).

Anos 80: Duas Possibilidades

- **Hot Dark Matter** (ingl. para Matéria Escura **Quente**):
Partículas de muito **baixa massa** e com **altas velocidades**:
neutrinos ($< 10^{-36}$ kg), táquions ou outras partículas hipotéticas
- **Cold Dark Matter** (Matéria Escura **Fria**):
Partículas ou até **objetos** com **massa** mais **alta**,
e **velocidades** (mais) **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)

(Já conhecemos estes dois cenários da aula galáxias II)

Do que consiste a Matéria Escura?

Como distinguir?

=> A **formação das estruturas** se dá **diferentemente** nas duas hipóteses, *top-down* vs. *bottom-up*.

=> 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

Na aula galaxias II foram apresentados alguns argumentos, na maioria a favor do cenário *bottom-up*.

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.

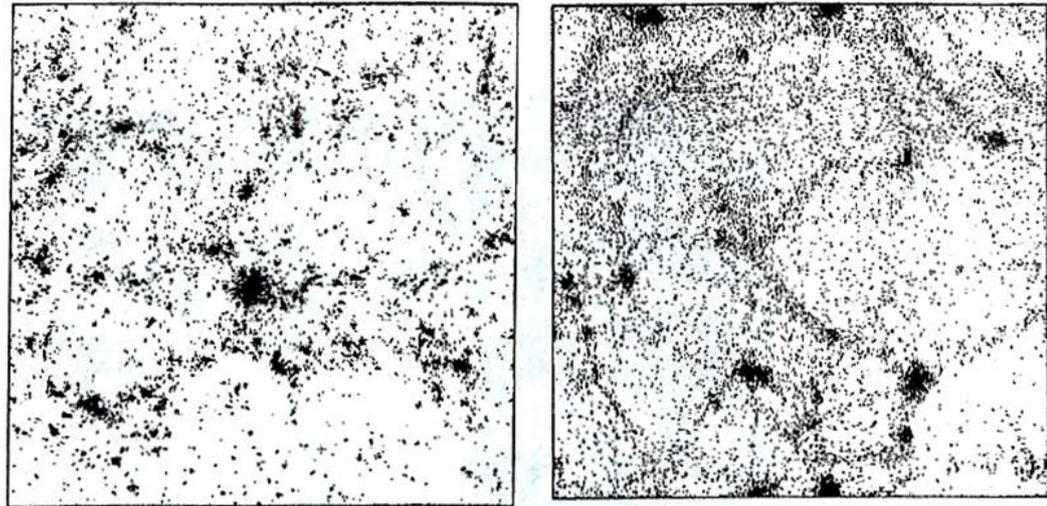


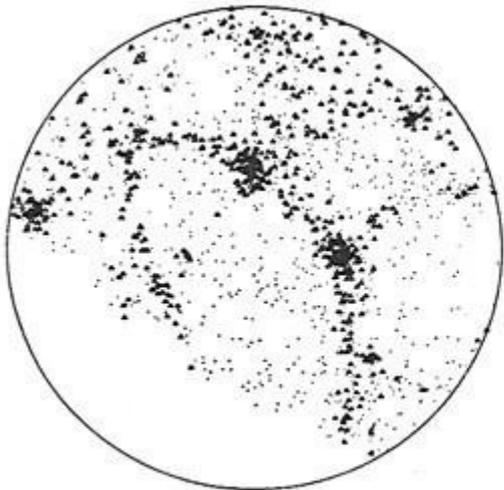
FIGURE 30.10 The results of numerical simulations of the formation of structure in the universe from the bottom-up clumping of cold dark matter (left), and the top-down fragmentation of hot dark matter (right). Both models assume $\Omega_0 = 1$ and $h = 0.5$. (Figure from Frenk, *Physica Scripta*, T36,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

Do que consiste a Matéria Escura?

Simulações da evolução das grandes estruturas no Universo

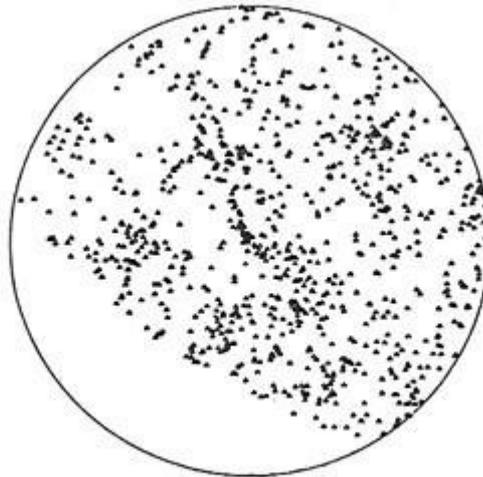
Cada ponto é uma galáxia.

Com Matéria Escura
Quente



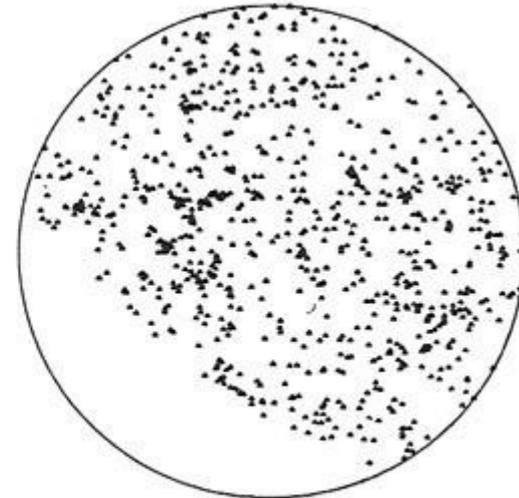
HDM

Distribuição
Observada



Observed Galaxy Distribution

Com Matéria Escura
Fria

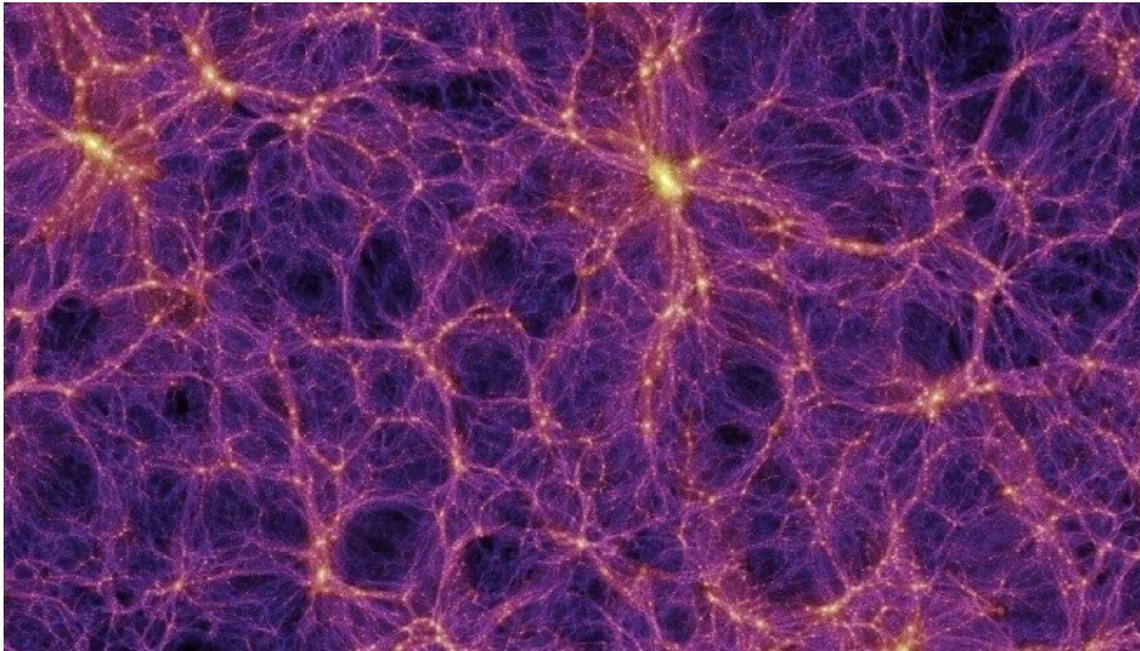


CDM

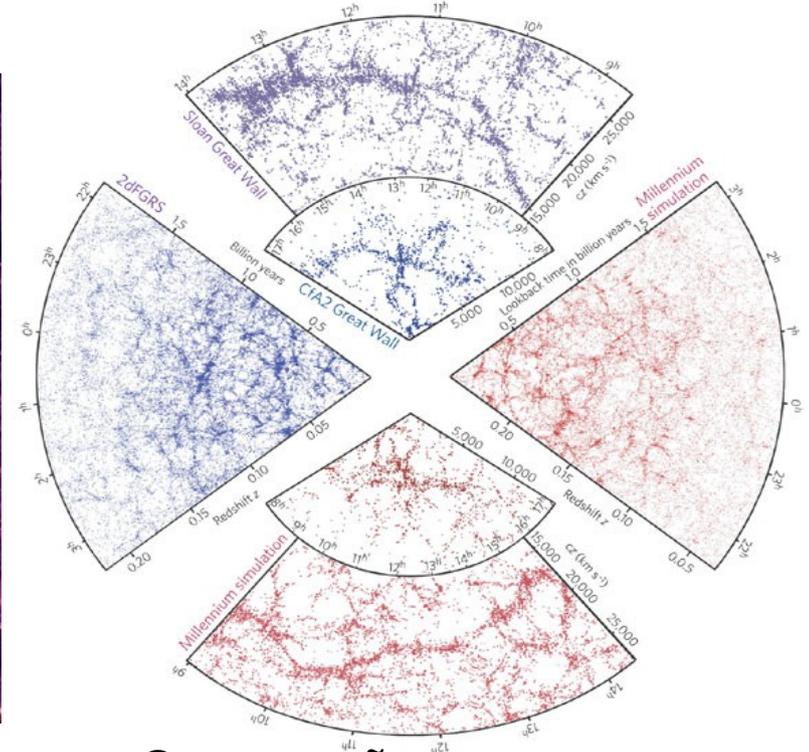
=> A simulação com **Matéria Escura Fria** reproduz a distribuição observada melhor

Do que consiste a Matéria Escura?

Simulação mais recente com Matéria Escura Fria



Dark Matter Millenium Simulation



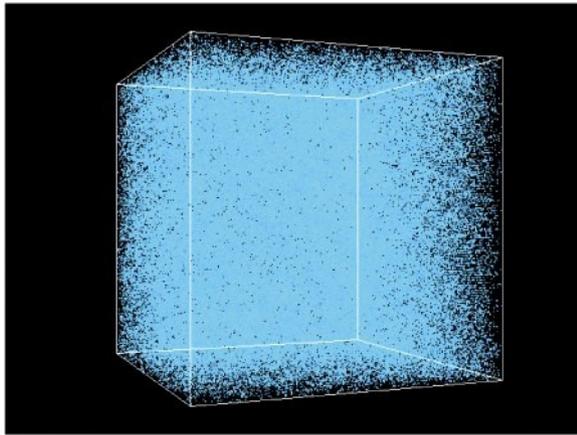
Comparação com uma amostra de redshifts

Reproduz perfeitamente a distribuição observada.

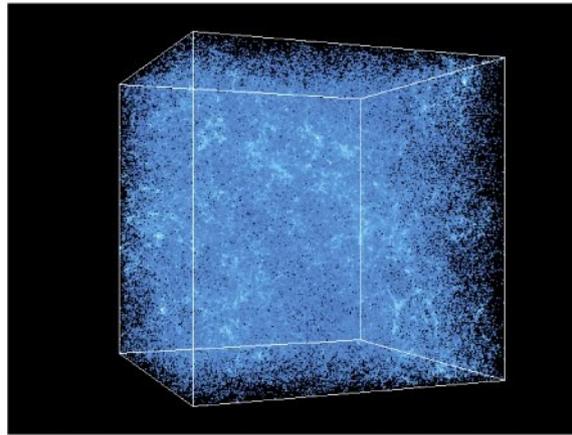
=> A Matéria Escura é **Fria** (CDM)

Do que consiste a Matéria Escura?

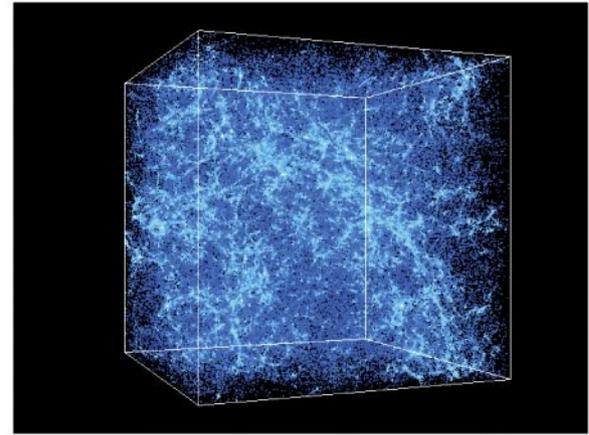
Evolução de um Cubo Comovente segundo a Simulação



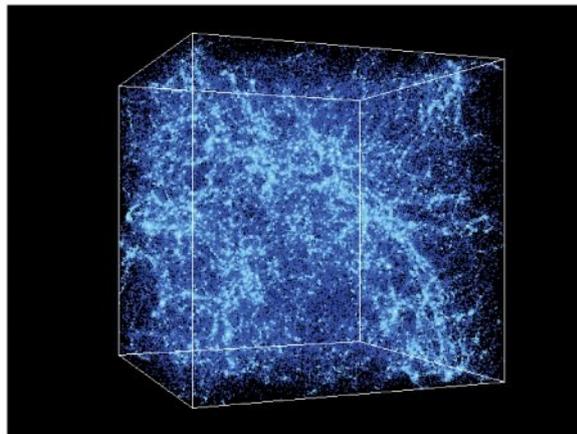
$z = 27.36$ Universe 120 million years old



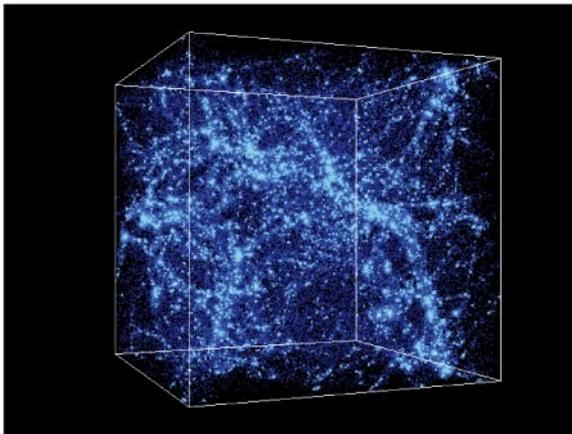
$z = 9.83$ Universe 490 million years old



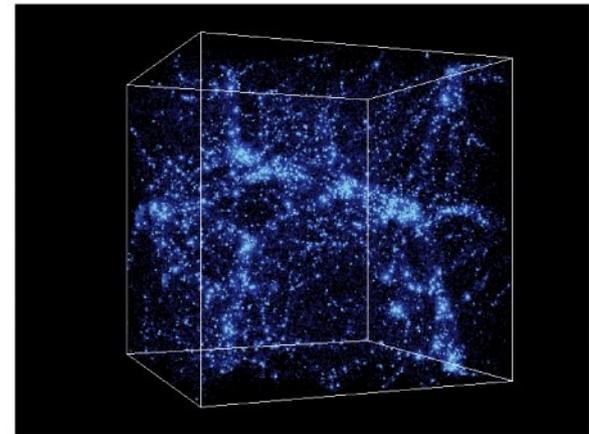
$z = 4.97$ Universe 1.2 billion years old



$z = 2.97$ 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

Do que consiste a Matéria Escura?

Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

Mas nas **escalas menores**, os modelos com Matéria Escura também não reproduzem a distribuição de galáxias perfeitamente: Elas prevêm muito **mais** (centenas) **galáxias anãs** no **Grupo Local**, do que observado.

=> **Problema da galáxia anã**, também conhecido como o **problema dos satélites ausentes**.

Saídas possíveis são, que ainda não detectamos estas galáxias (galáxias anãs podem ser muito difíceis de observar),

ou que elas foram destruídas por forças de maré devido às galáxias grandes.



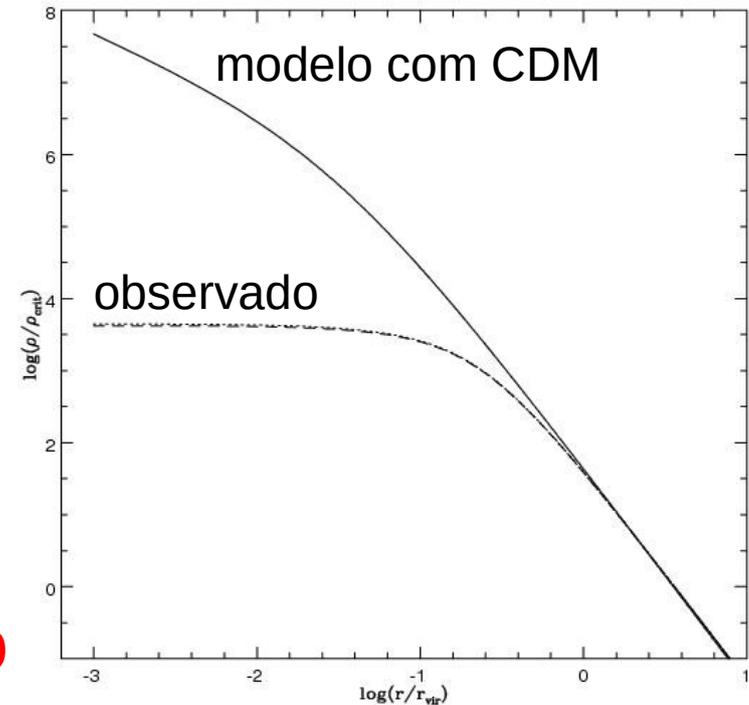
Fornax, uma galáxia dSph

Do que consiste a Matéria Escura?

Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

O *cuspy halo problem*
(problema dos halos pontudos?):

As distribuições de densidade em halos de Matéria Escura em simulações CDM são muito mais “pontudas”, do que é observado em galáxias investigando as curvas de rotação delas.



Do que consiste a Matéria Escura?

Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

Problema de morfologia galáctica:

Se galáxias cresceram **hierarquicamente**, então **galáxias de alta massa** requerem **muitas fusões**. **Fusões grandes** criam **bojos** inapagáveis.

Porém, ~80 % das **galáxias observadas não** contêm **bojos**, e galáxias discos gigantes sem bojos são comuns. A fração de galáxias sem bojos foi quase constante por 8 bilhões de anos.

Tentativas de resolver os problemas incluem usar misturas CDM-HDM, ou até WDM (*Warm Dark Matter*, matéria escura morna, algo entre CDM e HDM).

Outras Evidências para a Energia Escura

Luminosidades de Supernovas Ia

Supernovas (SN) são **explosões** de **estrelas** no final das suas “vidas” (=> aulas Estrelas, Estágios Finais).

Para um certo tipo, as Supernovas Ia (=> aula Estágios Finais), estas explosões **sempre** ocorrem com a **mesma luminosidade**, que conseguimos determinar através de SN Ia que ocorreram “perto daqui”.

Se diz que SN Ia são **velas padrão**.

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

=> 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

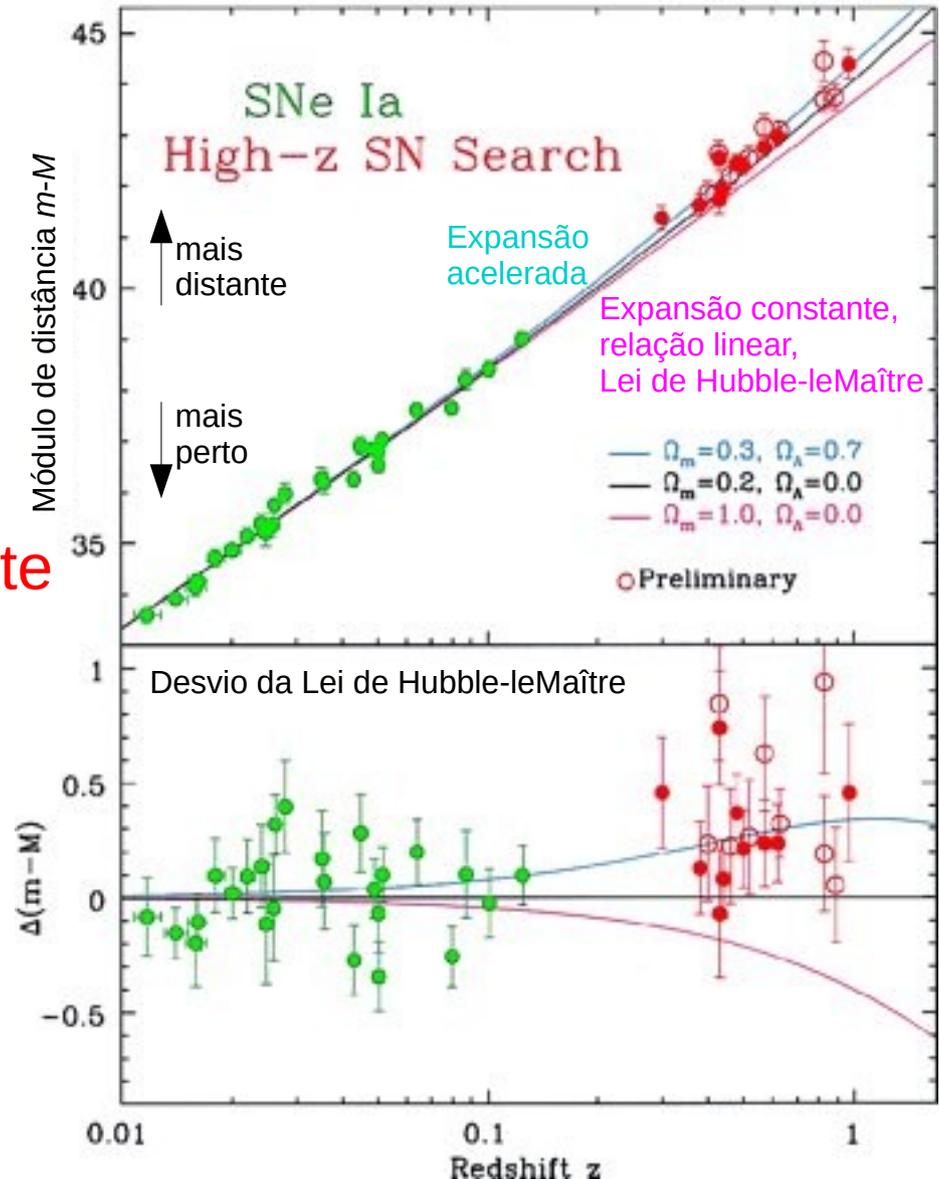
Luminosidades de Supernovas Ia

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

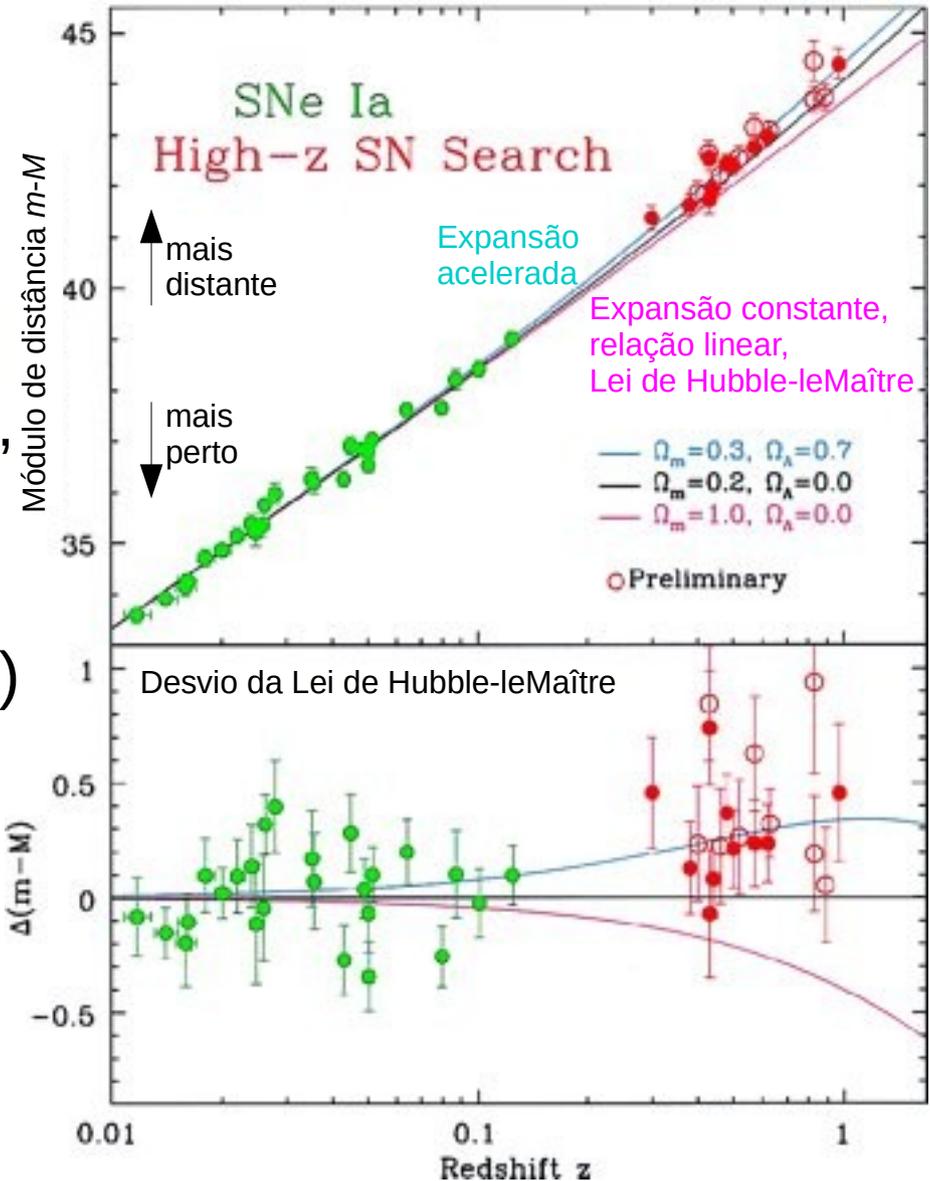
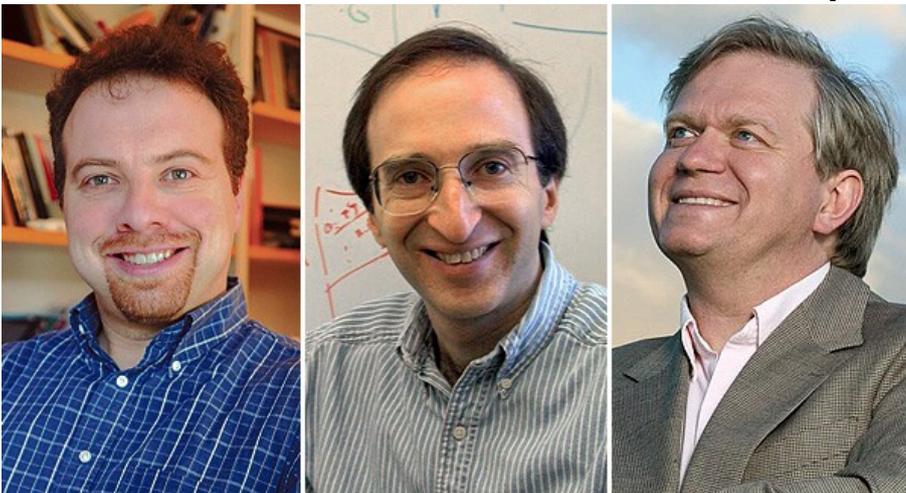


Outras Evidências para a Energia Escura

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**.

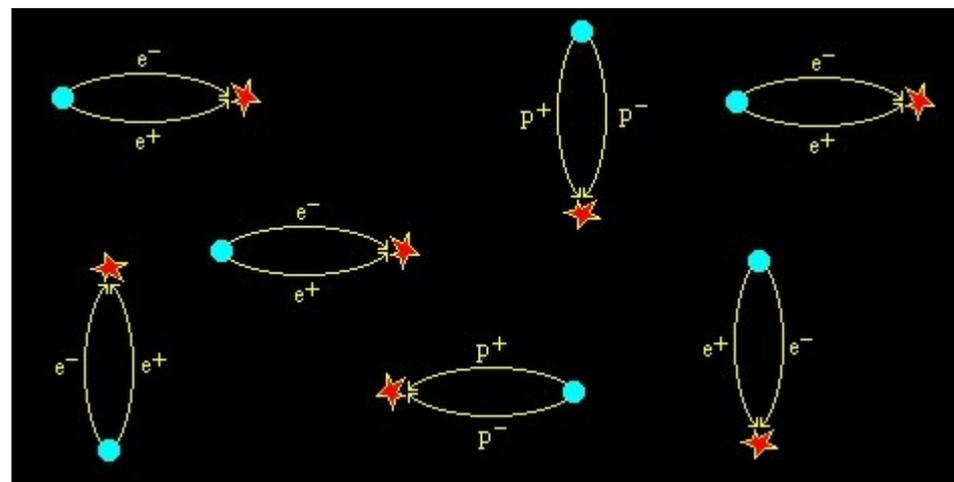
=>  Prêmio Nobel para Perlmutter, Schmidt e Riess (2011)



Do que consiste a Energia Escura?

Ninguém sabe!

Uma hipótese identifica ela com a “**energia do vácuo**”, prevista pela teoria. 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

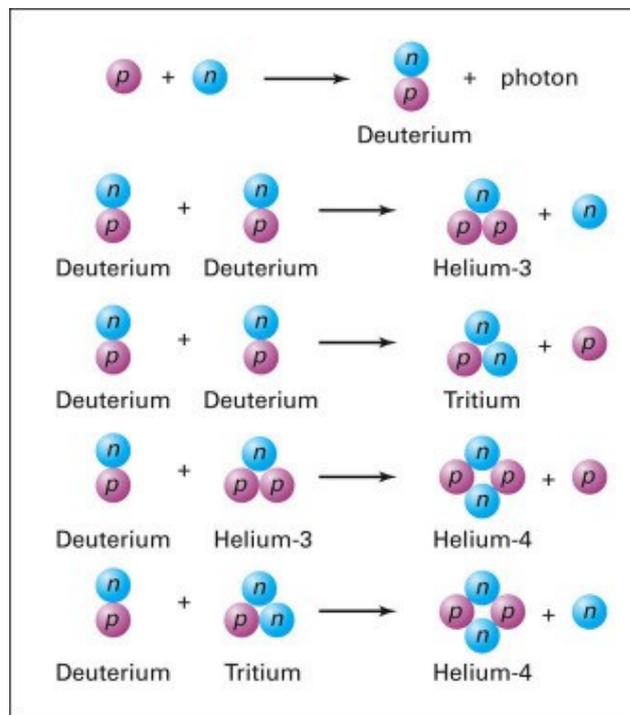
No espaço inter-galáctico, há nuvens de gás ténue, que pouco mudaram desde a sua formação.

=> 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 %** 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

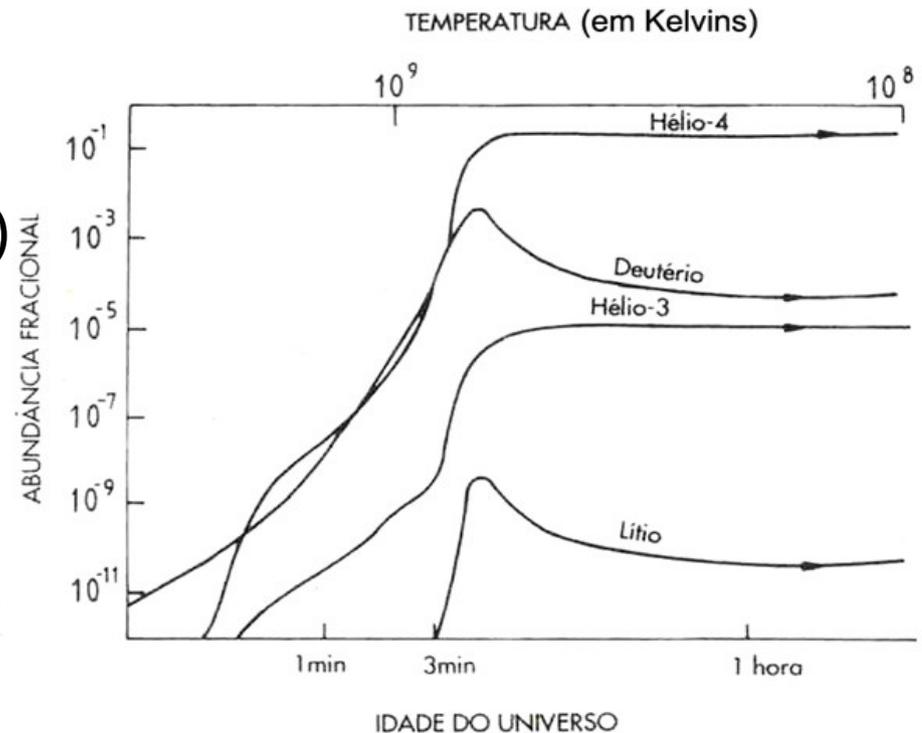
Através do **montante de hélio** na composição primordial, dá pra calcular (Alpher e Herman, 1948)

- 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.**



Abundâncias dos Elementos Primordiais

E por que os elementos mais pesados não foram formados já na época da nucleossíntese, logo depois do *Big Bang*?

Afinal, a **temperatura** era de 10^9 - 10^{12} K (e ainda maior antes), bem **maior** do que a temperatura necessária para a **formação de carbono** pelo processo triplo α , 10^8 K.

Por que o processo triplo α é muito **lento**. Demora **dezenas de milhares de anos** para transformar um montante significativo de He em C.

Nos 5 minutos da **Época da Nucleossíntese**, **não houve tempo** pra isso.

Por outro lado, as **estrelas** vivem por **bilhões de anos**.

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 %).

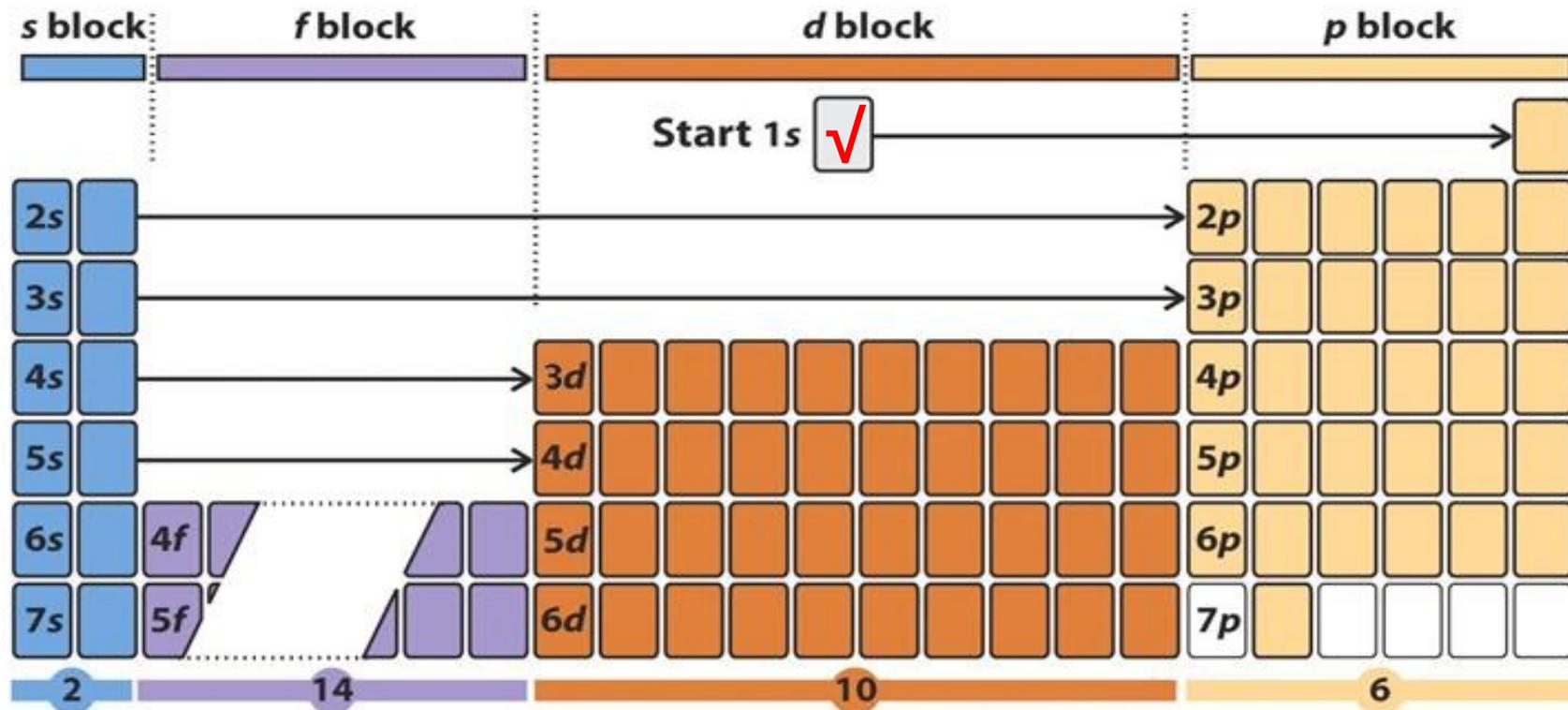
- Os outros 2 %, ou seja todos os outros 105 elementos estáveis foram formados mais tarde por **fusão nuclear** em **Estrelas** (=> Aulas sobre Estrelas), **Supernovas** e **Surtos de Raios Gama** (=> Estágios Finais).

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**.

Formação dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

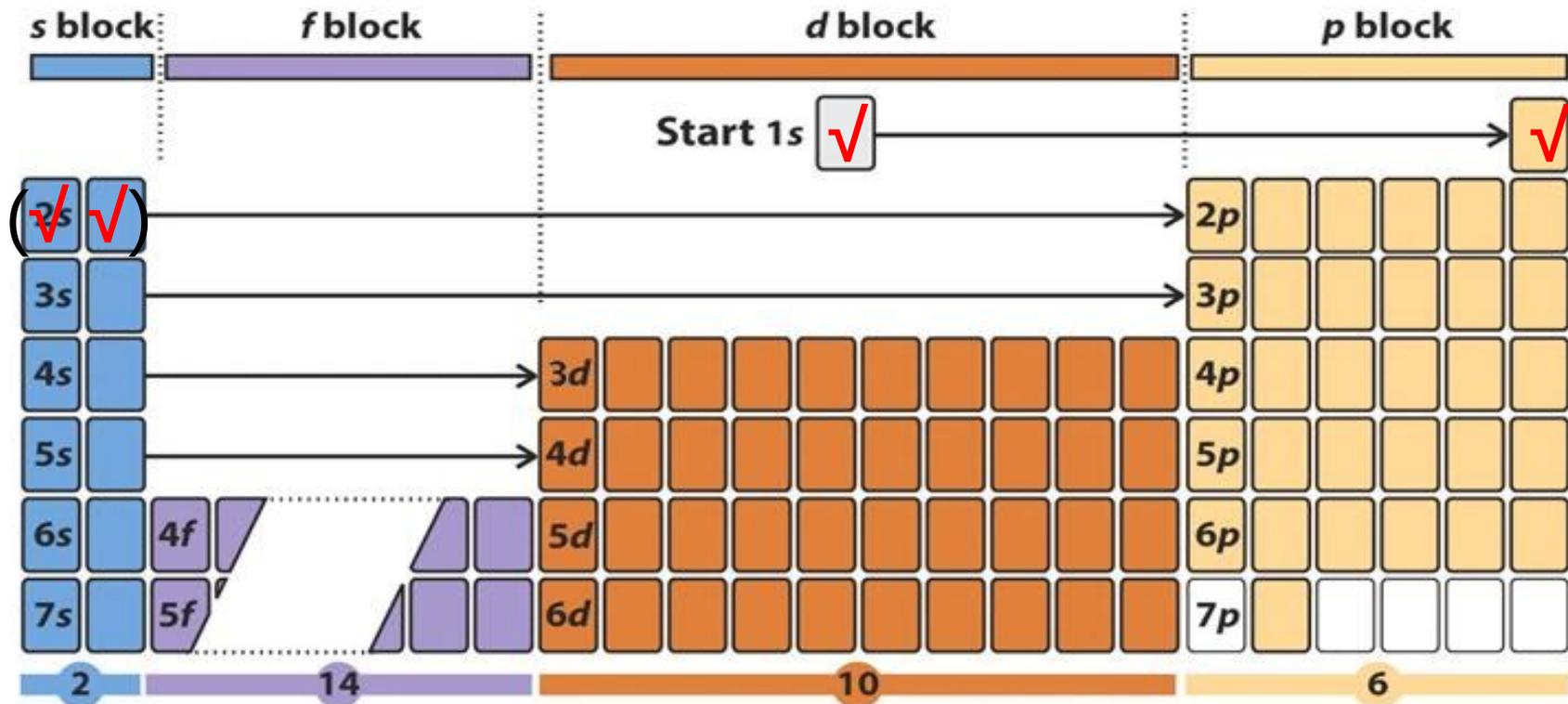
1. Época das partículas (bariogênese) (até 1 ms)



Formação dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

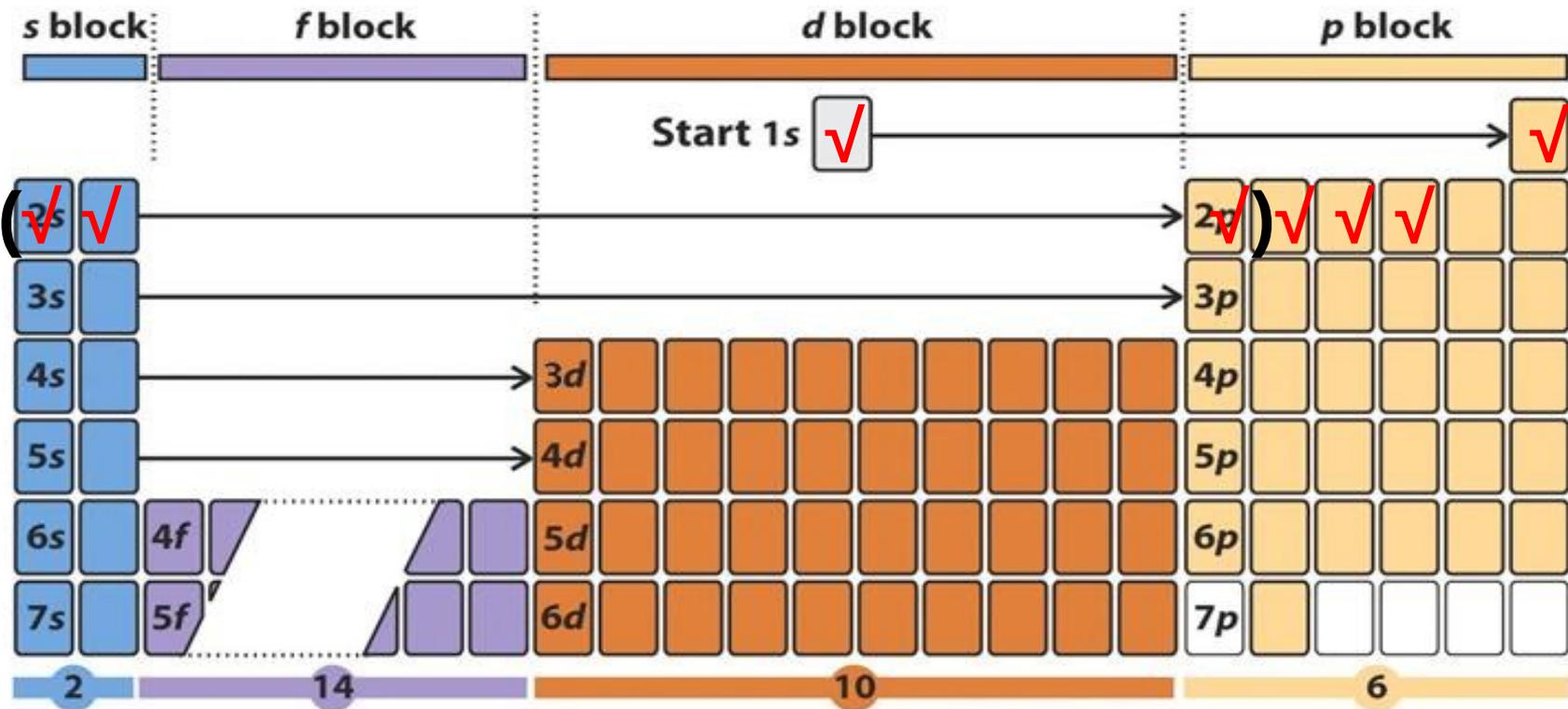
2. Época da nucleossíntese (até 5 min)



Formação dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

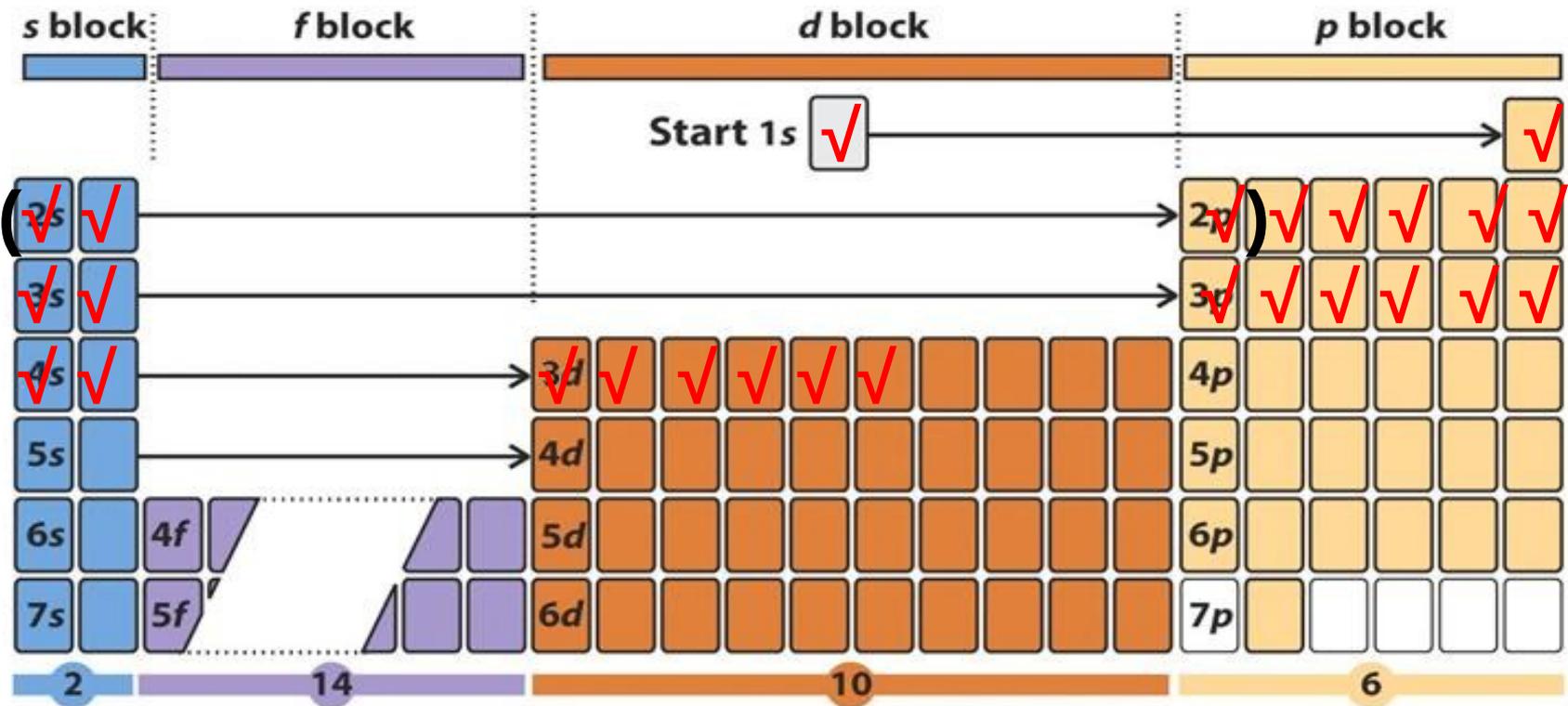
3. Em estrelas de baixa massa



Formação dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

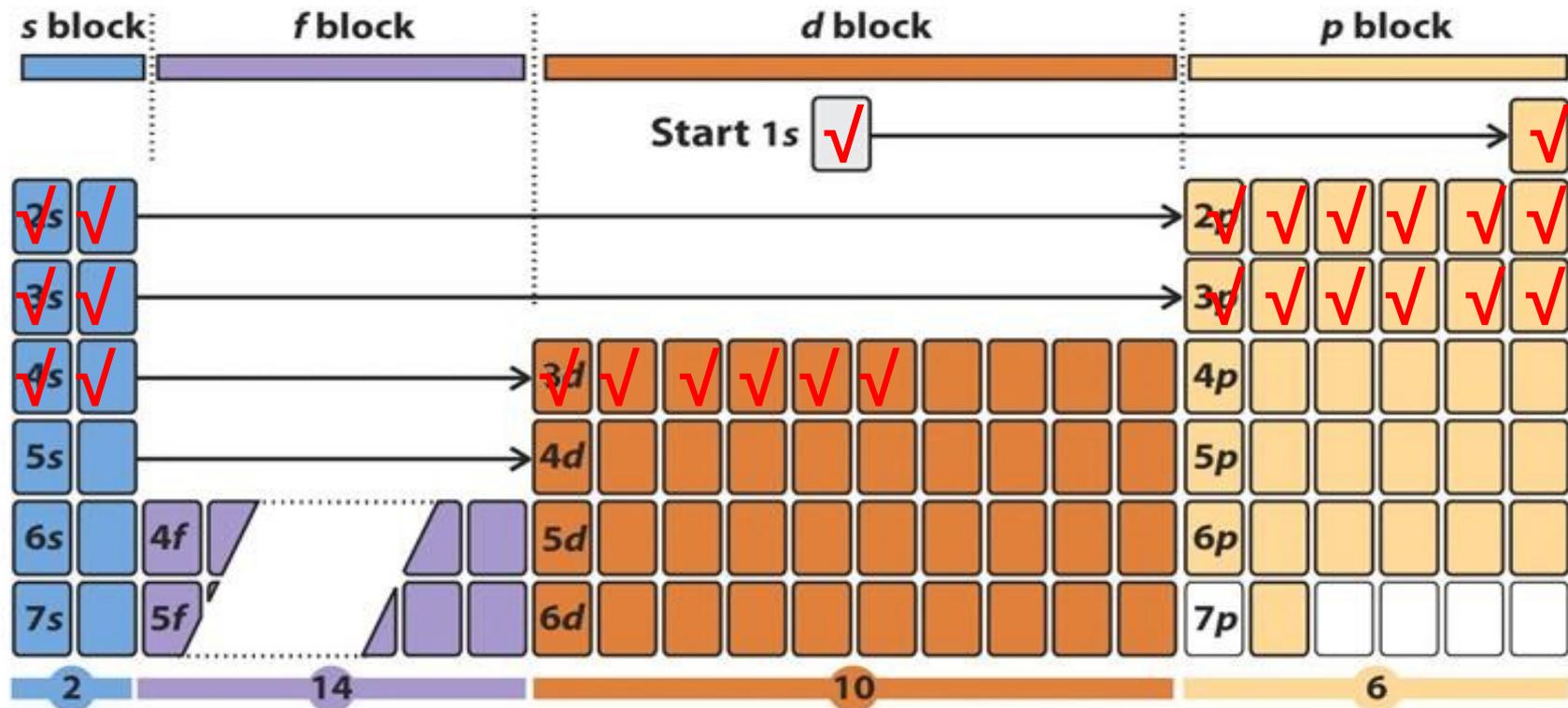
4. Em estrelas de massa intermediária ou alta



Formação dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

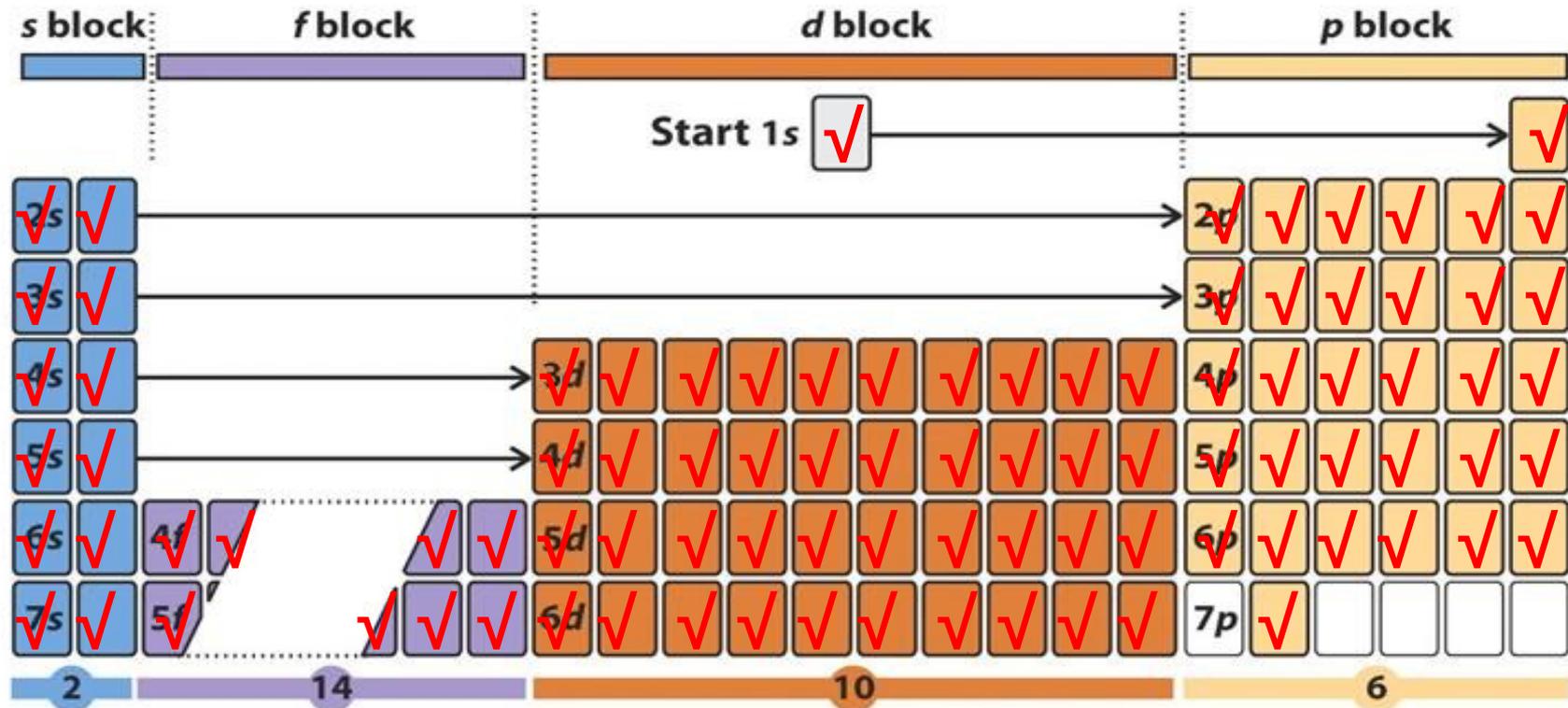
5. Em choques Raios Cósmicos - Matéria Interestelar



Formação dos Elementos

Elementos formados no decorrer do tempo:

6. Em supernovas e surtos de raios gama



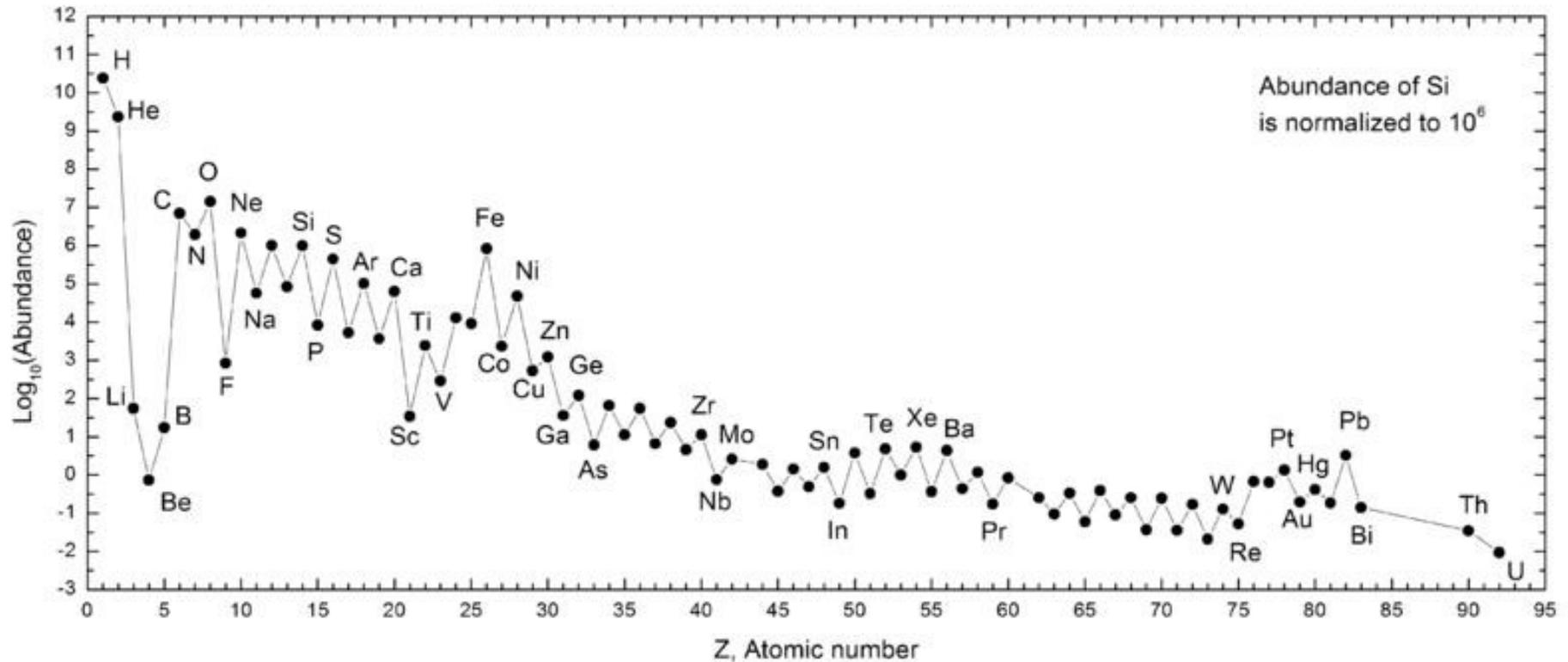
Formação dos Elementos

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;"> B Big Bang </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #90ee90;"> L Large stars </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #ffcc99;"> \$ Supernovae </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #add8e6;"> c Cosmic rays </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #ffff99;"> s Small stars </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #ccccff;"> M Man-made </div> </div>																He	
H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F		Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I		Xe	
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At		Rn	
Fr	Ra																		
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb			Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			Lr	

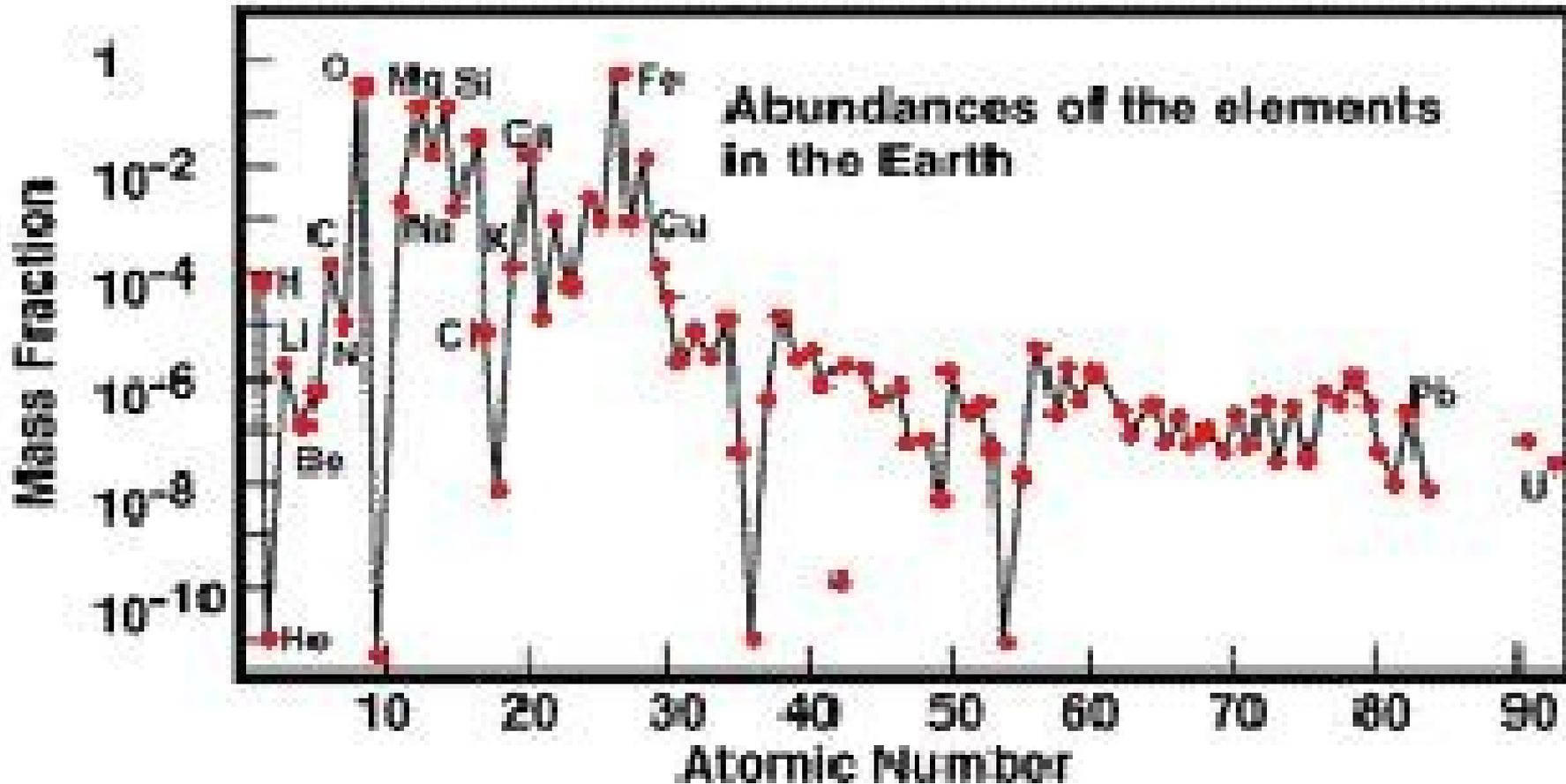
Formação dos Elementos

Abundâncias dos Elementos no Sistema Solar



Formação dos Elementos

Abundâncias dos Elementos na Terra



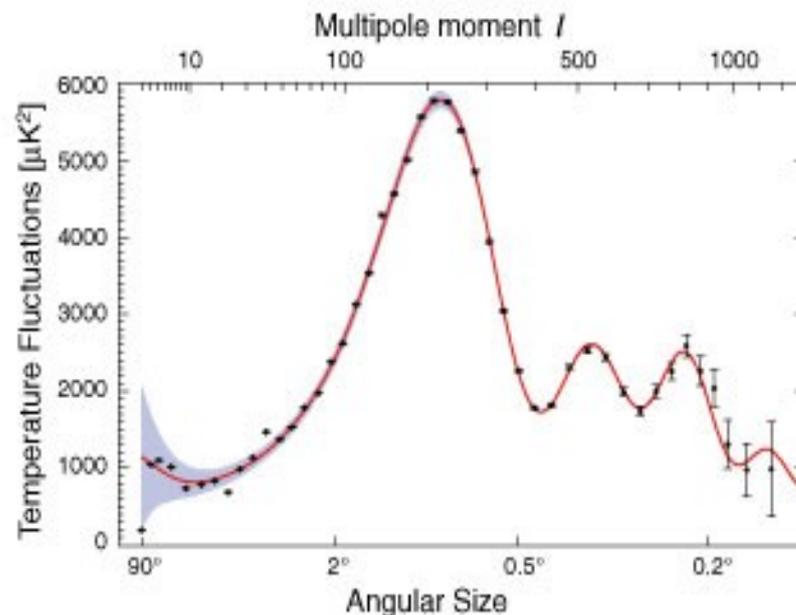
Evidências

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 “re-combinação”**, estas estruturas devem ter **evoluído** para **tamanhos típicos** hoje.

Pelo **modelo Λ CDM** estruturas de 1° na **radiação cósmica de fundo**, ~ 200 kpc na época, deveriam ter tamanhos de ~ 140 Mpc hoje.



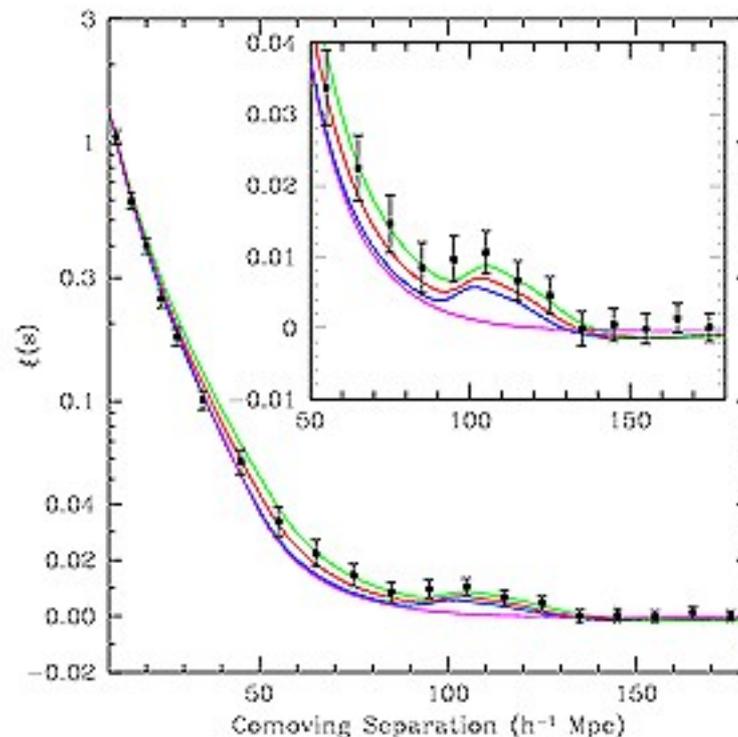
Espectro de tamanhos na radiação cósmica de fundo

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 Λ CDM**.



Função de correlação de distâncias intergalácticas

Evidências para a Inflação

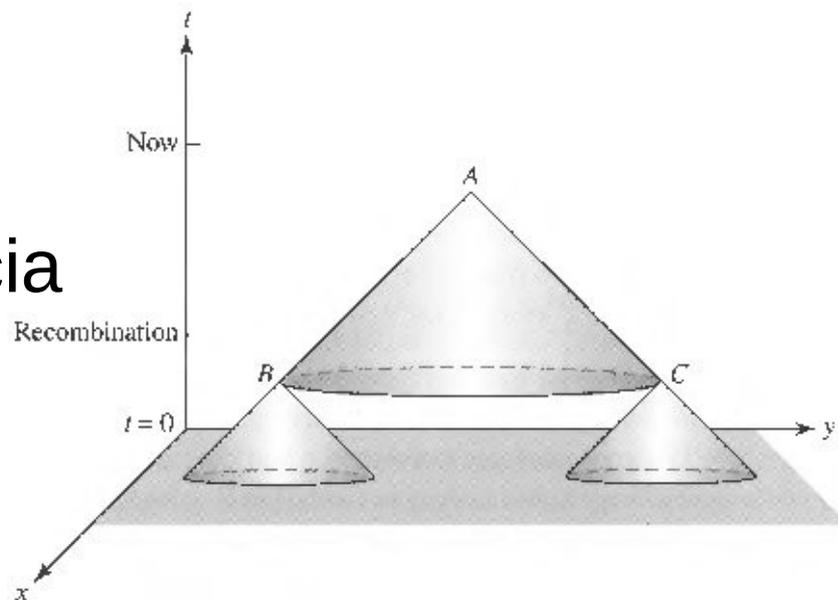
O **problema** do **Horizonte**:

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

pontos de mais de 2° de distância na Radiação Cósmica **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**?



Evidências para a Inflação

Evidências para a Inflação

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

Por que o **Universo** era tão **plano** ($\Omega = 1$) na época da “**re-combinação**”?

Para que o **parâmetro** da **densidade total** hoje, Ω_0 , possa estar **dentro** de **0.6 %** de 1 (Planck: $\Omega_0 = 1.0023 \pm 0.0055$), ele deve ter sido dentro de 0.001 % naquela época (=> aula anterior).

Se Ω não tivesse sido tão perto de 1 naquela época, o Universo já teria se desfeito ($\Omega < 1$) ou recolapsado ($\Omega > 1$), e nós não existiríamos.

O que causou aquele ajuste fino?

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.



Alan Guth

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**.

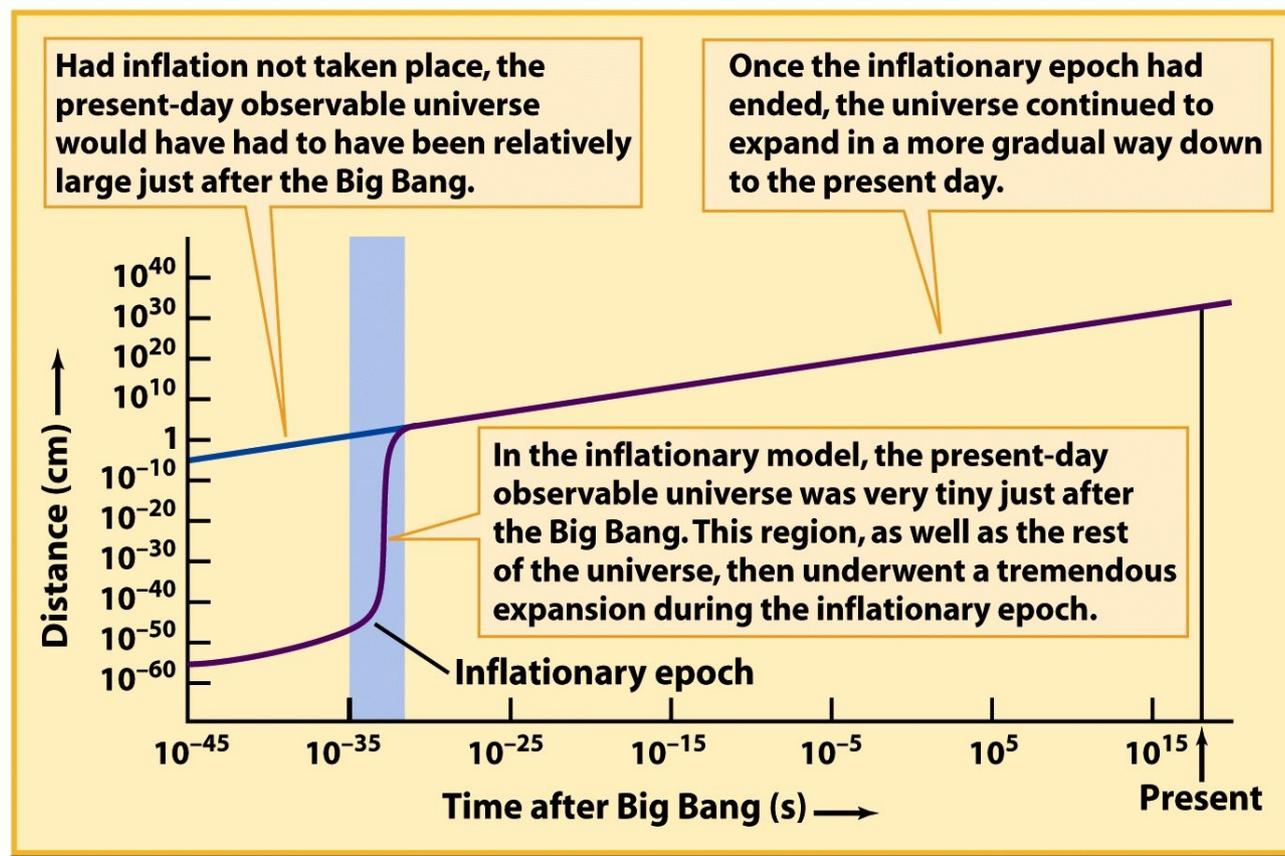


Figure 27-2
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Evidências para a Inflação

Evidências para a Inflação

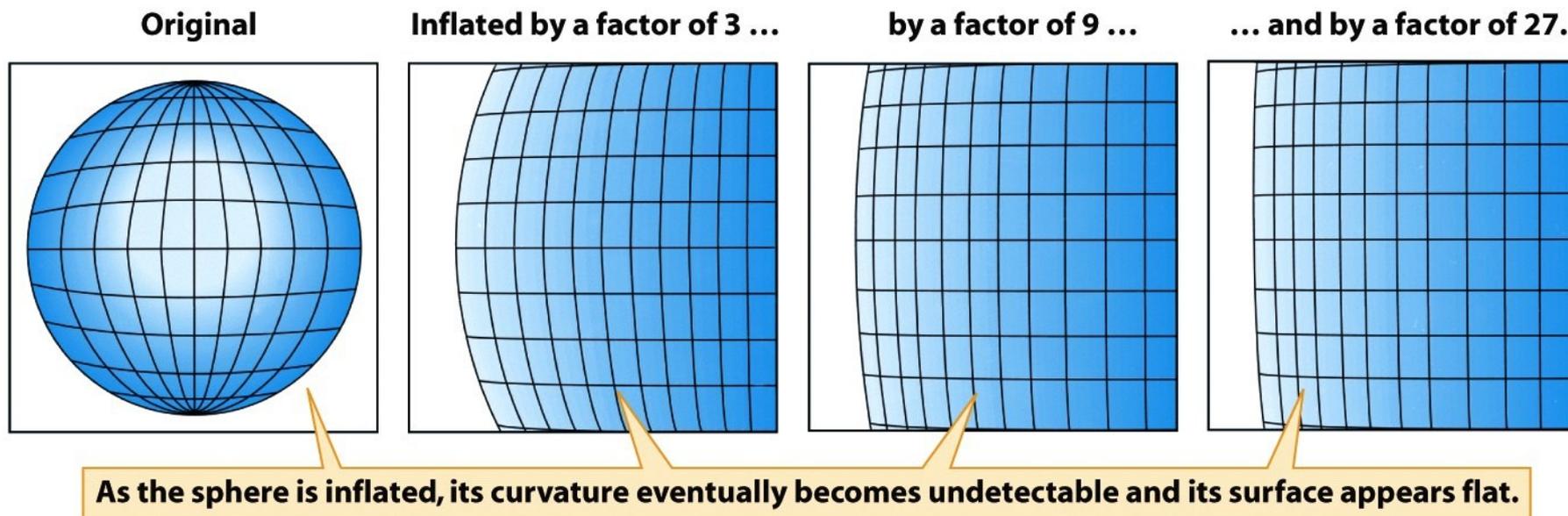


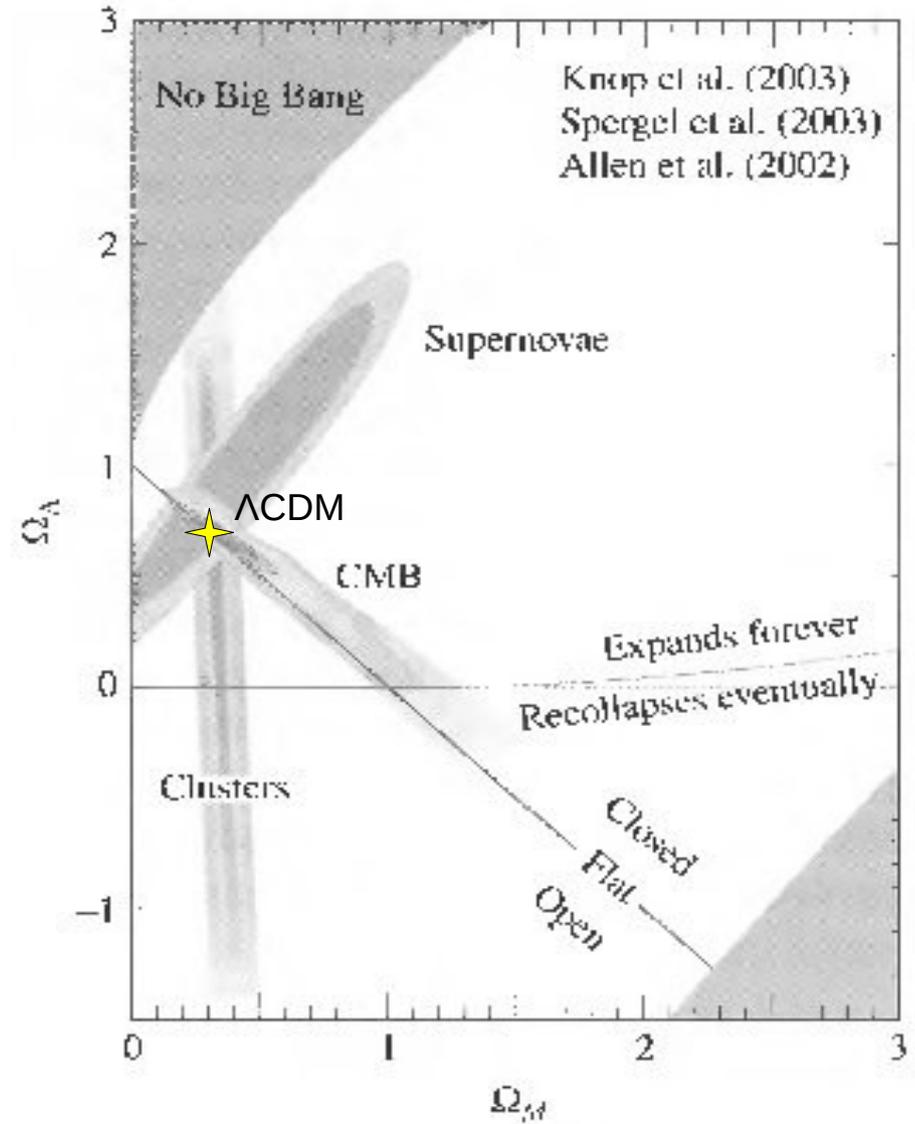
Figure 27-3
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

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

=> Bons argumentos a favor da Inflação.

Evidências

Vários métodos diferentes e independentes de determinação de $\Omega_{m,0}$ e $\Omega_{\Lambda,0}$ levam a resultados compatíveis com o modelo Λ CDM.



Evidências

Melhor explicação das várias regiões deste diagrama.

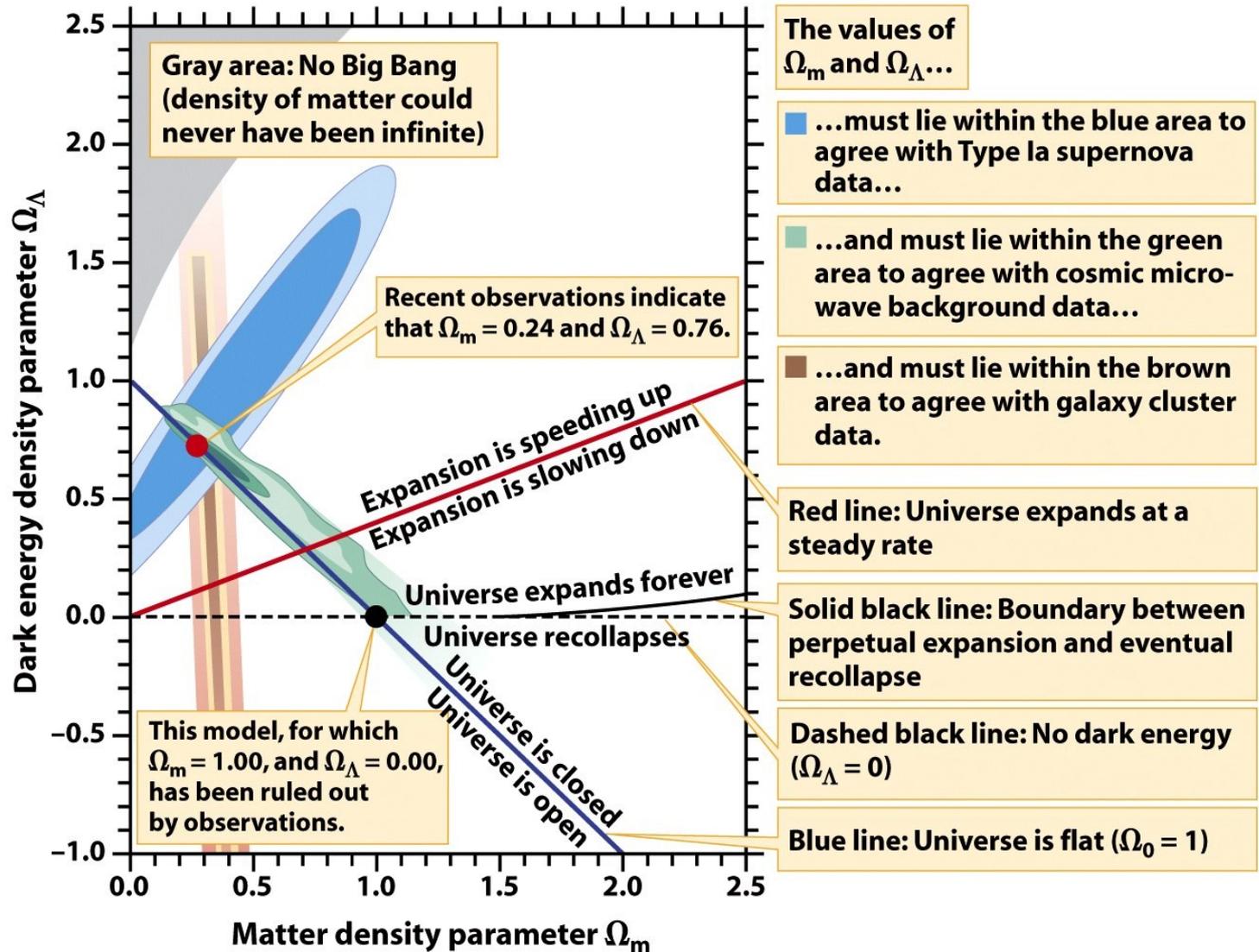


Figure 26-19
 Universe, Eighth Edition
 © 2008 W. H. Freeman and Company

Problemas em Aberto

Apesar do grande avanço, estamos longe de entender o Universo...

- O mais óbvio: Uns **95 %** da composição do Universo ainda **não** foi **identificada** (Matéria e Energia Escuras).
- A **Energia Escura** tem uma **densidade constante** ou **varia** no tempo?
- Não sabemos o que acontece **antes** do **tempo** de **Planck**.
- Não sabemos detalhes de como se formaram e onde estão as **primeiras estrelas** e **galáxias** (pop. III). (Talvez o JWST ou um dos ELTs conseguirá detectá-las.)

O Futuro do Universo

Como se desenvolverá o Universo no futuro?

Se o modelo Λ 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 Λ CDM (não são favorecidos pela Navalha de Occam).

Por enquanto, o **modelo Λ 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

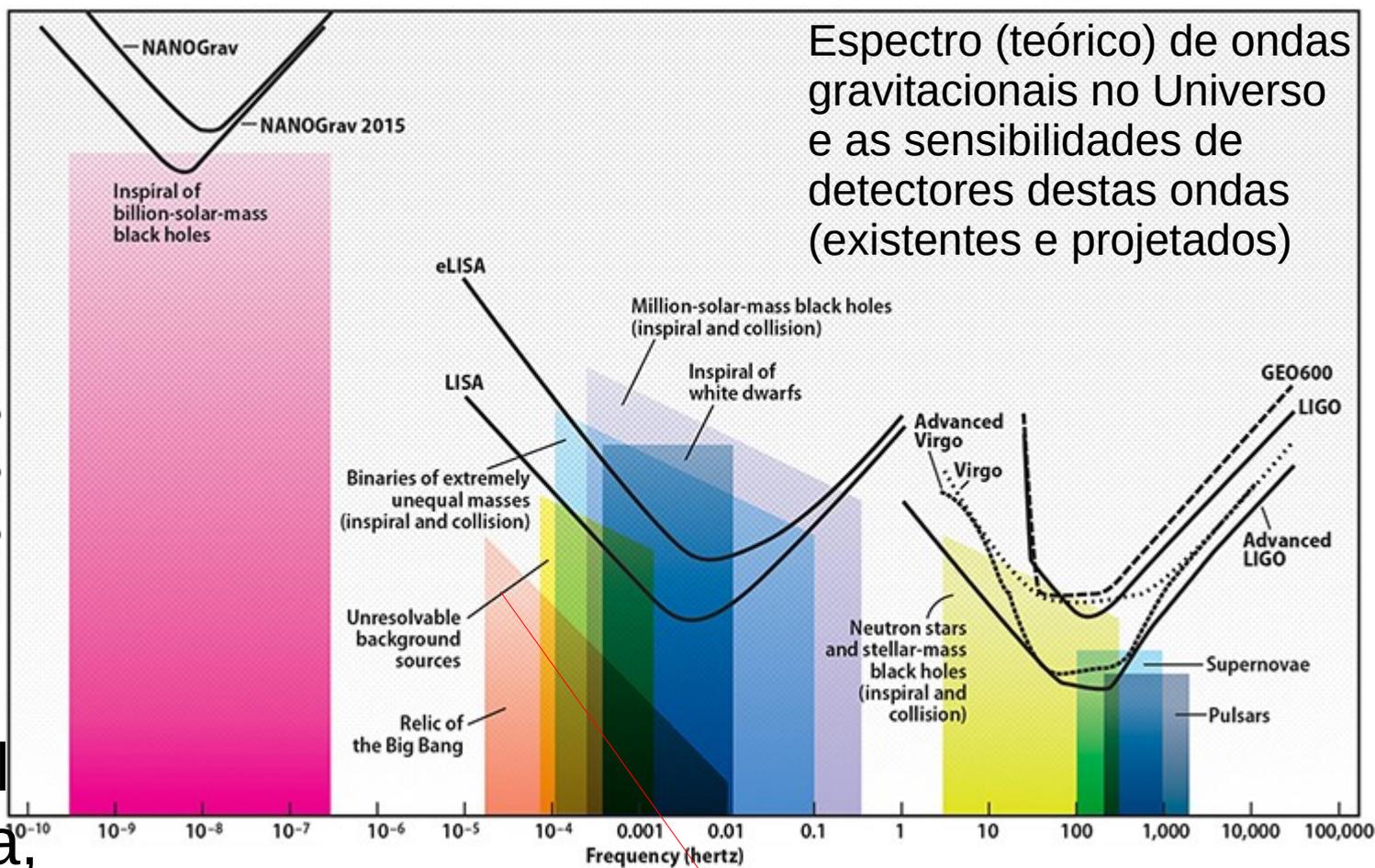
Já que uns **95 % do Universo** ainda **não** foram identificados, estão sendo feitas, ou serão feitas ou planejados mais experimentos/observações cosmológicas:

- 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...).
- ...

(Possíveis) Observações Futuras

Observação direta das Ondas Gravitacionais da Inflação

A detecção recente de ondas gravitacionais por LIGO (=> aulas Telescópios, Relatividade) abriu uma nova janela observacional na astronomia, mas ainda estamos **longe** de detectar aquelas emitidas na inflação.





Universidade Federal do ABC

Noções de Astronomia e Cosmologia

FIM PRA HOJE

