Cosmologia

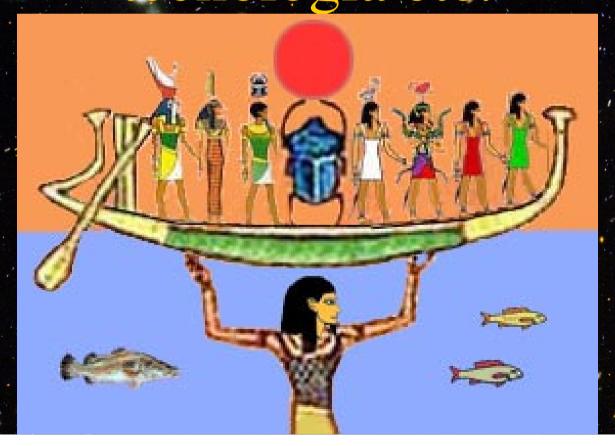
Augusto Damineli

IAG/USP 2006 Mitos de origem em todas as culturas

UNIVERSO = UNO e DIVERSO

Diversidade atual teria tido origem mais elementar

A diversidade observada depende de parâmetros culturais: ambiente, fontes de recursos, tecnologia etc.



Cosmologia Física:

- baseado em propriedades físicas globais observáveis
- -princípio cosmológico: homogeneidade e isotropia
- "leis da física que conhecemos na Terra valem em todos os pontos, direções e tempos"
- ?- princípio antrópico: nosso Universo tem observadores:

Problemas

- 1- Só um Universo é observável: teoria de um único objeto?
- 2- Definição: conjunto de todos os objetos existentes ou de todos os objetos observáveis?

Observáveis relevantes:

- 1- A noite é escura
- 2- Radiação térmica de fundo 3 ⁰K
- 3- As galáxias se afastam de nós com v a d
- 4- Abundância química: H~90%, He~10%
- 5- Irregularidades na radiação de fundo
- 6- O Universo evolui com o tempo

O modelo do Big Bang

- A noite é escura porque o Universo é jovem
- a expansão do universo é uniforme em larga escala
- •a radiação cósmica de fundo tem espectro térmico
- •a abundância do H ~90% e He~10%
- A grandes distâncias vemos galáxias menos evoluídas

Teste dos princípios:

1-As cosntantes físicas são as mesmas em todos os lugares?: G, c, k, parâmetros das partículas

A relação e⁻/m é constante dentro de uma raio de pelo menos 10 bilhões de anos-luz.

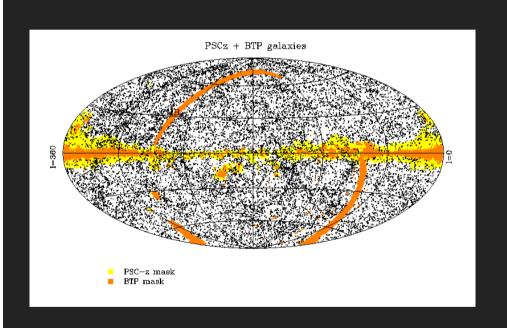


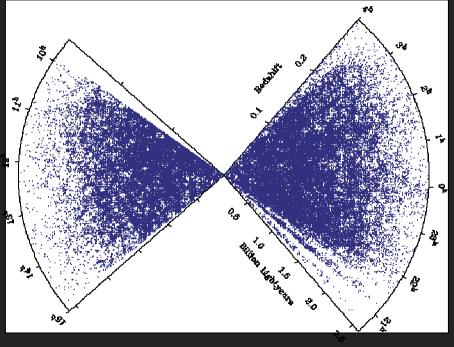
Galáxias como "tijolos" da arquitetura do Universo



Teste dos princípios: homogeneidade e isotropia

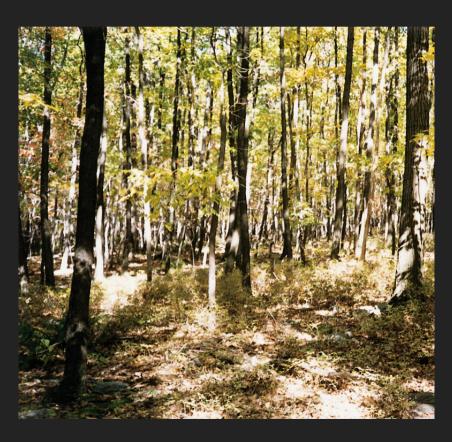
- A distribuição espacial das galáxias é uniforme numa escala > 1 bilhão de anos-luz

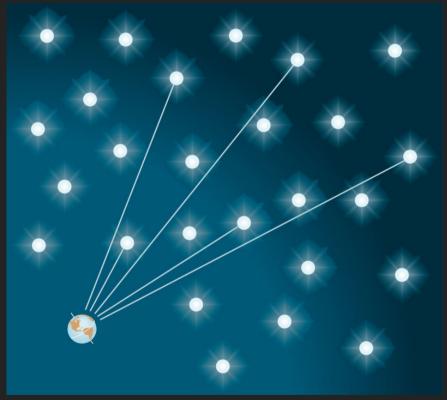




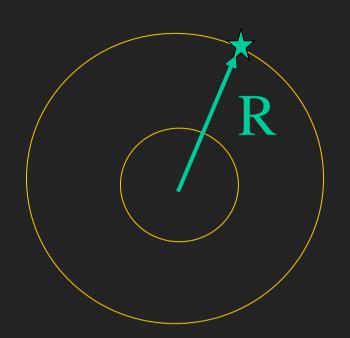
Paradoxo da noite escura?

Kepler x Galileu Universo finito x infinito





Paradoxo da noite escura?

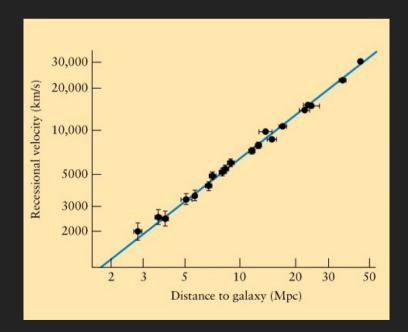


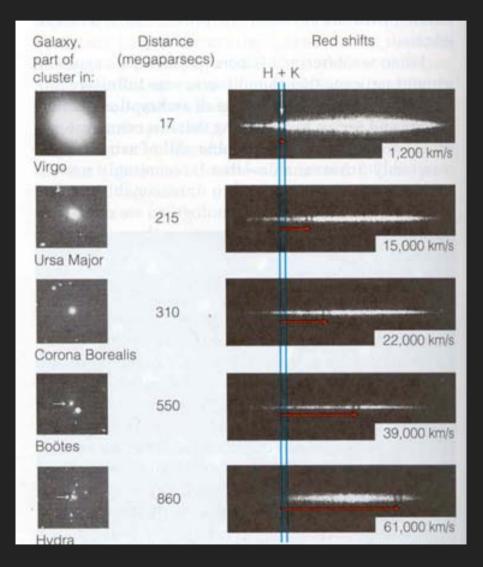
brilho α N x lap brilho α R³ x 1/R² brilho α R

A escuridão da noite implica que o universo não pode ser infinito no tempo e no espaço ao mesmo tempo. Incompatível com o *Estado Estacionário*.

A expansão do Universo

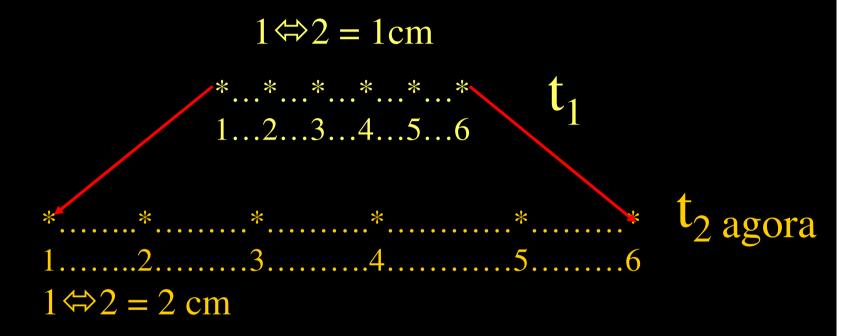
Galáxias em todas as direções estão se afastando de nós com velocidades que aumentam com a distância





Velocidade de expansão

$$v = d/t$$



$$1 \le 2 \quad v = (2-1)cm/1seg = 1 cm/s$$

$$1 <= >5$$
 $v = (8-4)cm/1seg = 4 cm/s$

$$v = (H) d$$

$$v = (1/t)$$
. d

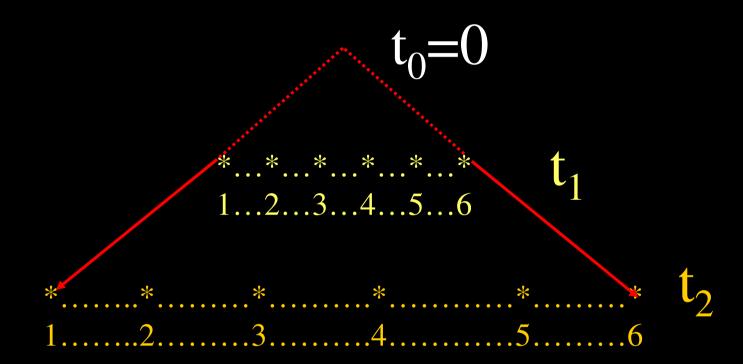
Lei de Hubble

$$v = H. d$$

$$1 \le 2 H = 1 \text{cm/s} / 2 \text{cm} = 0.5 / \text{s}$$

$$1 <= >5$$
 H = $4 \text{cm/s} / 8 \text{cm} = 0.5 / \text{s}$

O Universo teve um início



Idade

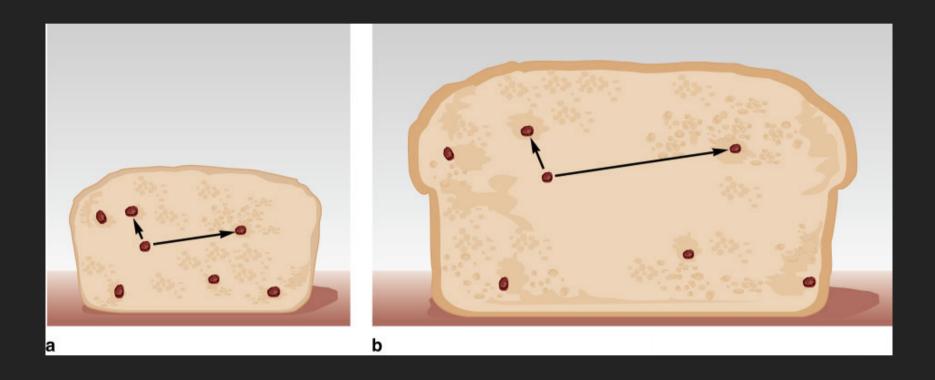
$$H = 1 \text{cm/s}/2 \text{cm} = 0.5/\text{s}$$
 $t_0 = 2 \text{s}$

$$H = 1 \text{cm/s}/2 \text{cm} = 0.5/\text{s}$$
 $t_0 = 2 \text{s}$
 $H = 4 \text{cm/s}/8 \text{cm} = 0.5/\text{s}$ $t_0 = 2 \text{s}$

H = 21.8 km/s / milhão de anos-luz

 $t_0 \sim 14$ bilhões de anos

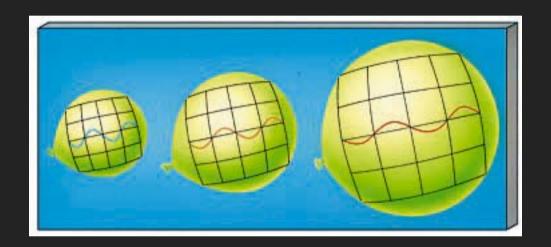
A expansão do universo



O espaço se expande, e todos os observadores observam o mesmo fenômeno.

A expansão do universo

O espaço se expande, e as galáxias acompanham a expansão!



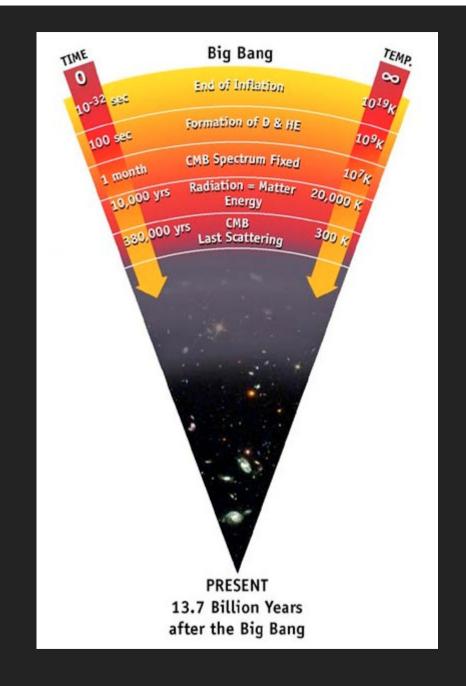
A expansão faz com que o comprimento de onda da luz que viaja de uma galáxia para outra aumente (fique mais "vermelho"): é o redshift. A intensidade desse redshift depende de quanto tempo a luz viajou, isto é, de sua distância.

Visões do passado



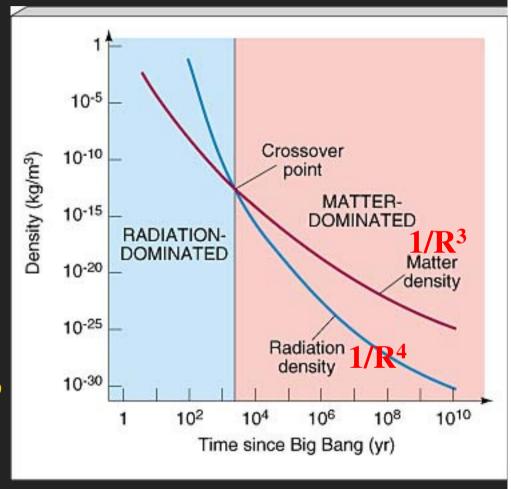
Quando observamos galáxias cada vez mais distantes, em redshifts cada vez maiores, estamos observando-as cada vez mais no passado, devido à velocidade finita da luz. De fato, os objetos mais longínquos são menos evoluídos.

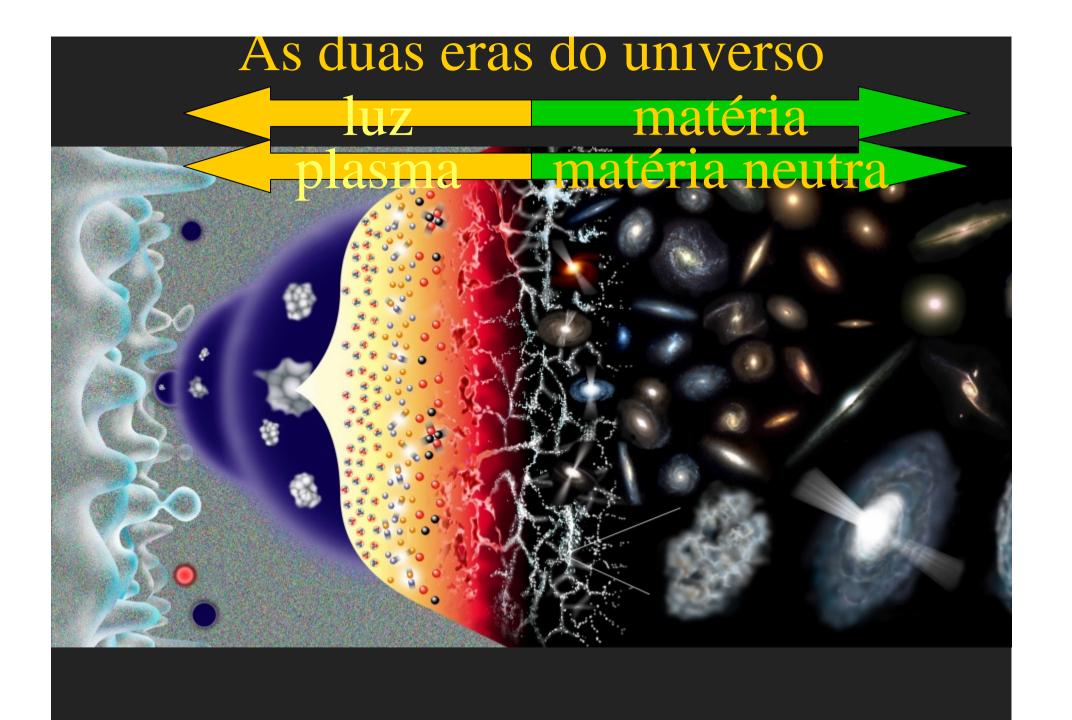
Visões do passado



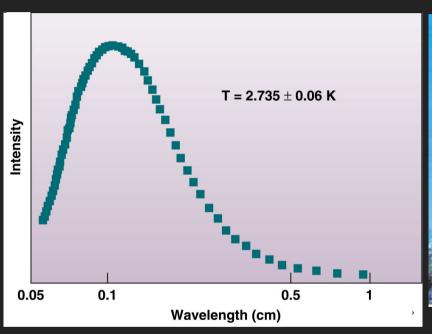
As duas eras do universo

- Era da radiação
- Era da matéria
- A densidade de energia e de matéria evoluem de forma diferente...
- Era radiativa: o universo era opaco aos fótons
- Era da matéria: o universo fica transparente aos fótons





A radiação cósmica de fundo





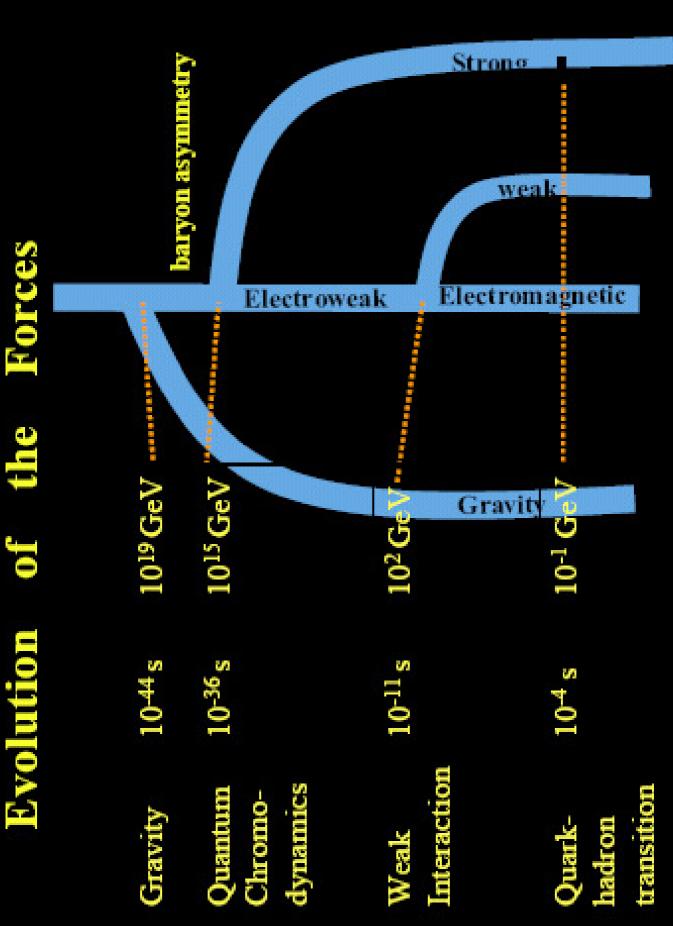
A RCF foi descoberta nos anos 60 por Penzias e Wilson. Seu espectro é o de um *corpo negro* com temperatura T = 2.73 K.

en enne Supply Supply Unites 18/10/ SIEM MILET SHIEM NATES 88183 6 •

O Big Bang

• t=0: o BB – singularidade inicial

- e "antes" do Big-Bang?
- → o espaço e o tempo nascem juntos com o nosso universo



t/T	Evento
<10 ⁻⁴³ s >10 ³² ⁰ K	Big-bang, gravidade quantizada, todas as forças unidas
10 ⁻⁴³ s 10 ³² ⁰ K	Era da Grande Unificação, gravidade se separa das outras forças. Física desconhecida
10 ⁻³⁶ s 10 ²⁹ ⁰ K	Era da Inflação, crescimento de 10 ³⁰ vezes em 10 ⁻³⁶ s, força nuclear forte se separa. Física ainda não testada
10 ⁻¹¹ s 10 ¹⁵ ⁰ K	Força eletrofraca se separa da eletromagnética, daqui em diante. Física testada em laboratório
10 ⁻⁴ s 10 ¹⁴ ⁰ K	Era Hadrônica: quarks confinados formando partículas pesadas (em equilíbrio com a luz, matéria+antimatéria+luz)
10 ⁻¹ s 10 ¹² ⁰ K	Era Leptônica: partículas leves em equ. com a luz, aniquilação, sobra 1/1bilhão da matéria
3 min 10 ^{9 0} K	Era da Nucleossíntese: p+e=>n, 4p=> He ⁴
380 mil anos 3 mil ⁰ K	Era da recombinação: matéria fica neutra e domina sobre a luz, emissão da Radiação Cósmica de Fundo.

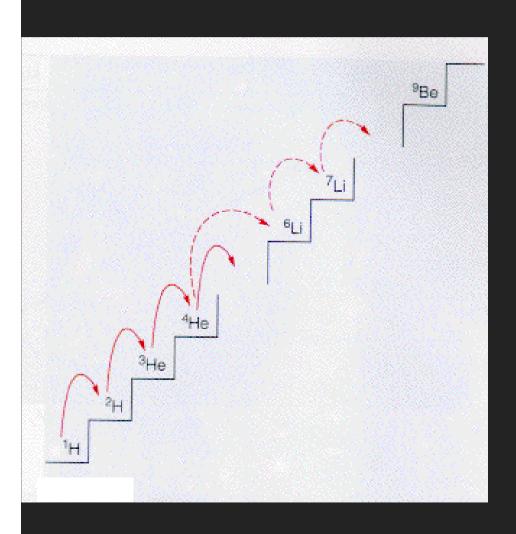
nucleosíntese primordial

$$p + n \longrightarrow H^{2} + \gamma$$

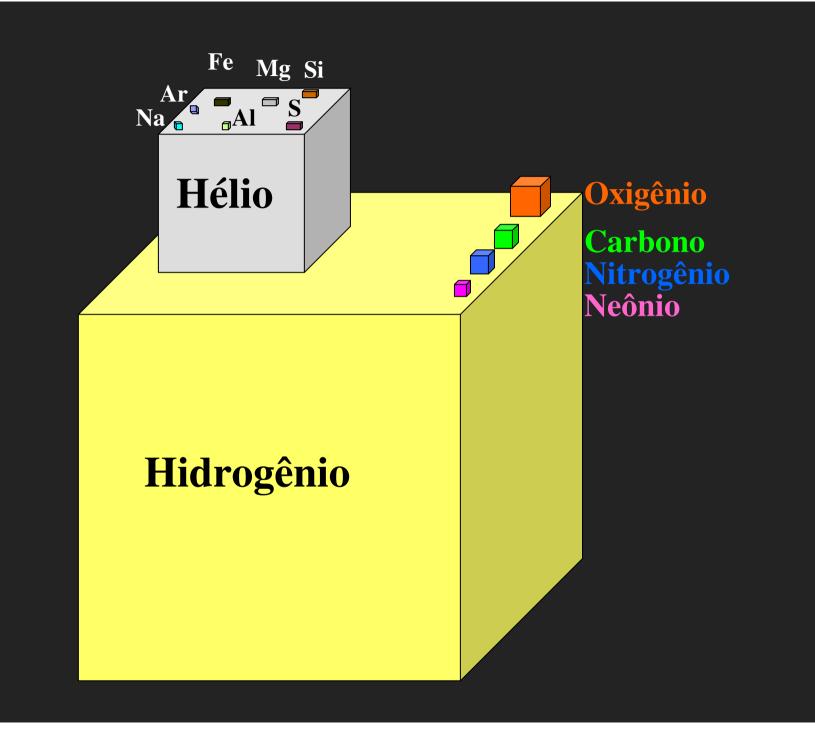
$$H^{2} + H^{2} \longrightarrow He^{3} + n \longrightarrow H^{3} + p$$

$$H^{3} + H^{2} \longrightarrow He^{4} + n$$

Nucleosíntese primordial



- Durante os primeiros minutos a temperatura e a densidade eram suficientemente altas e permitiram a criação do deutério, hélio e uma pequena quantidade de lítio
- Mas como não há núcleos estáveis com peso atômico 5 ou 8, e a temperatura caiu, este processo parou por aqui!
- Os demais elementos seriam formados muito mais tarde, no interior das estrelas.



centenas de milhares de anos depois do BB: a recombinação



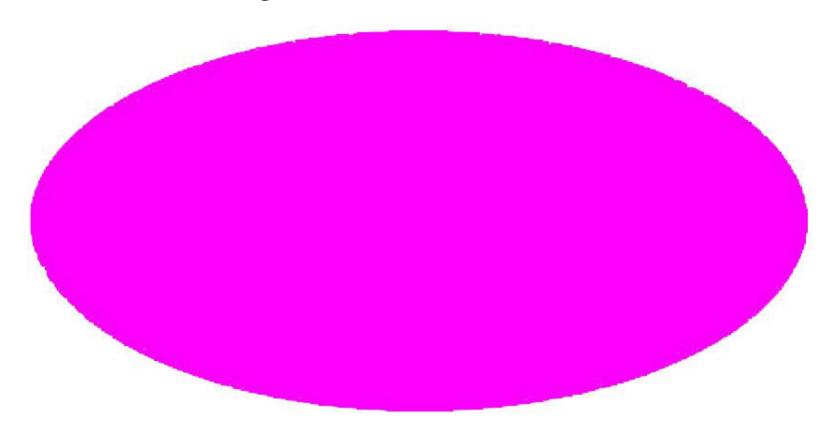
Podemos detectar hoje a radiação remanescente do BB: a Radiação Cósmica de Fundo (RCF).

Vemos a RCF em *qualquer* direção que olhamos.

A radiação vai se resfriando enquanto viaja até nós.

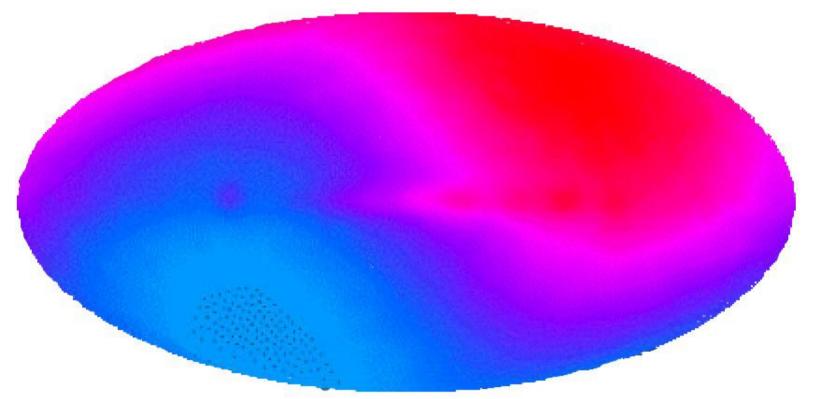
A "superfície do último espalhamento" está muito longe, no redshift z~1000

Radiação Cósmica de Fundo



T = 2,735 Kelvin Dados: Satélite COBE (1992)

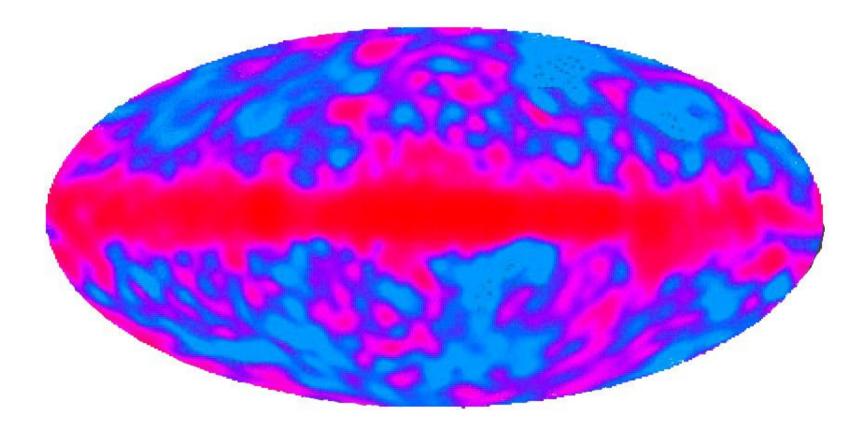
Dipolo da Radiação Cósmica de Fundo



Subtraindo a temperatura média

 $\Delta T = 3.37 \ 10^{-3} \text{ Kelvin}$ Dados: Satélite COBE

Anisotropia da Radiação Cósmica de Fundo

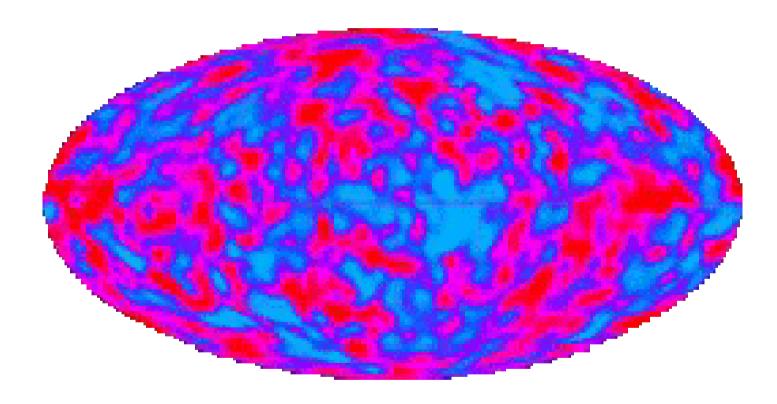


Dados: Satélite COBE

Anisotropia da Radiação Cósmica de Fundo

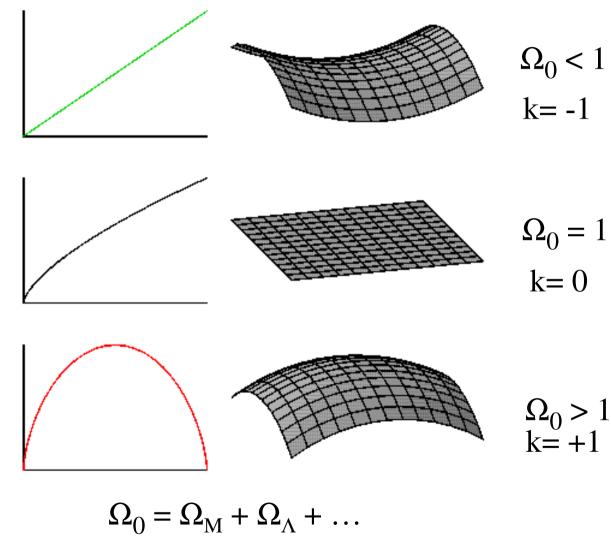
Fótons ~550 000 por litro Bárions ~ 1 por 10 mil litros

~ 10⁹ fótons/bárion



Flutuação de densidade $\Delta T/T \sim 10^{-5} \approx \Delta \rho/\rho$

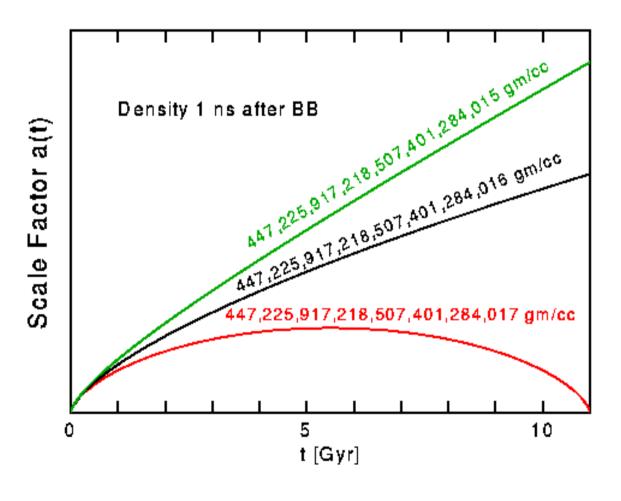
Massa-energia determina a curvatura



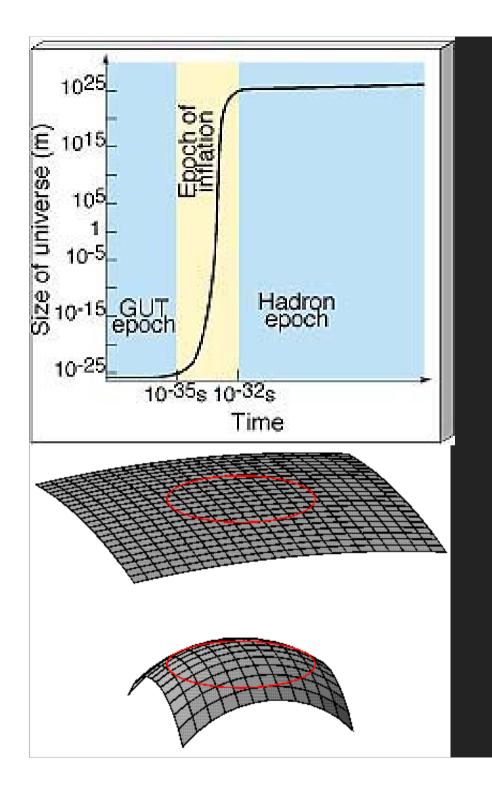
(soma de todas as componentes do universo)

Problema da planura

$$H_0$$
=75 km/s ρ_{crit} = 10⁻²⁶ kg/m³ ρ_{luz} = 10⁻³⁰ Ω_{0} = ρ/ρ_{crit} Ω_{gal} =0.01 Ω_{dark} =0.3



Para Ω_0 ~1 hoje, ele deveria ter sido tão perto de 1 quanto $1/10^{50}$ no início.



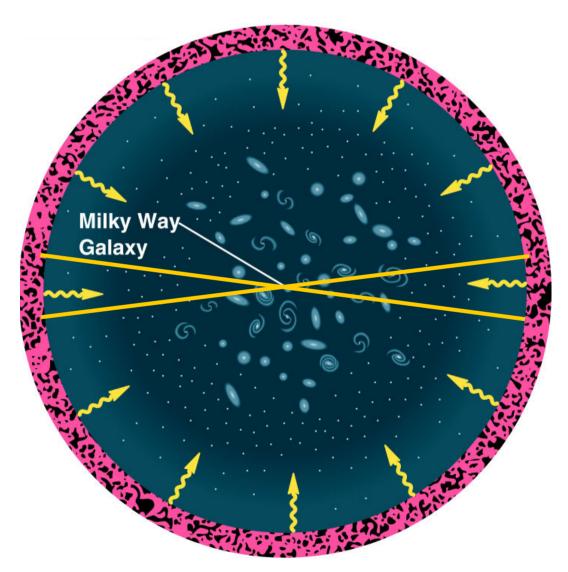
Inflação: resolve o problema da homogeneidade da RCF e da planura

O universo teria crescido de um fator 10^{30} em 10^{-36} seg.

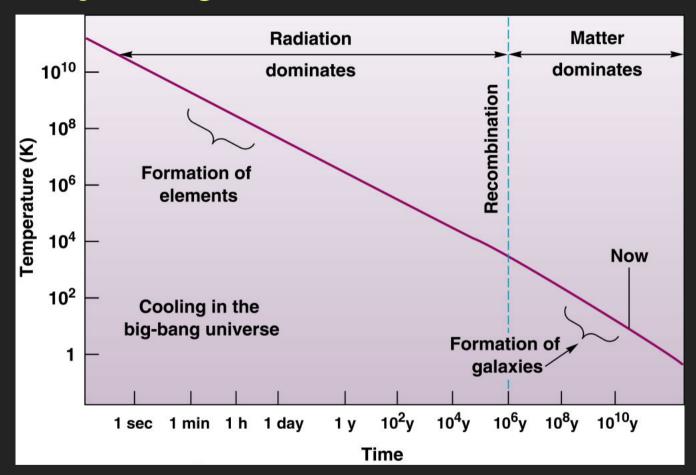
Desacoplamento das forças teria se "atrasado", entrando em situação instável (falso vácuo)

Problema do horizonte

Não havia conexão causal entre estruturas da RCF mais afastadas que ~1 grau. Como T pode ser tão uniforme?



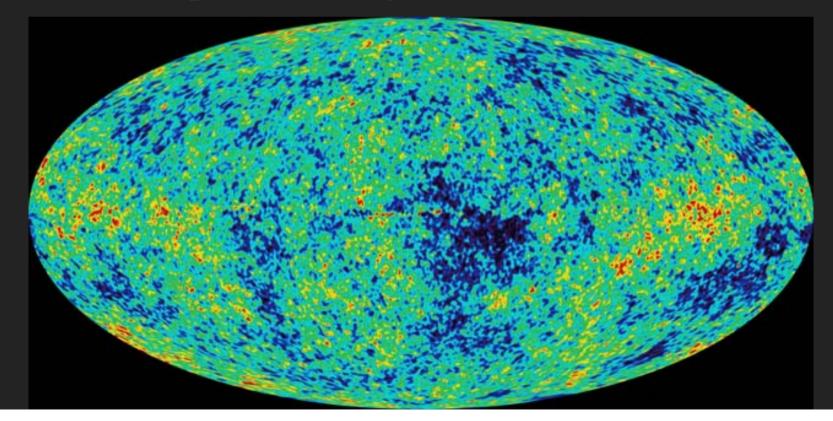
Formação de galáxias



Durante a era radiativa as estruturas não podiam colapsar. Só depois que o universo se resfriou a ponto da matéria começar a dominar foi que as galáxias e outras estruturas puderam começar a se formar.

As flutuações na RCF são as sementes das estuturas

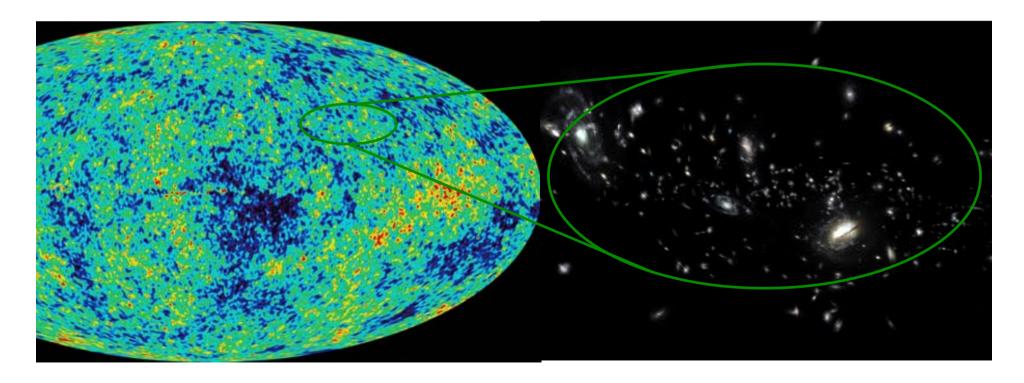
- Flutuações de temperatura: 1 parte em 10⁵!
- Crescem pela ação da gravidade



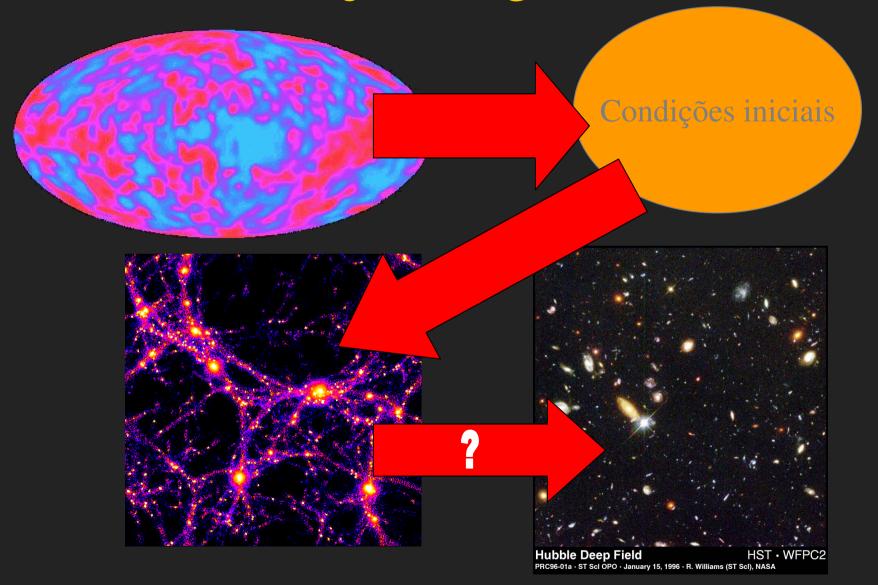
Radiação cósmica de fundo corresponde ao estado do universo com ~ 400.000 anos.



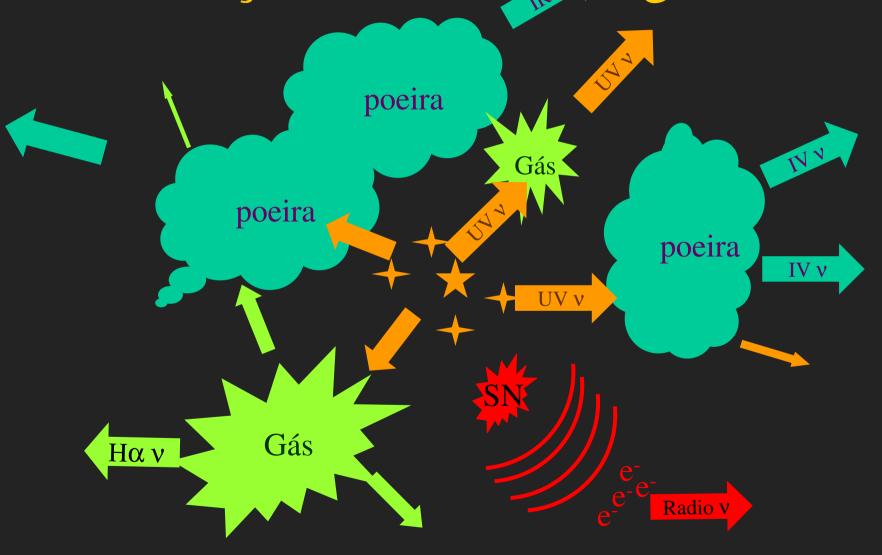
Evolução da distribuição de massa no universo nos últimos 13 bilhões de anos



Formação de galáxias



formação das estrelas => re-ionização do meio intergalático



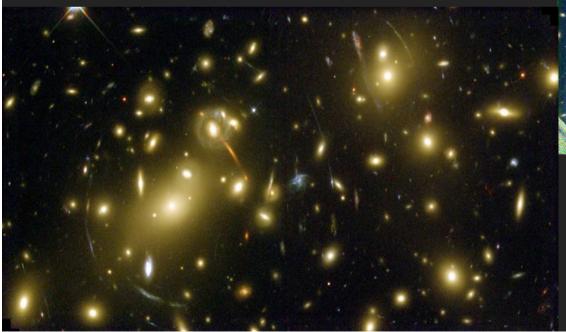


~hoje: ~13 bilhões de anos depois do BB, em grandes escalas o universo visível é povoado por galáxias

Do que é feito o universo? Matéria + Luz

• Aglomerado de galáxias

• Efeito de lente gravitacional



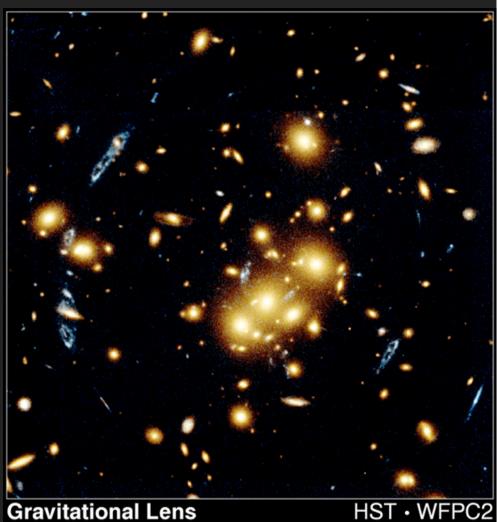


A matéria "escura"

• há muito mais massa em aglomerados do que a que podemos associar a estrelas!

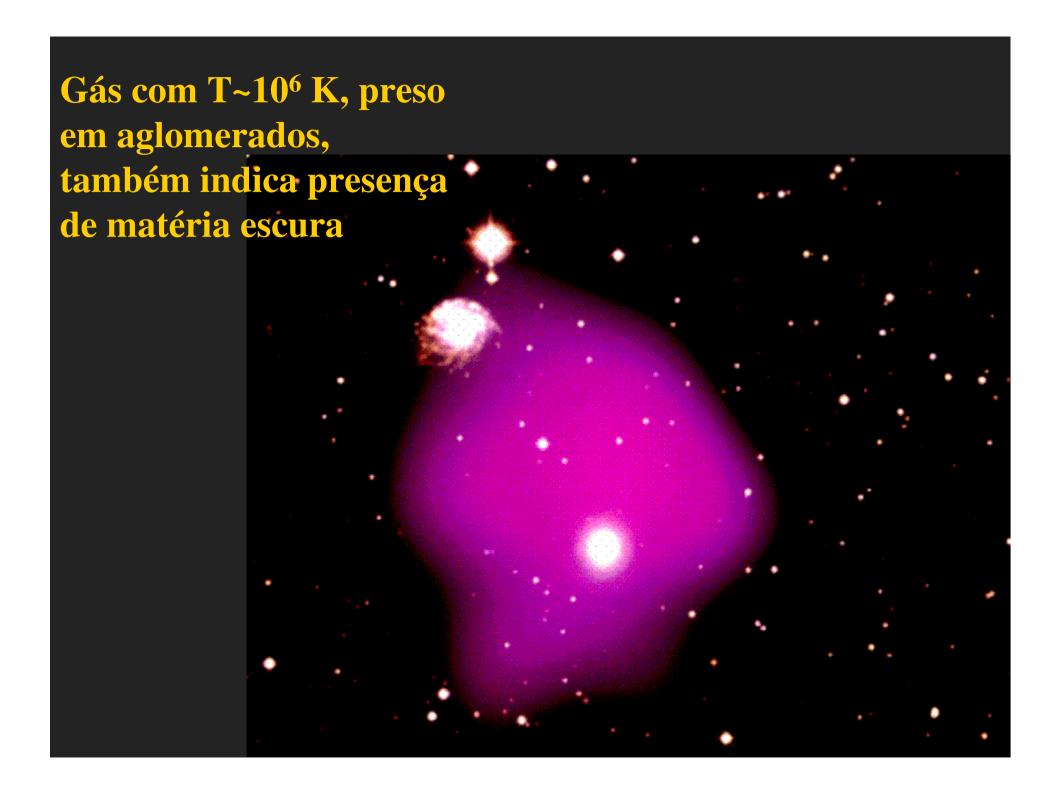
a maior parte da massa no universo é escura...

...e não bariônica!!!!!



Gravitational Lens Galaxy Cluster 0024+1654

PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996 W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University), J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA

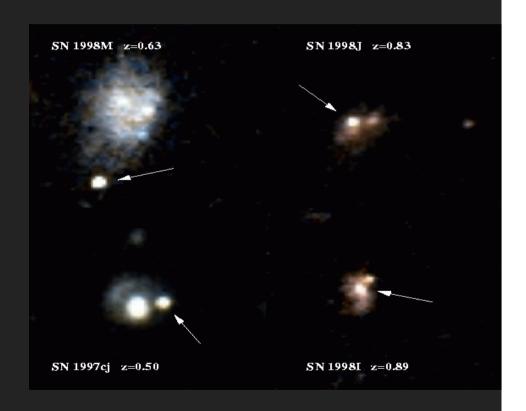


não bariônica?

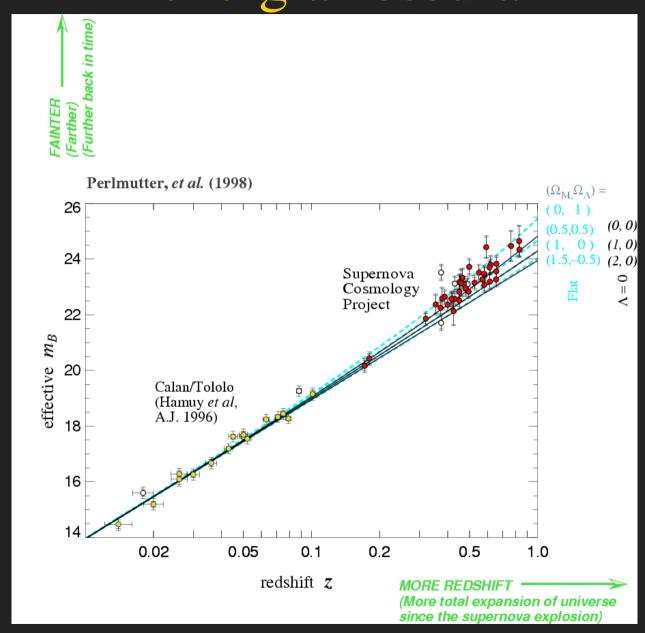
- bárions: protons, neutrons...
- para explicar a abundância dos elementos leves (nucleosíntese primordial), a fração da quantidade de matéria em bárions deve ser de ~5%
- mas o total de matéria é da ordem de 30% da densidade crítica
- o que constitui a matéria escura????????

A energia "escura"

- supernovas: "velas padrão"
- bons indicadores de distância
- observação de SNs distantes:
 parecem estar mais distantes do
 que se esperaria pelo seu
 redshift
- →o universo parece estar sendo acelerado por uma energia escura!!!!!!!
- O que constitui a energia escura??????????



A energia "escura"



mas... do que é feito o universo?

WMAP + outras observações recentes:

- k=0 ($\Omega=1.02\pm0.02$)
- 73 % de "energia escura"
- 23% de "matéria escura"
- 4% de matéria comum

• cosmologia de precisão

o lado escuro da cosmologia atual

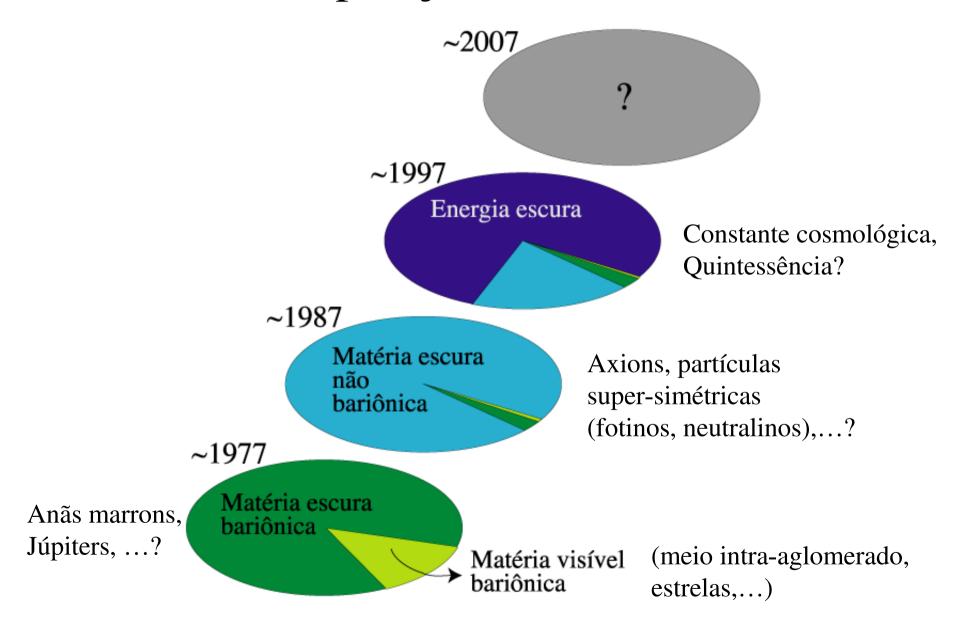


• O que constitui a matéria escura?

• O que constitui a energia escura?

• 77777777777777

Composição do universo



Os multiversos ou "universos paralelos"

