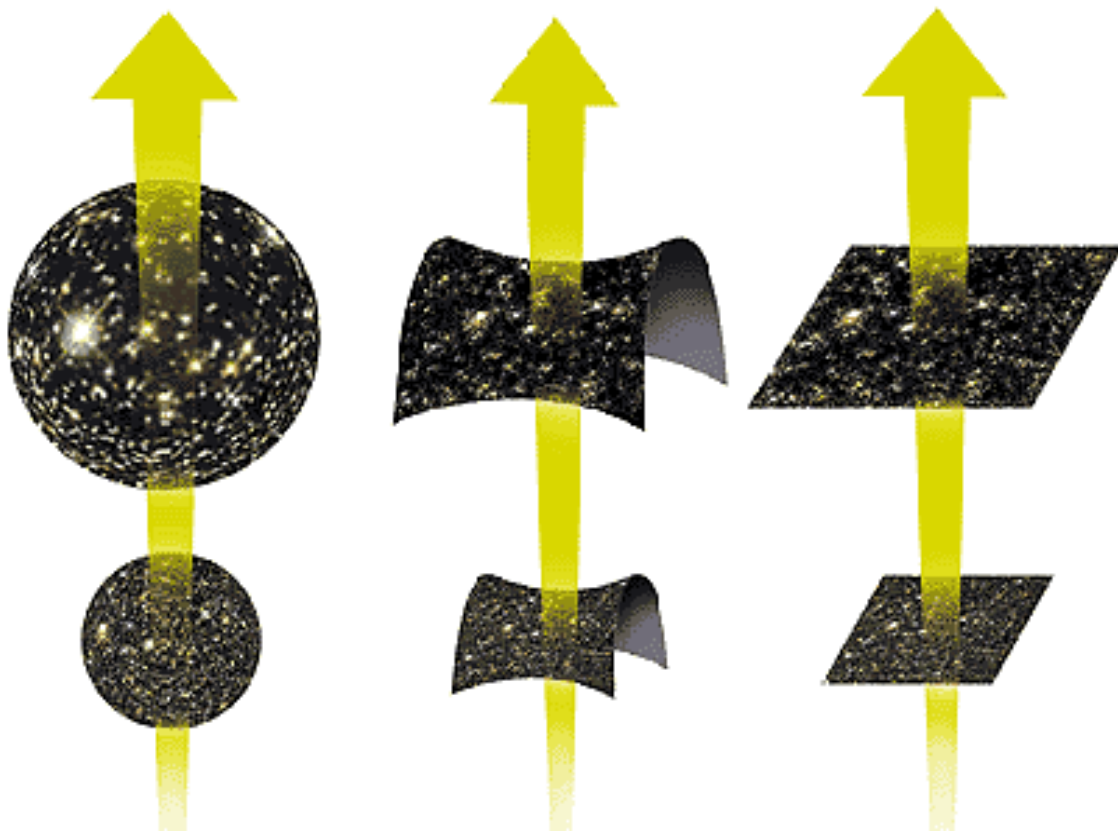
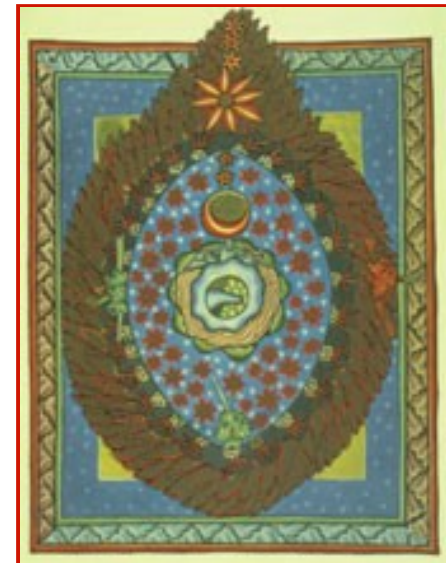
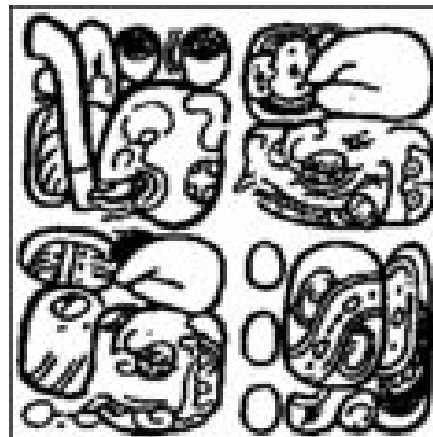
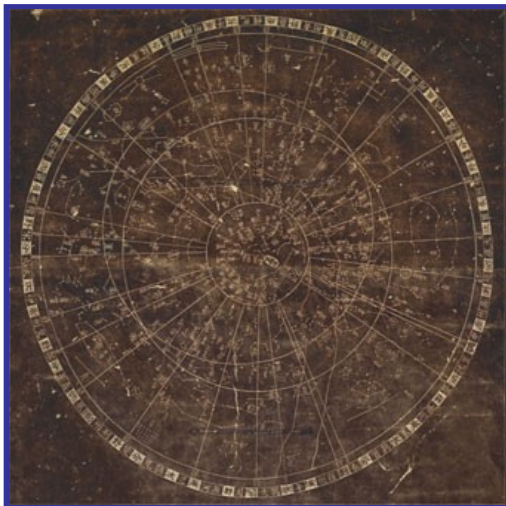
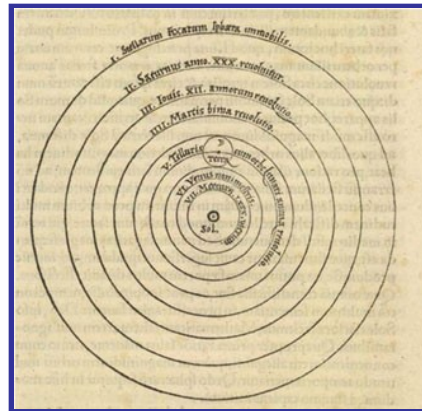
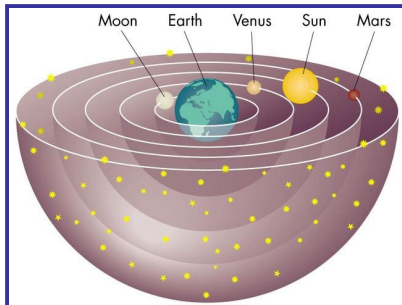


19. Cosmologia



o que é cosmologia?

- é o estudo do universo como uma totalidade:
sua estrutura, origem, evolução e destino do universo
- embora a cosmologia seja muito antiga, como teoria física ela é um produto do século XX



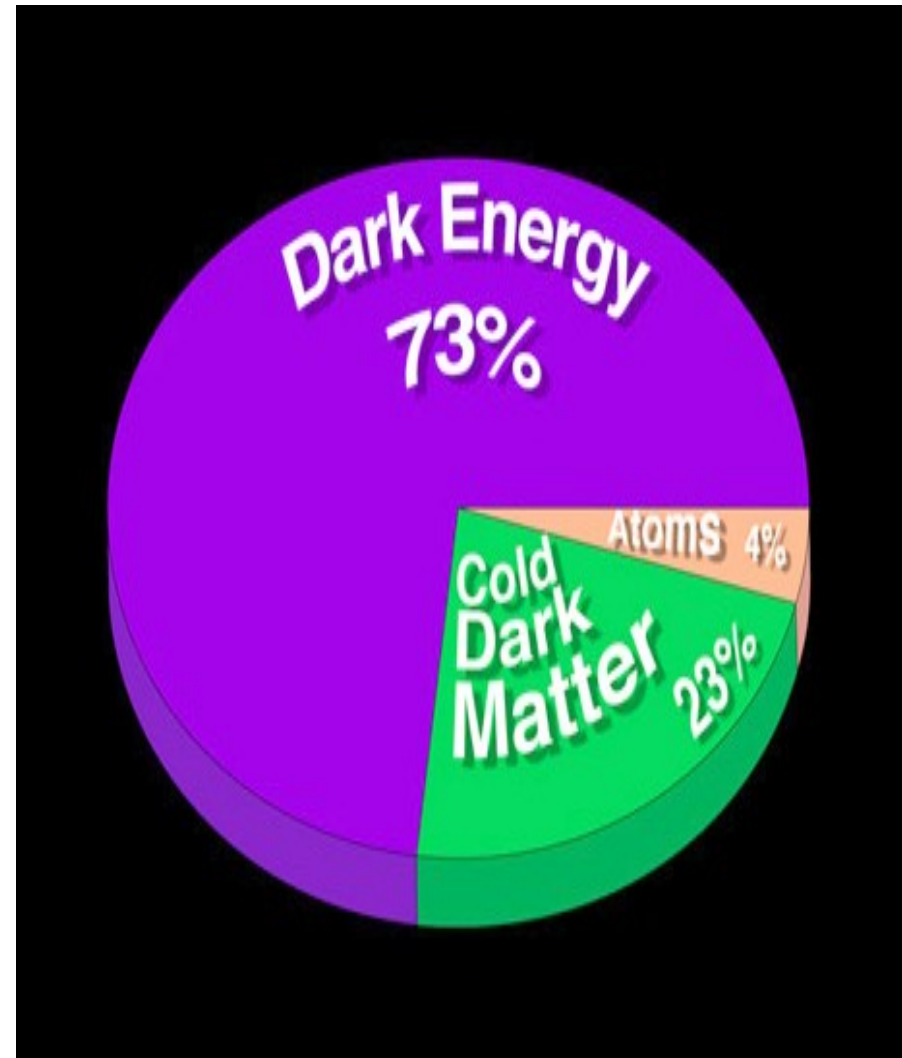
o modelo cosmológico padrão

- em grandes escalas o universo tem curvatura nula, é dominado por energia e matéria escura e encontra-se numa fase de expansão acelerada
- idade: 13.7 Ganos
- constituintes:
WMAP (Hinshaw et al. 2008)
 - Energia escura: 0.72 ± 0.04
 - Matéria escura: 0.23 ± 0.04
 - Matéria bariônica: 0.046 ± 0.004

em unidades da densidade crítica:

$$\rho_c = 3H_0^2/(8\pi G) \approx 1.9 \times 10^{-29} \text{ h}^2 \text{ g cm}^{-3}$$

cosmologia de precisão



breve história da teoria do Big-Bang

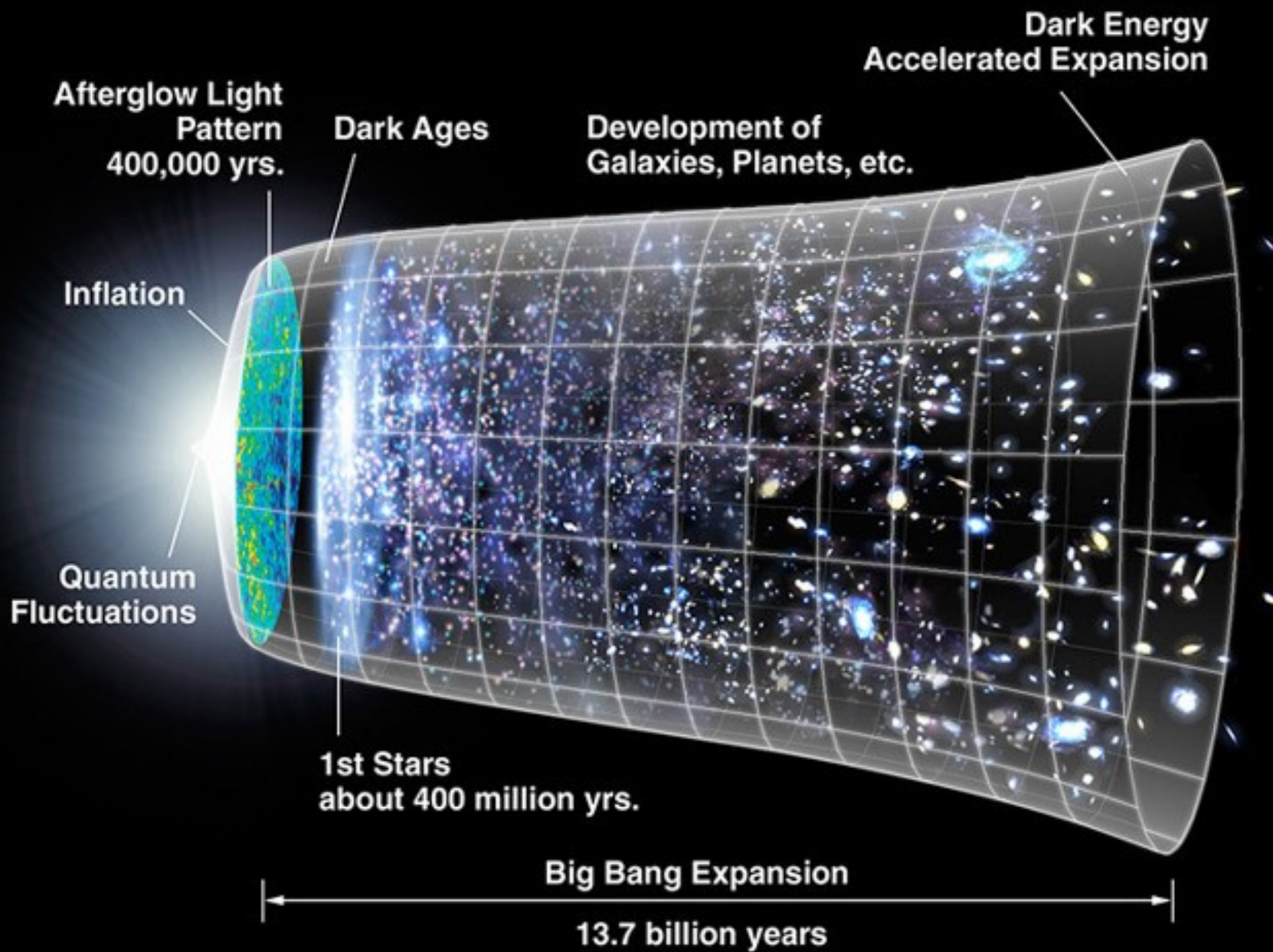
- 1915: Einstein, usando a TRG, propõe um universo estático, fechado, com uma constante cosmológica
- 1917: de Sitter propõe modelos com expansão
- 1922: Friedmann encontra a solução geral para universos dinâmicos homogêneos e isotrópicos
- ~1927: Lemaître propõe que o universo evolui a partir de um ovo *primordial*
- 1929: Hubble & Humason publicam o que veio a ser a “lei de Hubble”, a primeira evidência da expansão do universo; Einstein “abjura” a constante cosmológica
- 1933: Zwicky encontra a primeira evidência do que viria a ser a matéria escura
- 1934: Milne & McCrea fazem um modelo análogo ao relativístico: a *cosmologia newtoniana*

breve história da teoria do Big-Bang

- 1940s: Gamow, Alpher & Hermann propõem que, no começo, o universo era suficientemente quente e denso de modo a possibilitar reações nucleares; propõem que o universo teria uma radiação de fundo observada hoje com uns 50 K
- 1948 - Alpher & Hermann propõem que a radiação inicial do universo deveria ter hoje uma temperatura de ~ 5 K
- 1950: Fred Hoyle cunha pejorativamente num programa de rádio o nome *Big Bang*
- 1964: Zeldovich e Hoyle & Taylor mostram que as estrelas não podem produzir todo o He observado, mas que parte dele poderia ter se formado no começo do universo
- 1964: Penzias & Wilson detectam a radiação cósmica de fundo
- 1964, 1965: Dicke propõe (!) que o universo deveria ter sido muito quente no passado e que sua radiação original resfriada deveria ser observada hoje; Peebles calcula a temperatura esperada da radiação de fundo...

breve história da teoria do Big-Bang

- anos 70: Vera Rubin descobre as curvas de rotação chatas e as interpreta em termos de matéria escura
- 1980: Alan Guth propõe a inflação
- anos 80: surgimento do modelo da matéria escura fria
- anos 80: estabelecimento, usando o teorema do virial em aglomerados de galáxias, de que $\Omega_m \sim 0.2 - 0.3$
- 1990: o satélite COBE mede com precisão a temperatura da radiação cósmica de fundo
- 1998: dois grupos diferente observando supernovas encontram que o universo está acelerando: a constante cosmológica volta à cena
- 2003: o satélite WMAP mede as flutuações de temperatura da radiação cósmica de fundo
- começo do século XXI: a *cosmologia de precisão*



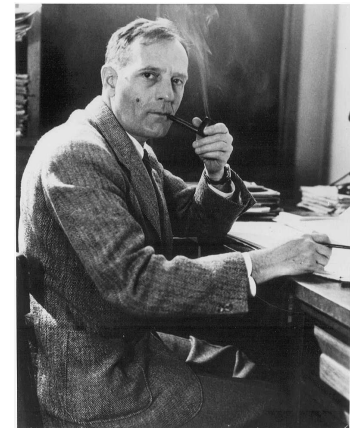
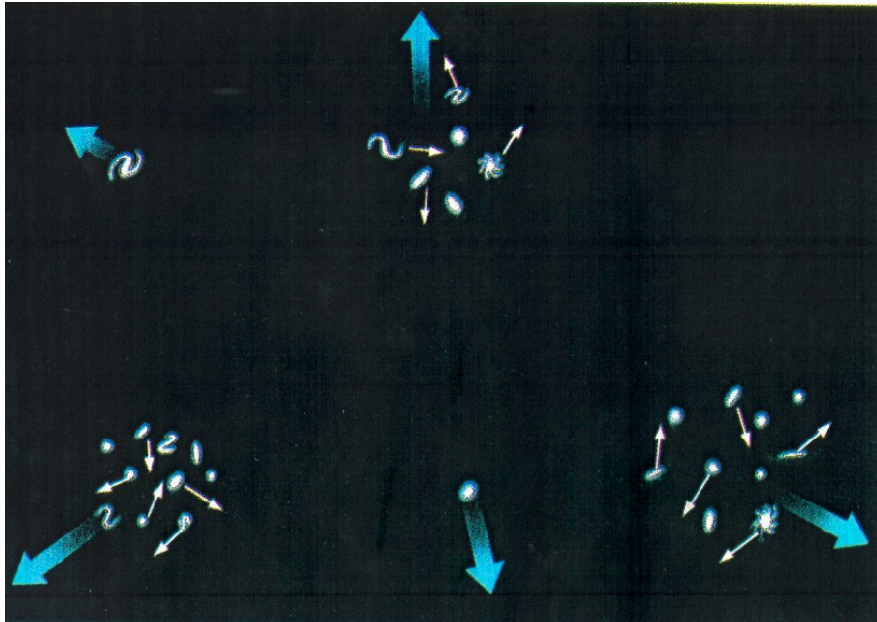
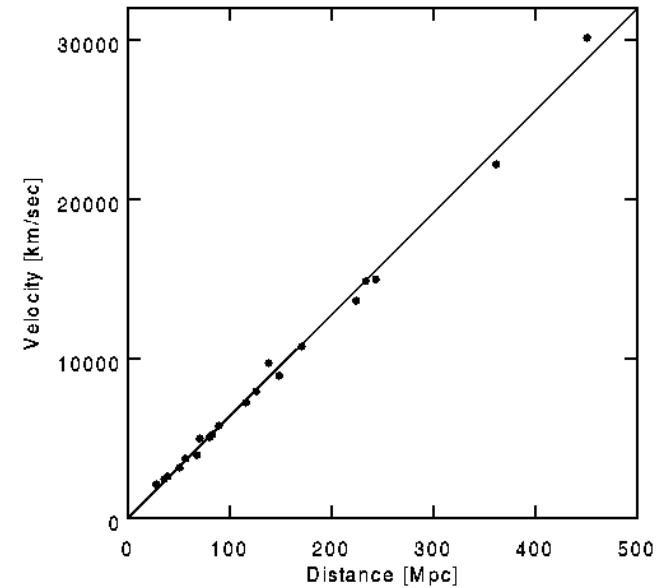
As observações fundamentais

o modelo cosmológico padrão explica algumas observações importantes:

- a lei de Hubble
- a radiação cósmica de fundo
- a abundância dos elementos leves

a lei de Hubble

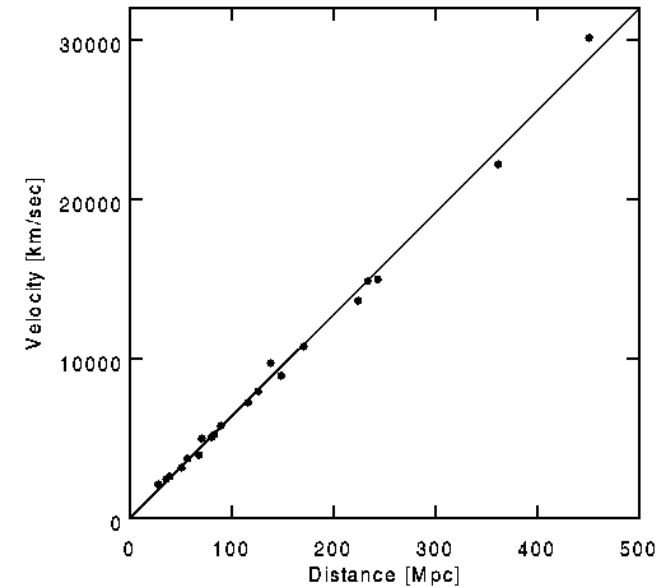
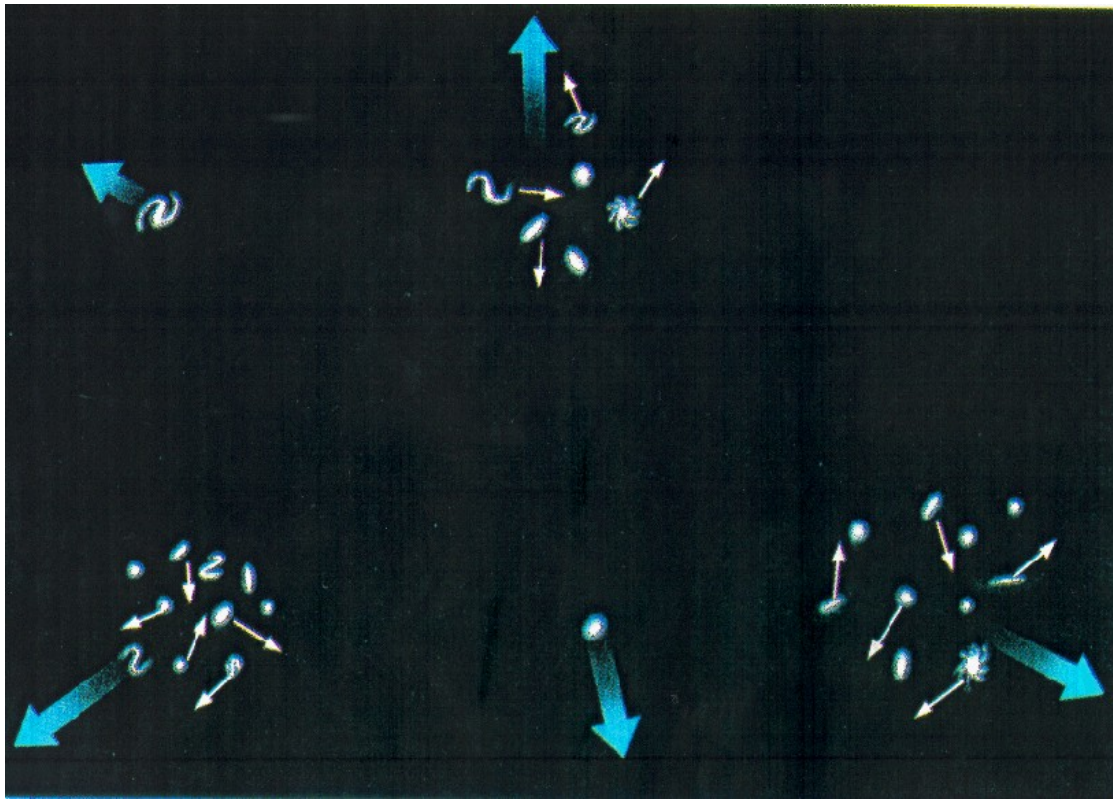
- exceto por sistemas muito próximos, as galáxias afastam-se umas das outras com velocidades que aumentam com a distância
- para galáxias próximas:
 $v = H_0 d$ $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ $h \approx 0.7$
- evidência da *expansão do universo*



a lei de Hubble

- tempo de Hubble:
uma estimativa da idade do universo:

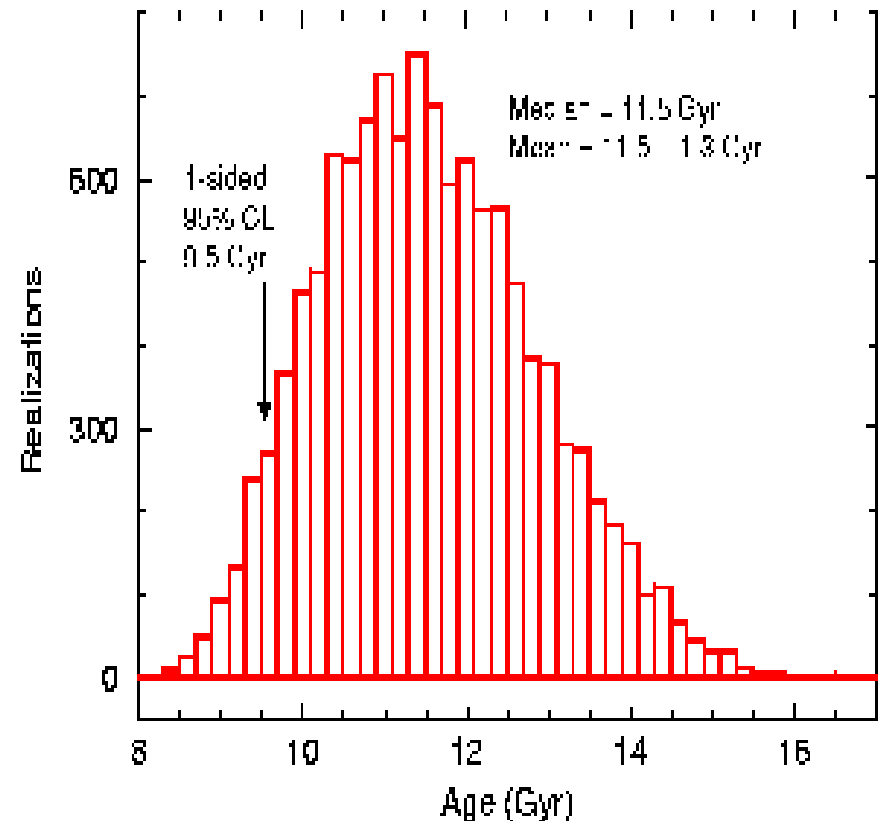
$$t_H = d / v = 1 / H_0 = 13.6 h_{72} \text{ Ganos}$$



a idade do universo

- idade das estrelas
(Krauss + Chaboyer):
 $t_0 > 10.2$ Ganos (95% c.l.)
- WMAP:
 $t_0 = 13.7$ Ganos

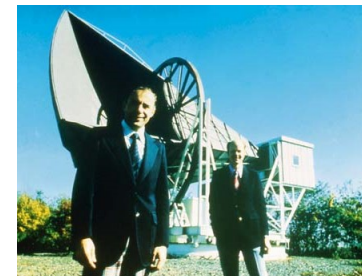
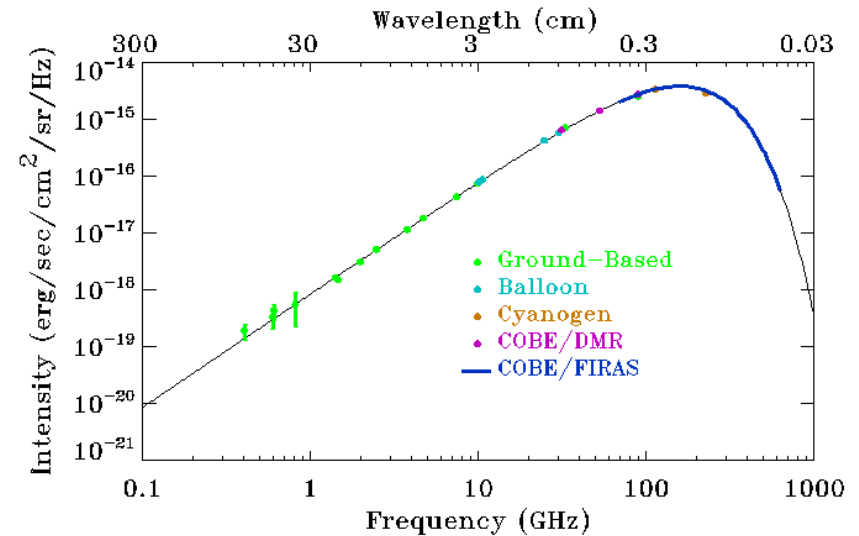
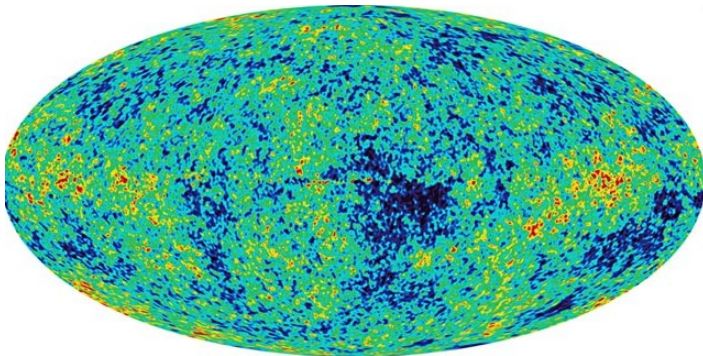
as estrelas não podem ser
mais velhas que o universo:
*a cosmologia é consistente
com a evolução estelar*



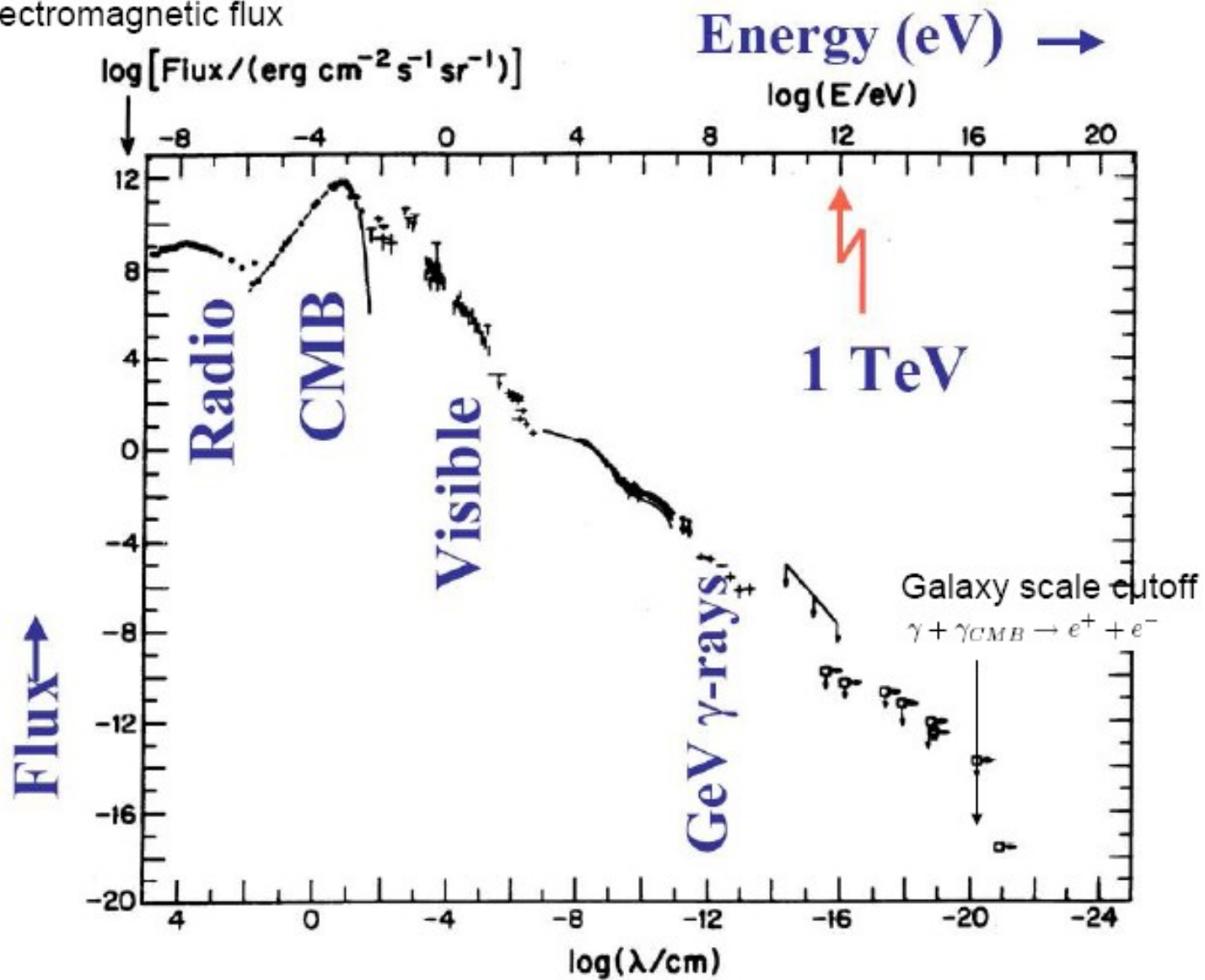
a radiação cósmica de fundo

- o universo é permeado por uma radiação de fundo: descoberta por Penzias & Wilson em 1964
- espectro de corpo negro com temperatura
 $T = 2.729 \pm 0.002 \text{ K}$ (COBE)
- radiação notavelmente isotrópica: as flutuações de temperatura são
 $\Delta T/T \approx 6 \times 10^{-6}$ (WMAP)

radiação produzida no início do universo



Electromagnetic flux

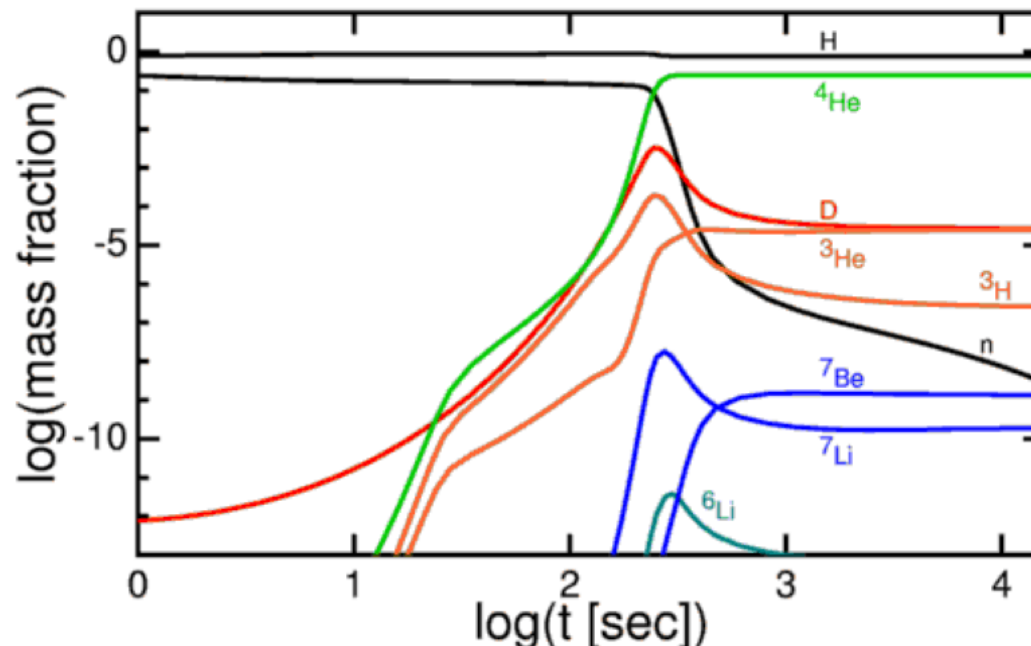


radiações de fundo

a abundância dos elementos leves

- a abundância observada do He está entre 25 e 30% (em massa)
- a teoria da evolução estelar prevê que não mais que $\sim 5\%$ pode ser formado em estrelas
- o modelo padrão prevê que o He é formado nos primeiros minutos de vida no universo, durante a nucleossíntese primordial

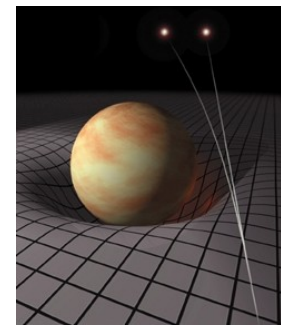
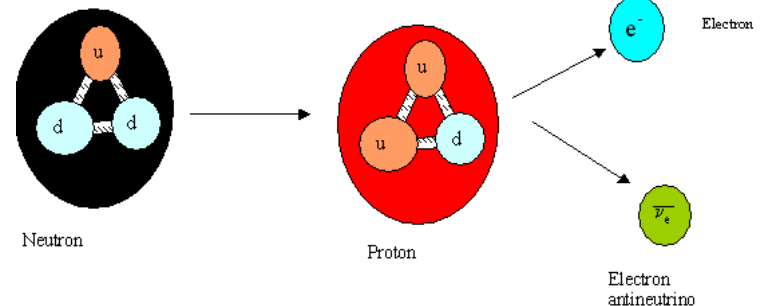
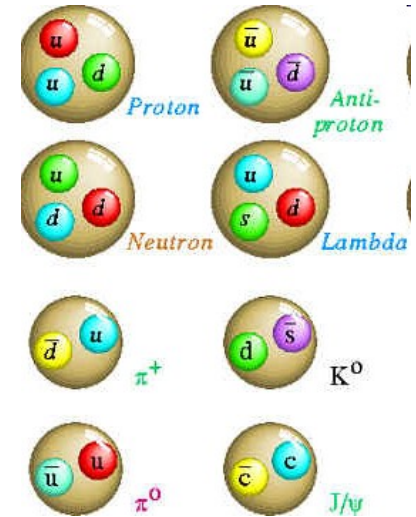
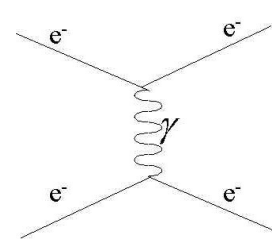
a previsão é que abund,ncia do He formado nesse processo é $\sim 25\%$!



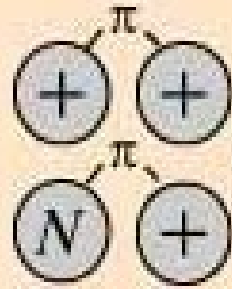
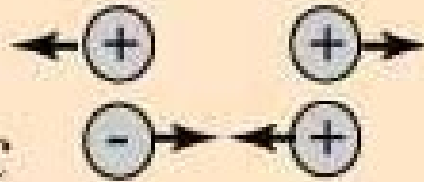
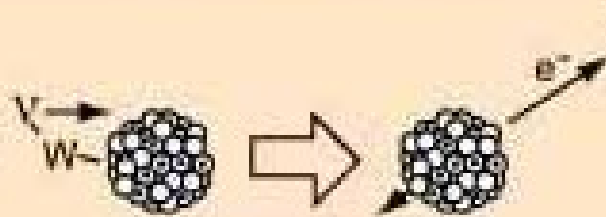
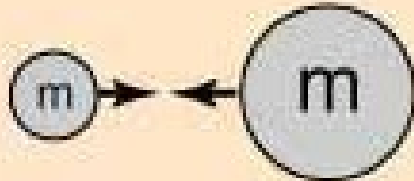
A Base Física da Cosmologia: a Gravitação

interações físicas fundamentais:

- eletromagnéticas (longo alcance, $\propto r^{-2}$)
- nucleares fortes (curto alcance)
- nucleares fracas (curto alcance)
- gravitacionais (longo alcance, $\propto r^{-2}$)



Fundamental Forces

<i>Strong</i>	 Force which holds nucleus together	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π(nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	 neutrino interaction induces beta decay	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+, W^-, Z_0, mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

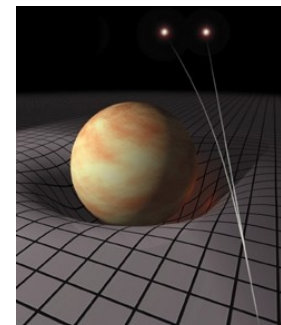
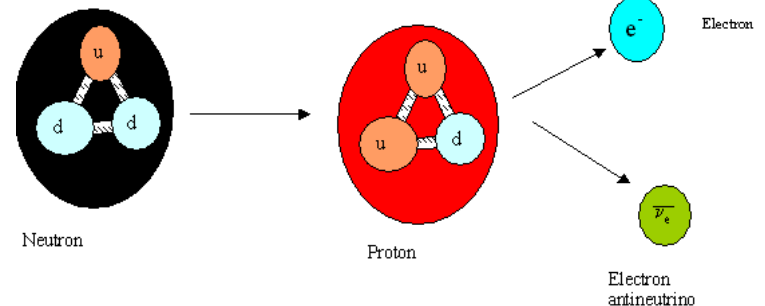
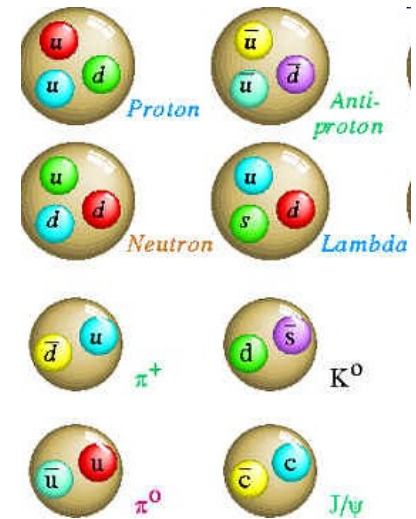
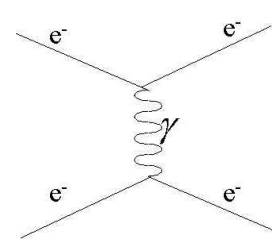
A Base Física da Cosmologia: a Gravitação

interações físicas fundamentais:

- eletromagnéticas (longo alcance, $\propto r^{-2}$)
- nucleares fortes (curto alcance)
- nucleares fracas (curto alcance)
- gravitacionais (longo alcance, $\propto r^{-2}$)

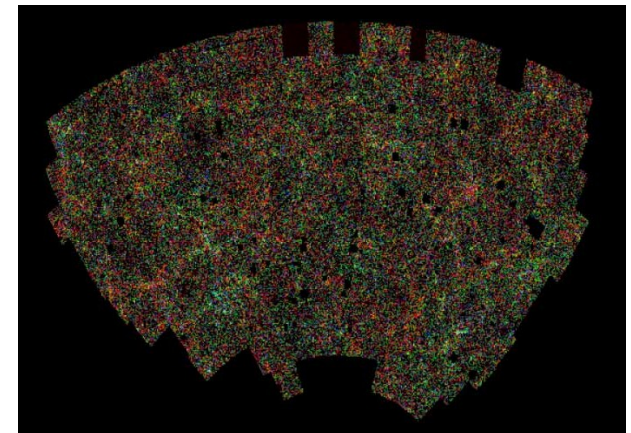
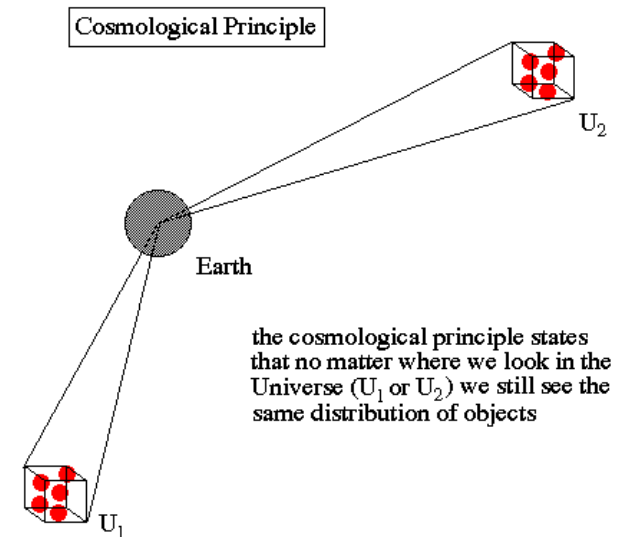
a neutralidade da carga elétrica da matéria faz com que a gravitação seja a força dominante em grandes escalas

logo, a descrição do universo como um todo (cosmologia!) deve ser feita com uma teoria da gravitação



O Princípio Cosmológico

- hipótese básica: em escalas suficientemente grandes o universo é homogêneo e isotrópico
 - homogêneo: todos os lugares são equivalentes
 - isotrópico: todas as direções são equivalentes
- evidências do PC:
 - distribuição de galáxias e rádio-fontes em grandes escalas
 - radiação de fundo em raios-X (atribuída a quasares distantes) e em microondas

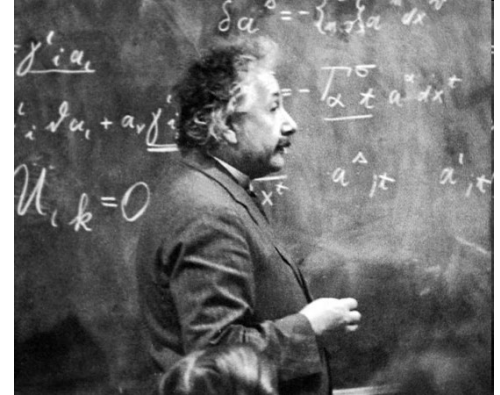


APM Survey picture of a large part of the sky, about 30 degrees across, showing almost a million galaxies out to a distance of about 2 billion light years.

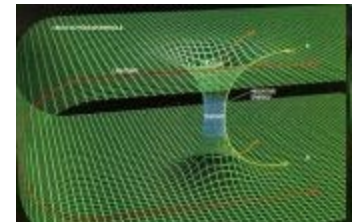
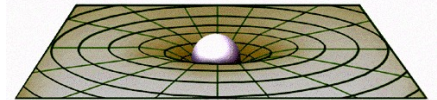
MAP990047

A teoria da relatividade geral

- *teoria da gravitação* (Einstein 1916)
- as equações de campo:
a distribuição de massa diz ao espaço como se curvar
o espaço diz à matéria como se mover



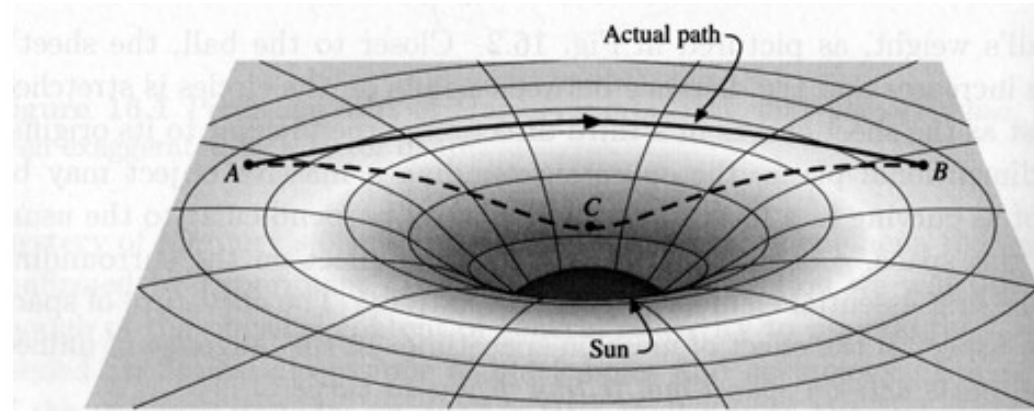
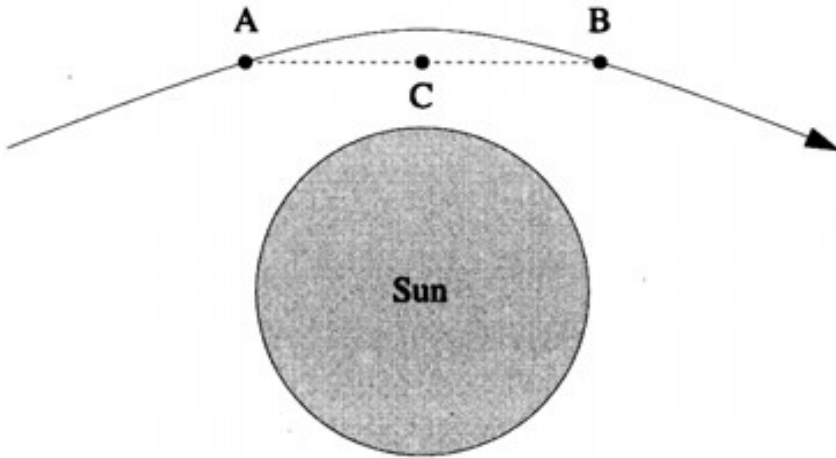
$$G^{\mu\nu} = 8\pi G/c^4 T^{\mu\nu}$$



↑
tensor de Einstein:
caracteriza a geometria do espaço-tempo

↘
tensor de momentum-energia:
distribuição de massa e energia
no espaço-tempo

A teoria da relatividade geral

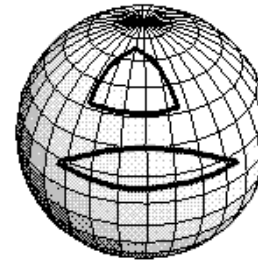


a distribuição de massa diz ao espaço como se curvar
o espaço diz à luz como se propagar

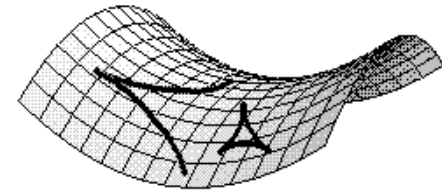


O Princípio Cosmológico

- hipótese básica: em escalas suficientemente grandes o universo é homogêneo e isotrópico



Universe with *positive* curvature. Diverging line converge at great distances. Triangle angles add to more than 180° .



Universe with *negative* curvature. Lines diverge at ever increasing angles. Triangle angles add to less than 180° .

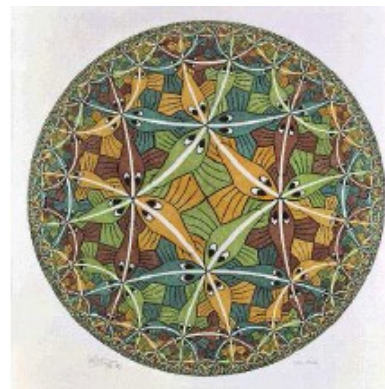
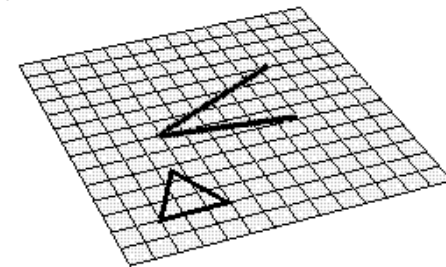
- na TRG o PC implica em espaços de curvatura constante

k : sinal da curvatura

$-k=0$: espaço plano, *infinito*

$-k=+1$: hiper-esfera, *finito*

$-k=-1$: *infinito*



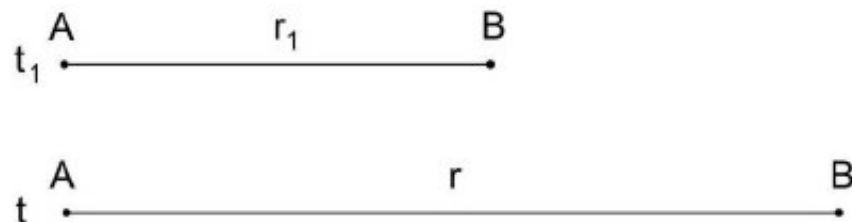
o fator de escala $R(t)$

- o fator de escala descreve a expansão ou contração do universo em função do tempo

(movimentos puramente radiais)

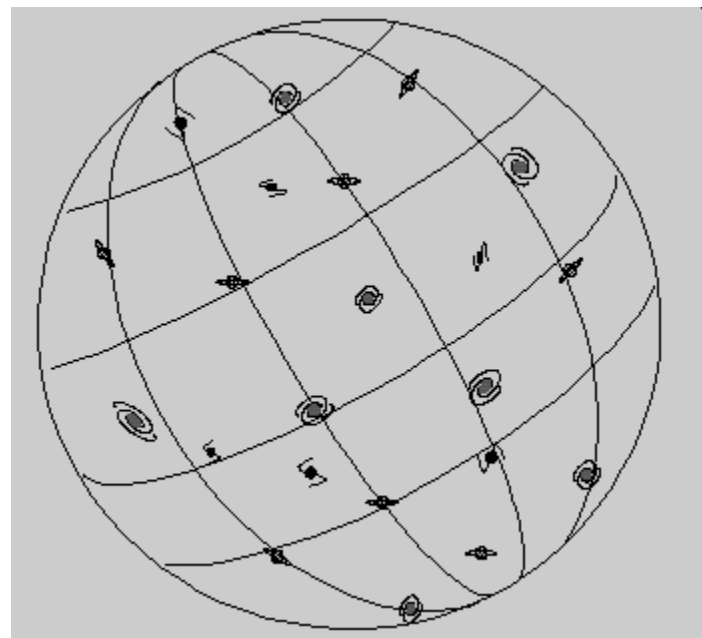
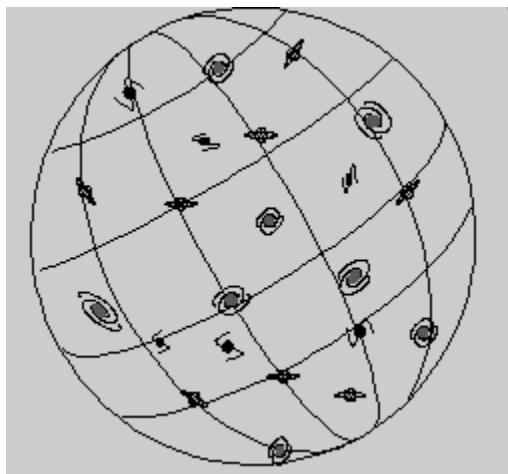
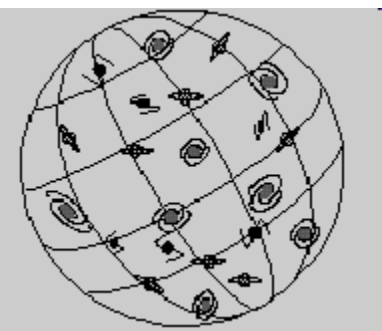
- r_1 : distância entre duas galáxias no instante t_1

- r_2 : distância entre duas galáxias no instante t_2



- $R(t)$ é então definido como:

$$r_1 = R(t_1)/R(t_2) r_2$$



o fator de escala $R(t)$

- relação com a curvatura do espaço:

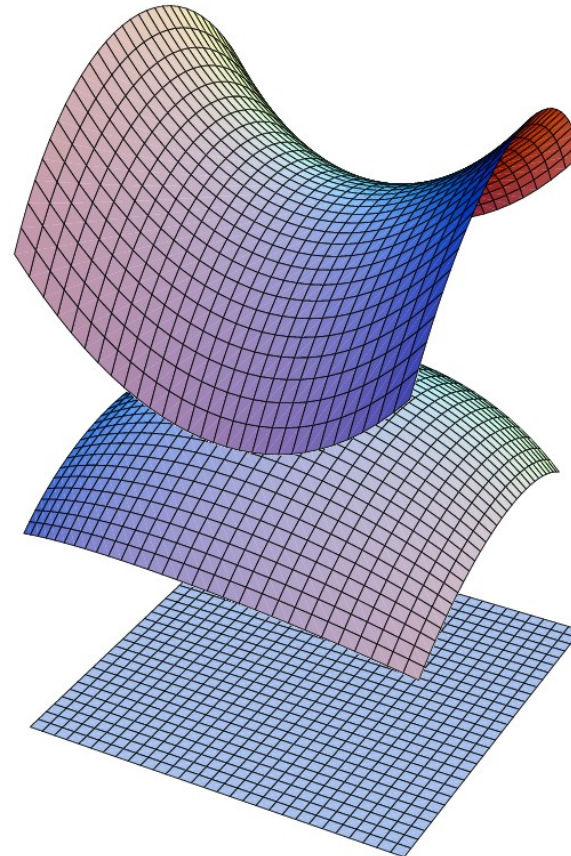
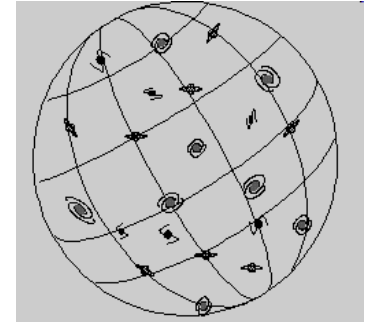
$$K(t) = k / R(t)^2$$

- $k=0$: espaço plano, infinito

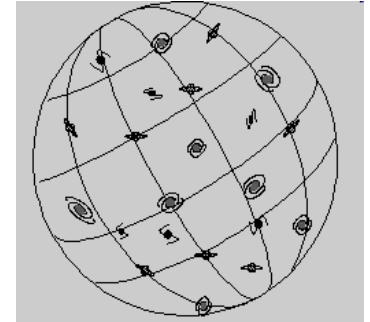
- $k=+1$: hiper-esfera, finito

- $k=-1$: infinito

k : sinal da curvatura



o fator de escala $R(t)$



- relação com o redshift:

$$1 + z = R(t_0) / R(t) = R_0 / R(t)$$

t : idade do universo no instante em que o fóton foi emitido

t_0 : idade do universo hoje

o redshift mede diretamente a expansão do espaço:

quando um objeto em $z=1$ emitiu sua luz, as escalas no universo eram metade do que são hoje

o fator de escala $R(t)$

- relação com o redshift:

$$1 + z = R(t_0)/R(t)$$

t : idade do universo no instante em que o fóton foi emitido

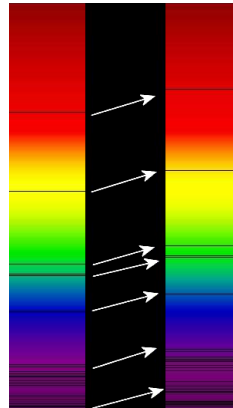
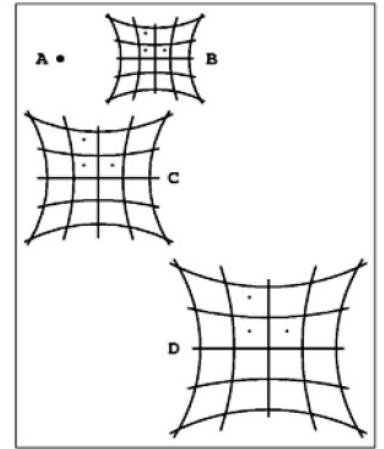
t_0 : idade do universo hoje

na TRG o comprimento de onda da radiação λ é proporcional a $R(t)$:

$$\lambda(t) \propto R(t)$$

e daí se obtém a relação do desvio espectral:

$$z = [\lambda_0 - \lambda(t)] / \lambda(t)$$

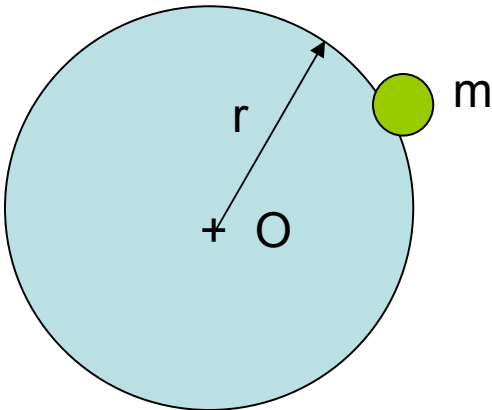


a cosmologia newtoniana

- vamos supor que a dinâmica de uma galáxia de massa m , que dista r de um observador O depende apenas da massa no interior da esfera de raio r centrada em O :

$$M(r) = 4/3 \pi r^3 \rho \quad \rho: \text{densidade média da esfera no instante } t$$

- força gravitacional sobre m : $m d^2r / dt^2 = - GM(r)m/r^2 = - 4\pi Gm\rho r / 3$
- fator de escala: $r = R(t)/R(t_0) r_0$
- logo, $d^2R / dt^2 = - 4\pi G\rho R / 3$

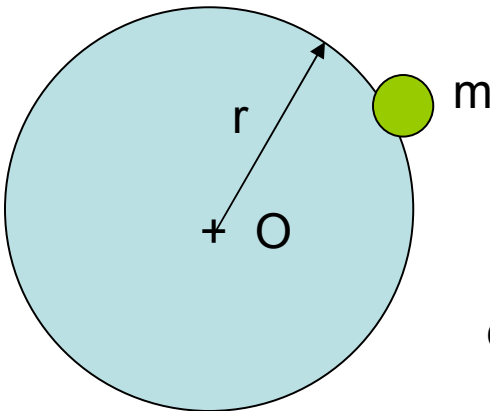


a cosmologia newtoniana

- vamos supor que a dinâmica de uma galáxia de massa m , que dista r de um observador O depende apenas da massa no interior da esfera de raio r centrada em O :

$$M(r) = 4/3 \pi r^3 \rho \quad \rho: \text{densidade média da esfera no instante } t$$

- força gravitacional sobre m : $m d^2r / dt^2 = - GM(r)m/r^2 = - 4\pi Gm\rho r / 3$
- fator de escala: $r = R(t)/R(t_0) r_0$
- logo, $d^2R / dt^2 = - 4\pi G\rho R / 3$



essa cosmologia não é de Newton!





a cosmologia relativística: as equações de Friedmann-Lemaître



- conteúdo do universo: fluido uniforme de densidade ρ , pressão p e constante cosmológica Λ
- a evolução dinâmica do universo é descrita pelas equações de Friedmann-Lemaître

$$\frac{8\pi G}{c^2}p(t) = -\frac{kc^2}{R(t)^2} - \frac{\dot{R}(t)^2}{R(t)^2} - 2\frac{\ddot{R}(t)}{R(t)} + \Lambda$$

$$\frac{8\pi G}{3}\rho(t) = \frac{kc^2}{R(t)^2} + \frac{\dot{R}(t)^2}{R(t)^2} - \frac{\Lambda}{3}$$

Λ : constante cosmológica

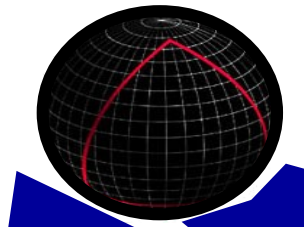
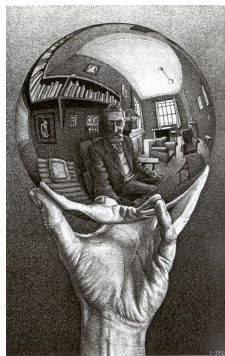
- daí vem que

$$\ddot{R}(t) = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho(t) + \frac{3p(t)}{c^2} \right) + \frac{1}{3}\Lambda R$$

compare com o resultado obtido na cosmologia newtoniana

$$\ddot{R}(t) = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho(t) + \frac{3p(t)}{c^2} \right) + \frac{1}{3}\Lambda R$$

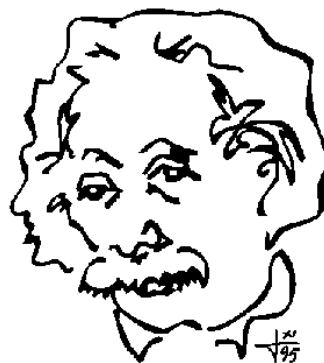
- note que se $\Lambda=0$ esta equação não pode ter solução estática (isto é, $R = cte$): o universo deve estar em expansão ou contração
- por achar que o universo era estático, Einstein introduziu em 1919 a constante cosmológica (que atua como uma “anti-gravidade”)
o Universo de Einstein: $k=+1$, $R = cte$



- a constante cosmológica Λ
 - por achar que o universo era estático, Einstein introduziu em 1919 a constante cosmológica (que atua como uma “anti-gravidade”)
- o Universo de Einstein: $k=+1$, $R = cte$

“o maior erro da minha vida!”

será?



a evolução da densidade

- se a matéria se conserva durante a expansão:

$$\rho_m = \rho_{m0} (R_0/R)^3$$

- a densidade da radiação é

$$\rho_r = \rho_{r0} (R_0/R)^4$$

no expoente, 3 corresponde ao número de fótons e 1 ao redshift

- a densidade da “energia escura” é

$$\rho_\lambda = \Lambda / (8 \pi G)$$

- densidade total

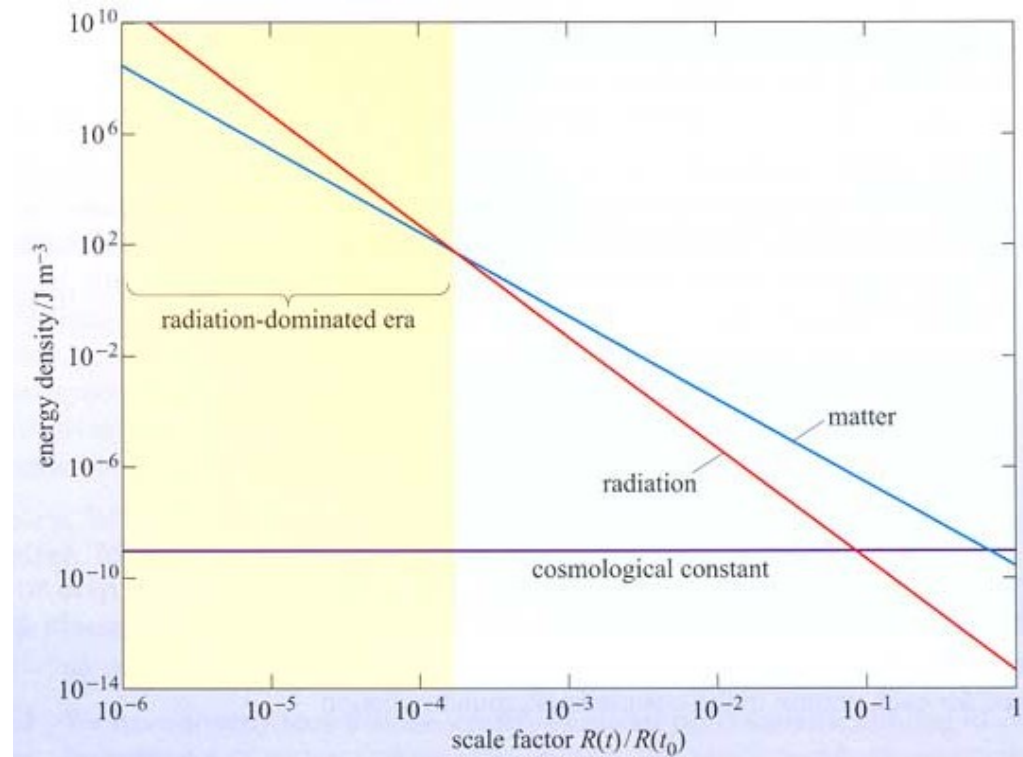
$$\rho = \rho_m + \rho_r + \rho_\lambda + \dots$$

a evolução da densidade

- densidade de matéria:
 $\rho_m = \rho_{m0} (R_0/R)^3$
- densidade da radiação:
 $\rho_r = \rho_{r0} (R_0/R)^4$
- densidade da energia escura:
 $\rho_\lambda = \Lambda / (8 \pi G)$

esse comportamento permite dividir o universo em 3 grandes eras:

- a era da radiação
- a era da matéria
- a era da energia escura



parâmetros cosmológicos

- parâmetro de Hubble:

$$H(t) = (dR/dt) / R$$

mede a taxa de expansão do universo

- parâmetro de densidade:

$$\Omega(t) = \rho(t) / \rho_c(t)$$

onde a densidade crítica é:

$$\rho_c = 3H(t)^2 / (8\pi G)$$

analogamente:

parâmetro de densidade do vácuo (constante cosmológica): $\Omega_\lambda(t) = \rho_\lambda(t) / \rho_c(t)$

parâmetro de densidade da matéria: $\Omega_m(t) = \rho_m(t) / \rho_c(t)$, etc...

- parâmetro de curvatura:

$$\Omega_k(t) = k(c / HR)^2$$

- parâmetro de desaceleração:

$$q(t) = - R (d^2R/dt^2) / (dR/dt)^2$$

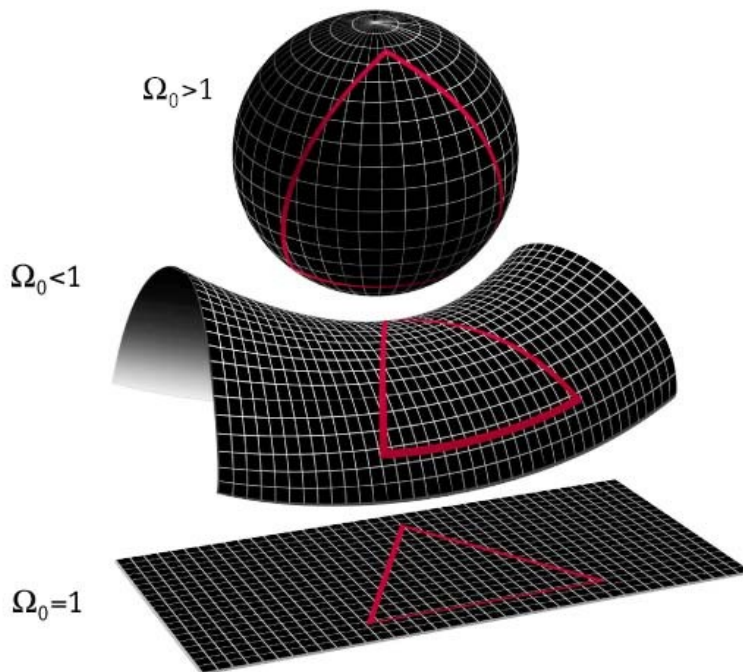
parâmetros cosmológicos

Note que esses parâmetros dependem do tempo. Os valores atuais desses parâmetros, de acordo com a equipe do WMAP (Hinshaw et al. 2008), são (assumindo $\Omega_k = 0$):

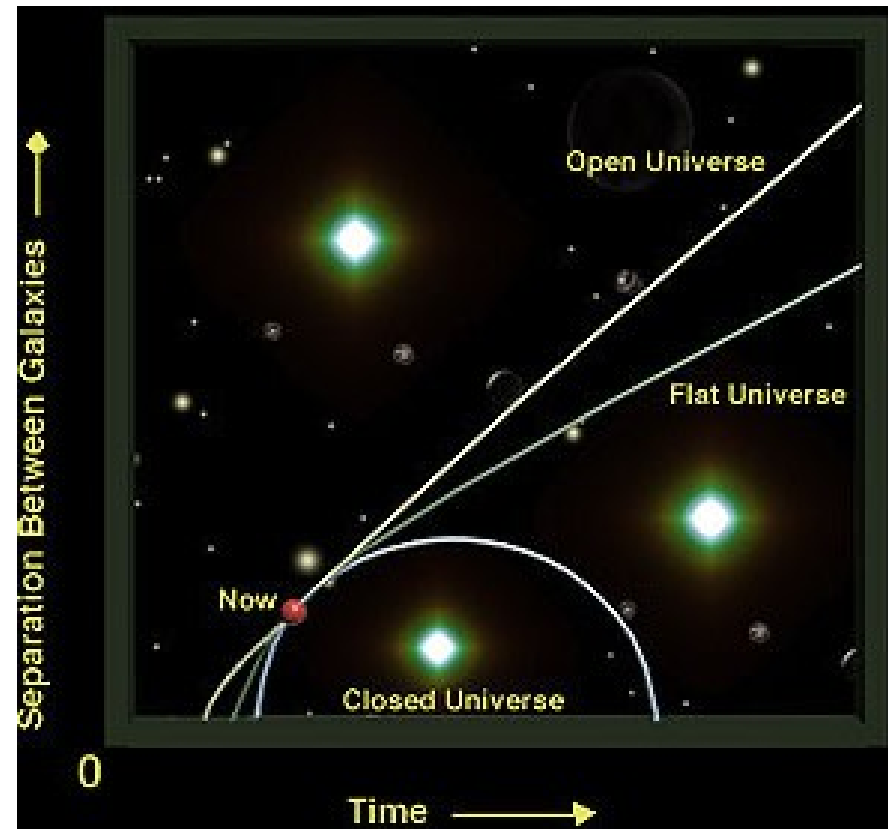
- $H_0 = 70.1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- $\rho_{c,0} = 1.88 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3} = 9.2 \times 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$
- $\Omega_{m,0} = 0.28$
- $\Omega_\lambda = 0.72$
- $\Omega_{b,0} = 0.0462$
- $\Omega_{r,0} = 2.49 \times 10^{-5} h^{-2} (T/2.73)^4$

modelos cosmológicos

- os modelos cosmológicos são soluções das equações de Friedmann-Lemaître
- se $\Lambda = 0$: modelos de Friedmann: há uma conexão direta entre densidade média e curvatura



MAP990006



modelos de Friedmann

- se $\Lambda = 0$,
$$8 \pi G \rho / 3 = k c^2 / R^2 + H^2$$

então,

$$k = R^2 / c^2 [8 \pi G \rho / (3 H^2) - 1]$$

definindo

$$\rho_c(t) = 3 H(t)^2 / (8 \pi G \rho(t)) \quad e \quad \Omega = \rho / \rho_c,$$

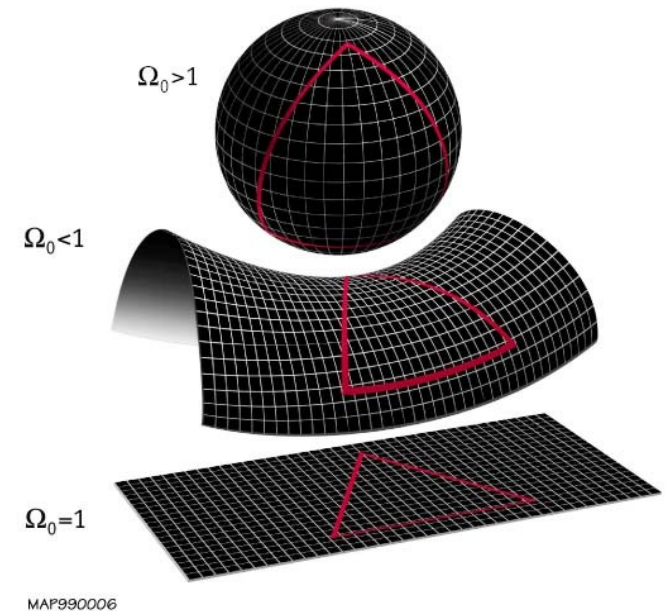
vem que:

logo,

se $\Omega > 1$, $k = +1$

se $\Omega = 1$, $k = 0$

se $\Omega < 1$, $k = -1$



modelos de Friedmann

- exemplo: universo de Einstein – de Sitter
universo “plano”, apenas com matéria, sem pressão, sem Λ

$$\Lambda=0, p=0, k=0, \rho=\rho_m$$

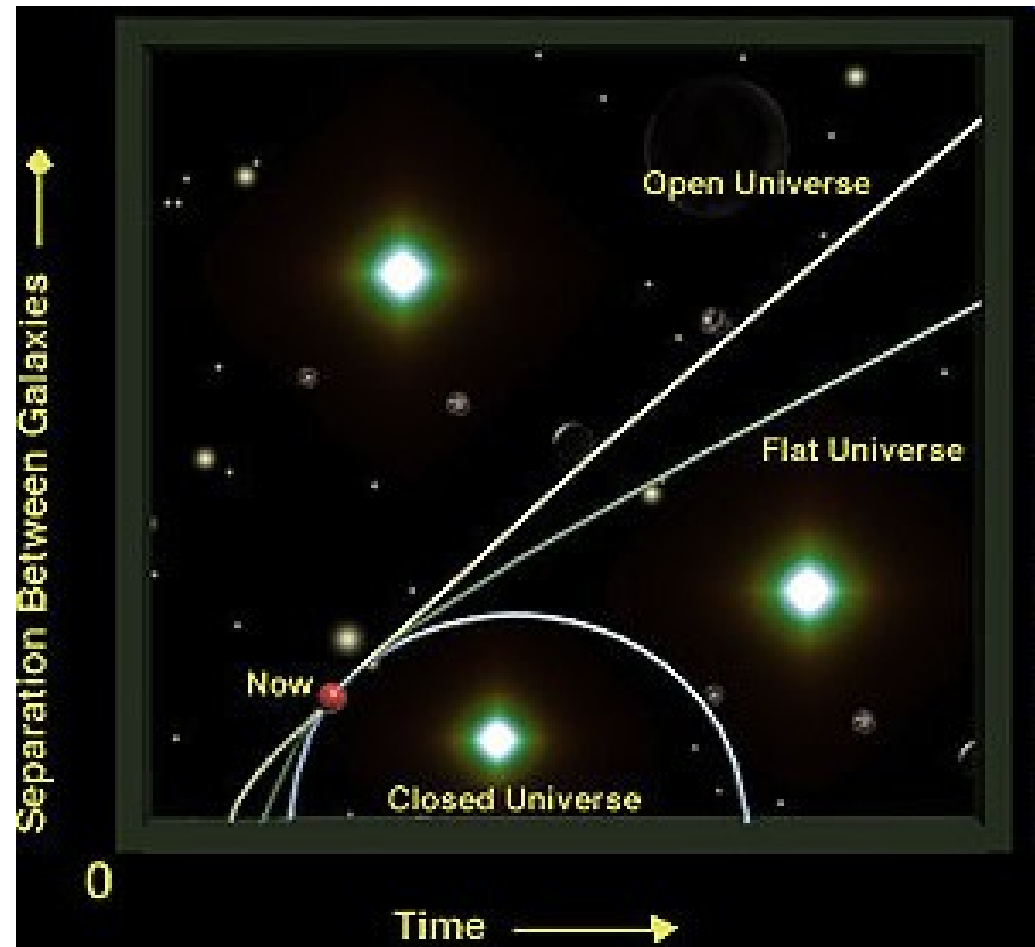
nesse caso,

$$R(t) \propto t^{2/3}$$

$$H(t) = 2/(3t)$$

idade do universo:

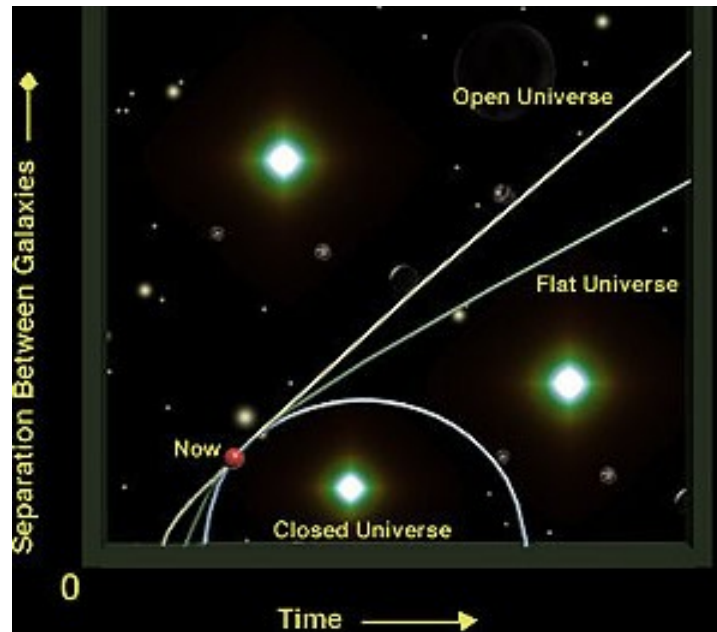
$$t_0 = 2/(3H_0) \approx 6.5 \times 10^9 h^{-1} \text{ anos}$$



modelos de Friedmann

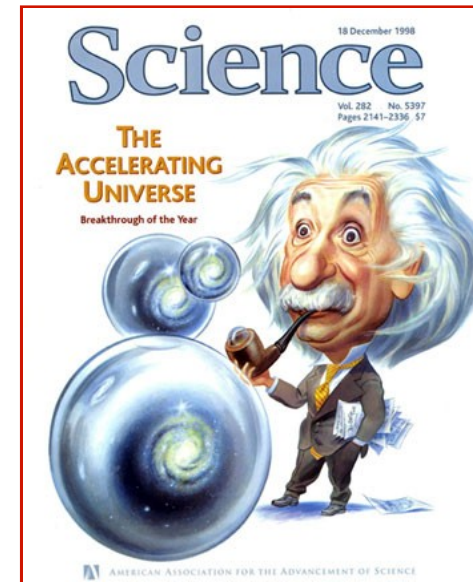
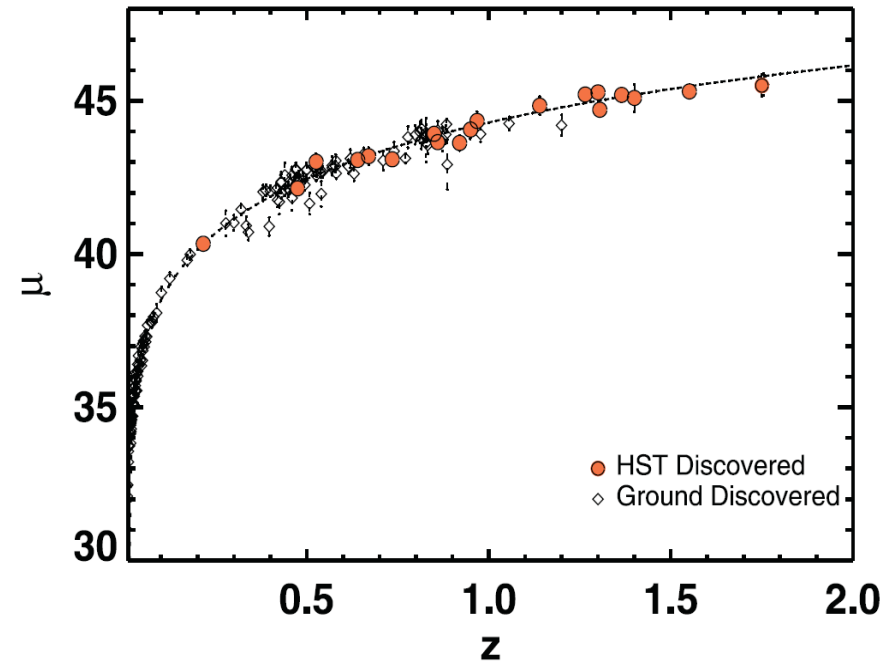
TABLE 11.1
Standard Friedmann Models

Model	Geometry	k	Ω	q_0	Age	Fate
Closed	Spherical	+1	> 1	$> 1/2$	$t_0 < \frac{2}{3}t_H$	Recollapse
Einstein–de Sitter	Flat	0	$= 1$	$= 1/2$	$t_0 = \frac{2}{3}t_H$	Expand forever
Open	Hyperbolic	-1	< 1	$< 1/2$	$\frac{2}{3}t_H < t_0 < t_H$	Expand forever



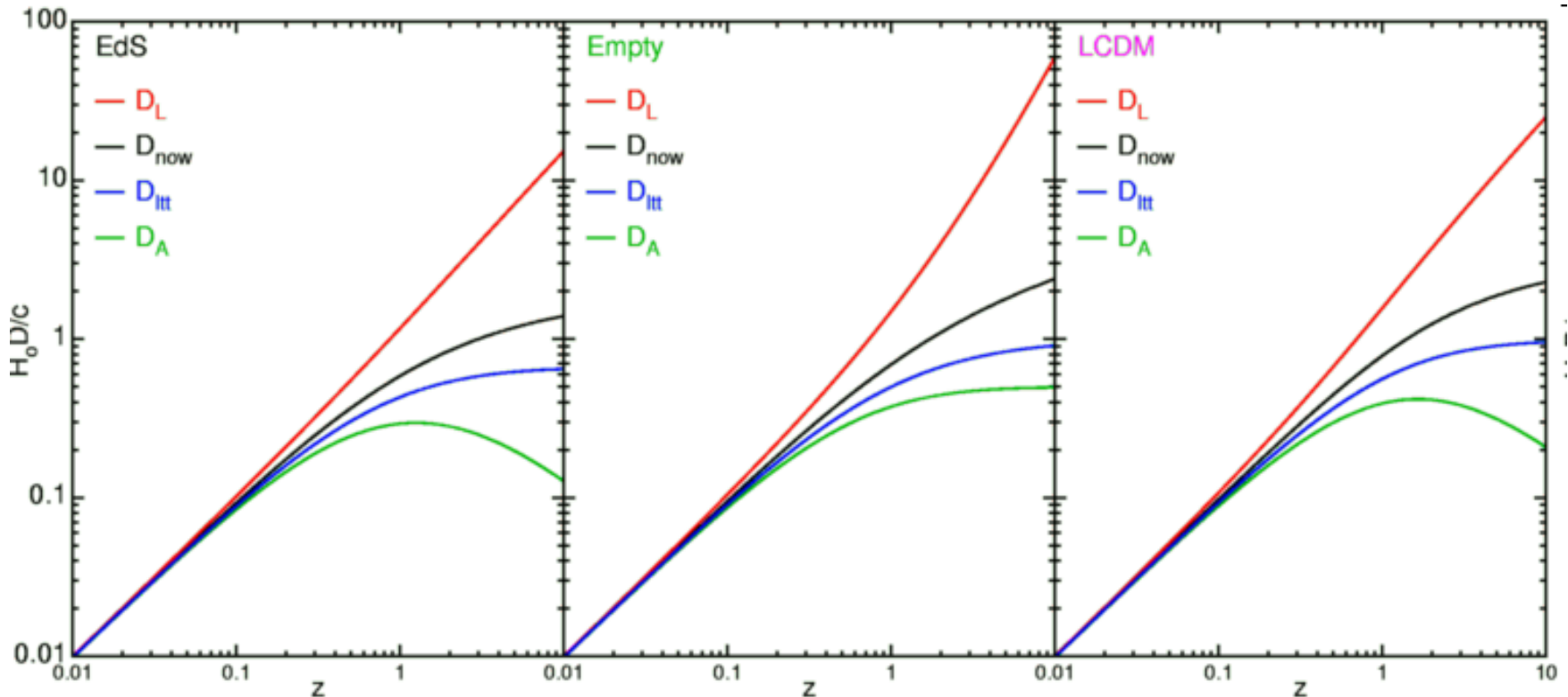
as supernovas e a energia escura

- 1998: observações de supernovas Ia indicam que o universo está se acelerando!
- melhor ajuste para o módulo de distância em função do redshift: universo com constante cosmológica
 $\Omega_m = 0.29$ $\Omega_\lambda = 0.71$
- mas pode ser que a constante cosmológica não seja constante: energia escura



modelos cosmológicos

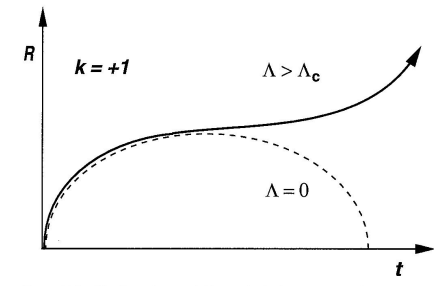
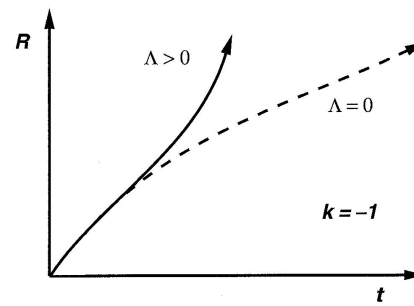
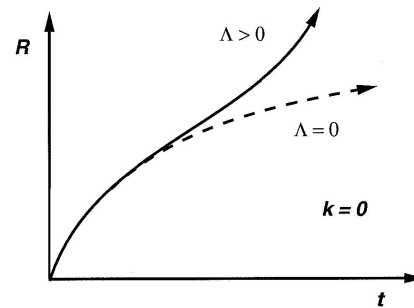
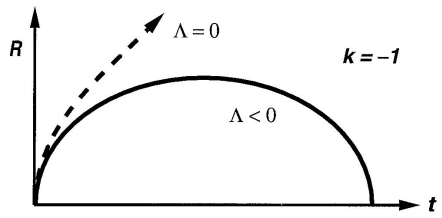
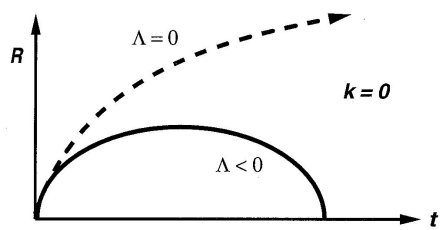
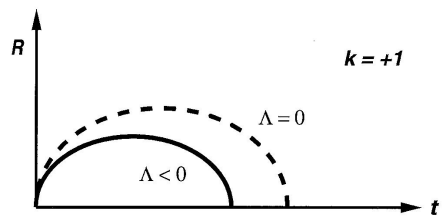
- lei de Hubble em vários modelos cosmológicos
paradigma: Λ CDM – universo com matéria escura fria dominado por uma constante cosmológica



modelos com $\Lambda \neq 0$

TABLE 11.2
Cosmological Models

Model	Geometry	Λ	q	Fate
Einstein	Spherical	Λ_c	0	Unstable: collapse or expand
de Sitter	Flat	> 0	-1	Exponential expansion
Steady state	Flat	> 0	-1	Exponential expansion
Lemaître	Spherical	$> \Lambda_c$	< 0 after hover	Expand, hover, expand
Closed	Spherical	0	$> 1/2$	Big crunch
Einstein–de Sitter	Flat	0	$1/2$	Expand forever
Open	Hyperbolic	0	$0 < q < 1/2$	Expand forever
Negative Λ	Any	< 0	> 0	Big crunch

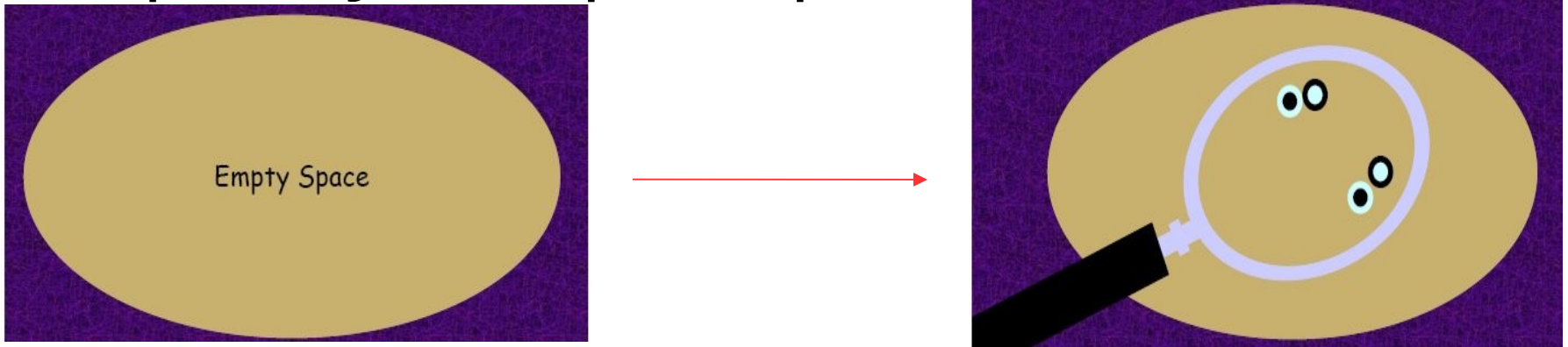


O que é a energia escura?

- anti-gravidade, gravidade repulsiva
- requer pressão negativa
- que “fluido” teria essas propriedades?
o vácuo quântico

O que é a energia escura?

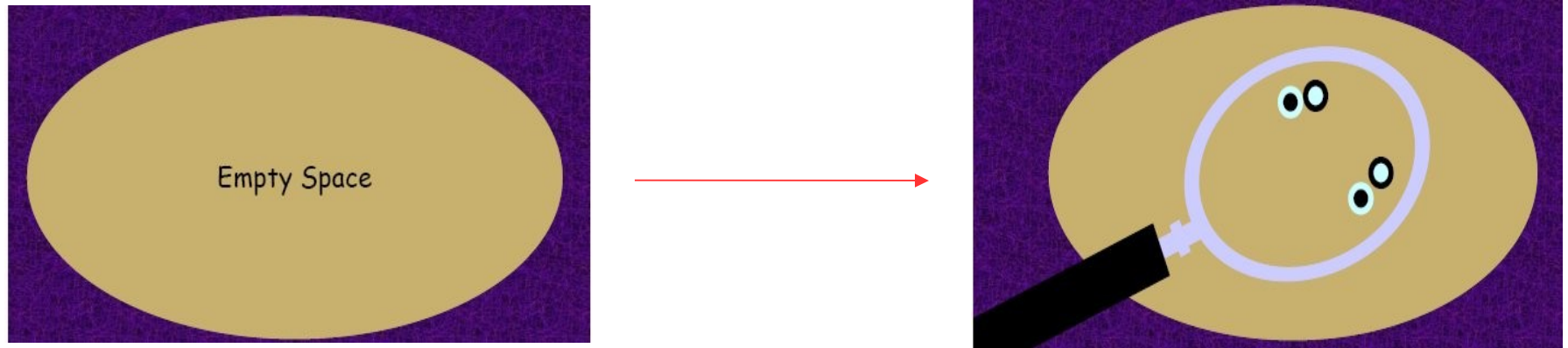
- “flutuações quânticas” do vácuo:
produção de pares partícula-antipartícula



sabemos que existem: podem ser medidas em laboratórios
Efeito Casimir - polarização do vácuo

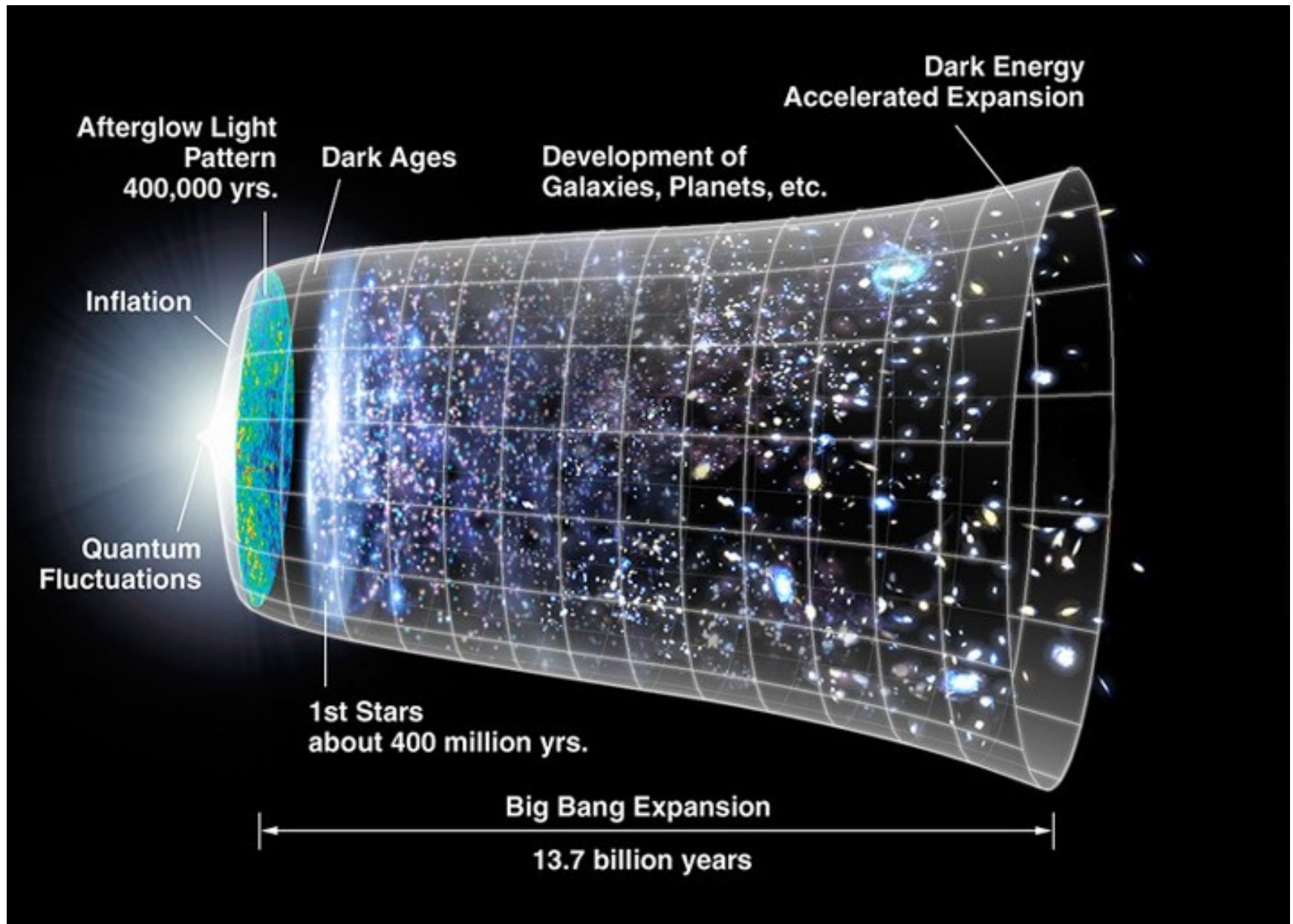
O que é a energia escura?

- “flutuações quânticas” do vácuo?



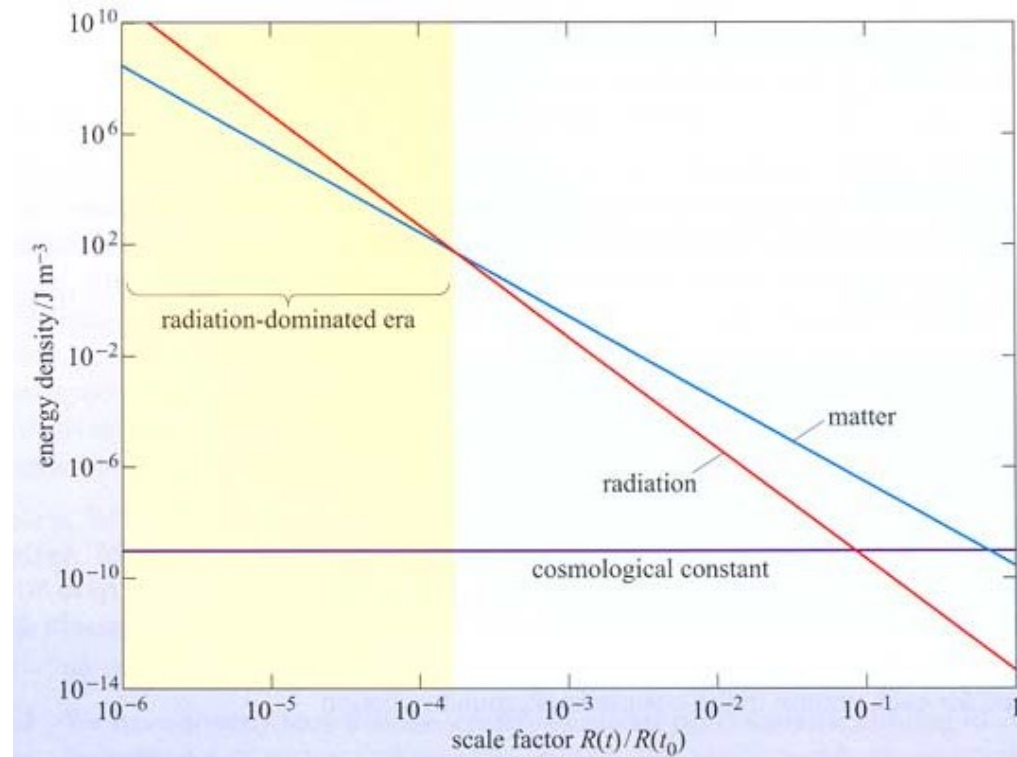
**Problema: a diferença entre o valor previsto e o observado para a quantidade de energia escura é enorme:
 10^{120} ordens de magnitude**

A evolução do universo



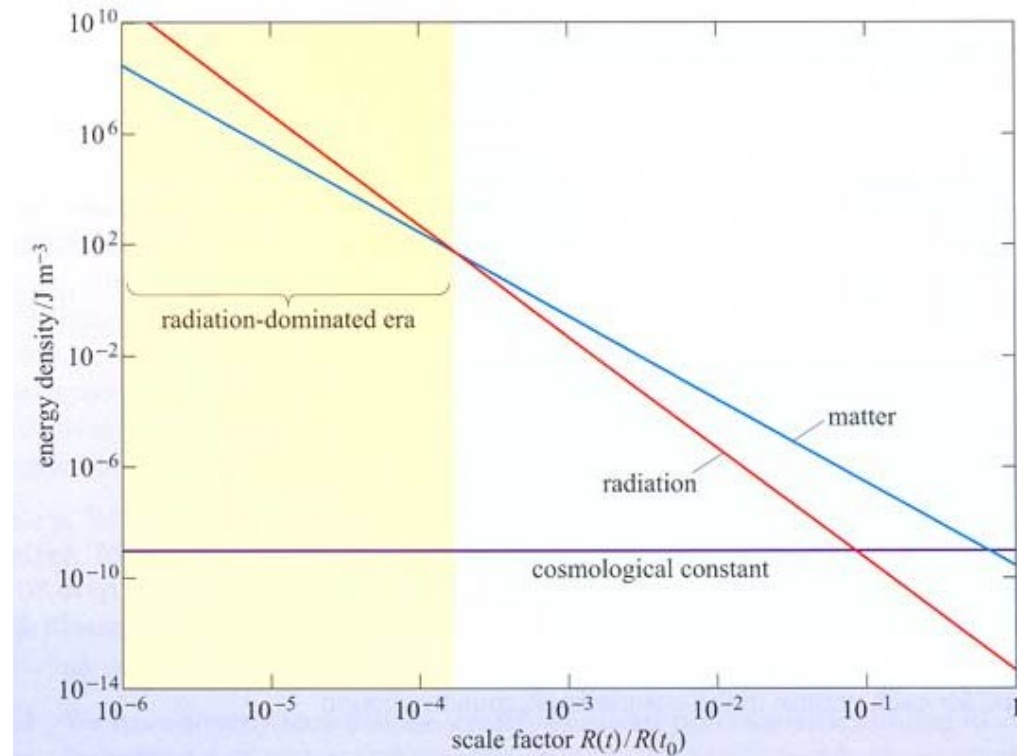
A evolução do universo as 3 eras principais

- densidade de matéria:
 $\rho_m = \rho_{m0} (R_0/R)^3$
- densidade da radiação:
 $\rho_r = \rho_{r0} (R_0/R)^4$
- densidade da energia escura:
 $\rho_\lambda = \Lambda / (8 \pi G)$
- 3 eras:
 - a era da radiação
 - a era da matéria
 - a era da constante cosmológica



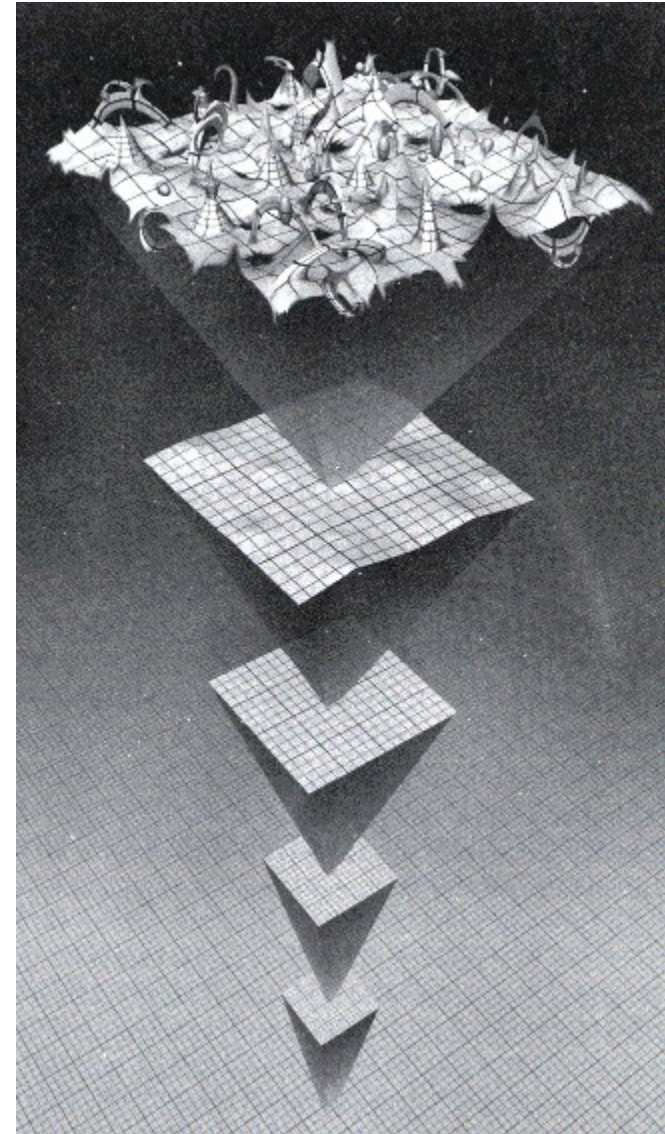
A evolução do universo as 3 eras principais

- densidade de matéria:
 $\rho_m = \rho_{m0} (R_0/R)^3$
- densidade da radiação:
 $\rho_r = \rho_{r0} (R_0/R)^4$
- densidade da energia escura:
 $\rho_\lambda = \Lambda / (8 \pi G)$
- época da igualdade: $\rho_r = \rho_m$
nesse caso (lembrando que $R_0/R = 1+z$),
 $z_i = \Omega_{m0} / \Omega_{r0} - 1$
ou
 $z_i \approx 5500$
marca o fim da era da radiação
- domínio da energia escura: $\rho_\lambda > \rho_m$
 $z < (\Omega_{\lambda 0} / \Omega_{m0})^{1/3} - 1 \approx 0.37$



A evolução do universo o Big Bang

- Big Bang: $t = 0$, $R(t) = 0$
singularidade: em $t = 0$, ρ e p são infinitos!
- a singularidade não é um evento localizado:
ela ocupa todo o universo
- na verdade as leis da física conhecida não
valem nas condições extremas do Big Bang:
há necessidade de uma teoria quântica da
gravitação



A evolução do universo o Big Bang

- o tempo de Planck marca o limite da aplicabilidade da relatividade geral:

$$t_{Pl} = (Gh/c^5)^{1/2} = 1.4 \times 10^{-43} \text{ s}$$

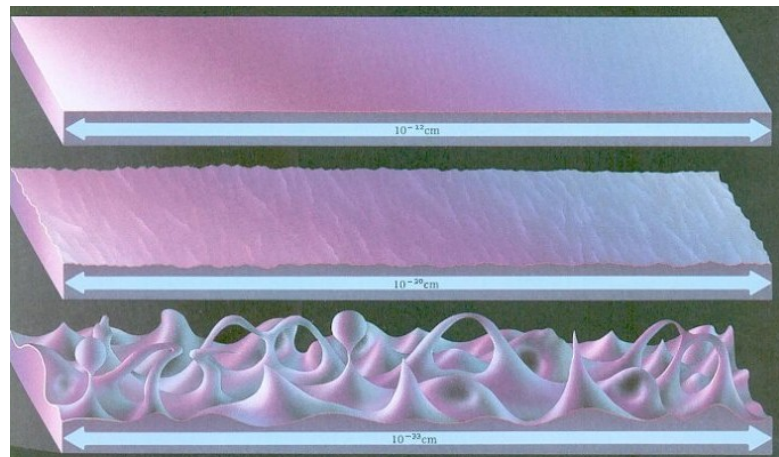
(aqui h é a constante de Planck)

- escala de Planck:

$$l_{Pl} = c t_{Pl} = (Gh/c^3)^{1/2} = 1.6 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

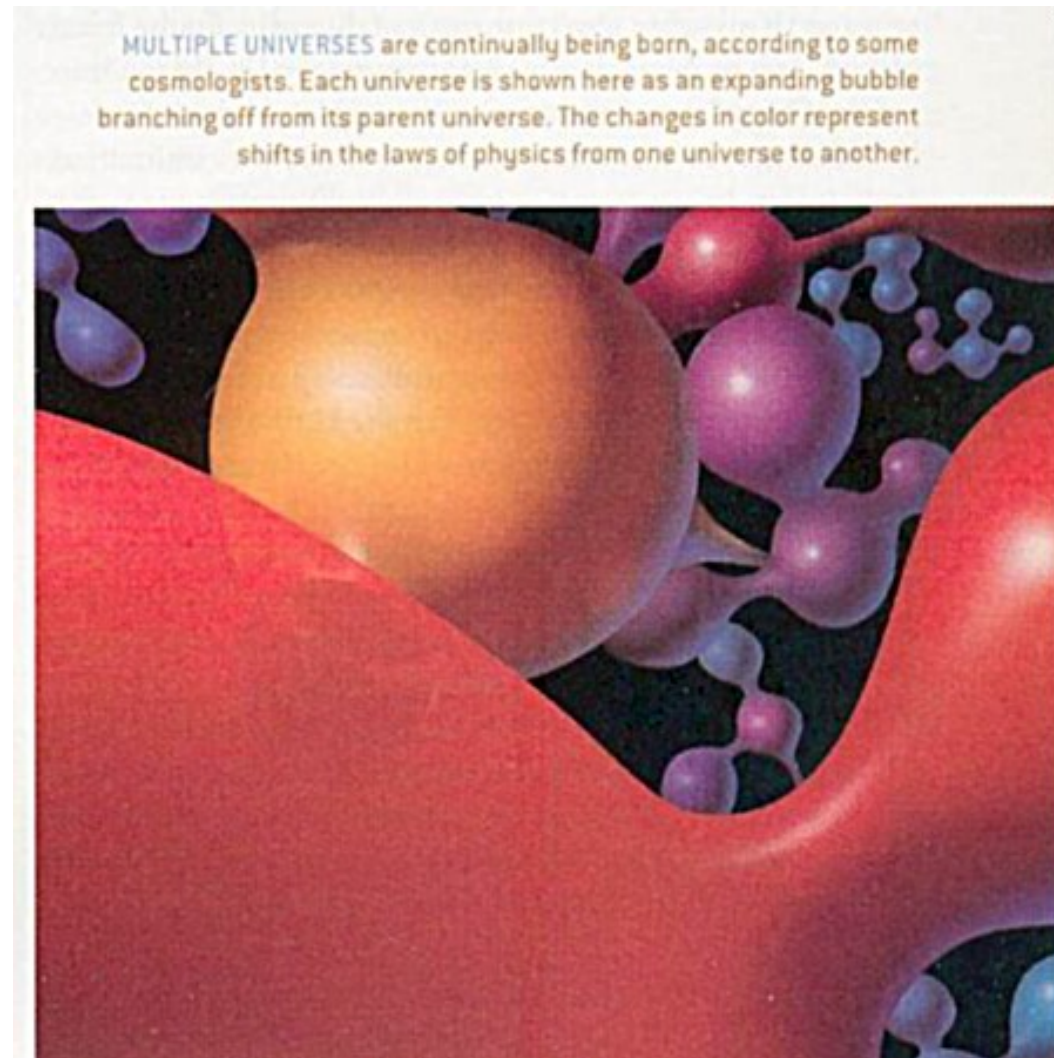
- em t_{Pl} : $T \sim 10^{31} \text{ K}$, $\rho \sim 10^{91} \text{ g cm}^{-3}$

em tempos inferiores a t_{Pl} seria necessário usar uma teoria quântica da gravitação:
caos quântico



A evolução do universo o Big Bang

- Big Bang: $t = 0$, $R(t) = 0$
- em tempos inferiores a t_{PI} seria necessário usar uma teoria quântica da gravitação
- caos quântico?
- ***multiversos?***



A evolução do universo a radiação

- no começo o universo era constituído por radiação (fótons) e partículas
- a radiação está em equilíbrio termodinâmico: espectro de corpo negro
- conforme o universo se expande ele se resfria:

$$T = T_0 (R_0/R) = T_0 (1 + z)$$

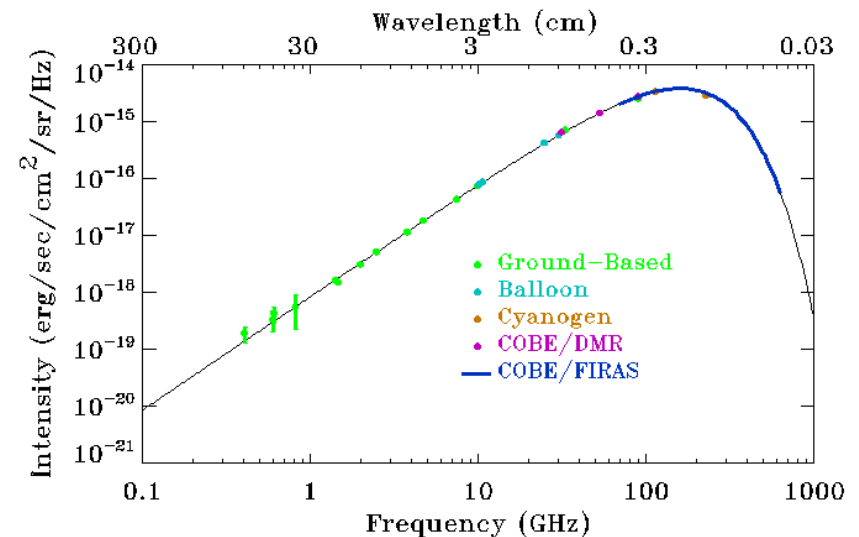
- essa radiação é observada hoje em microondas:

* espectro de corpo negro com

$$T_0 = 2.728 \pm 0.002 \text{ K}$$

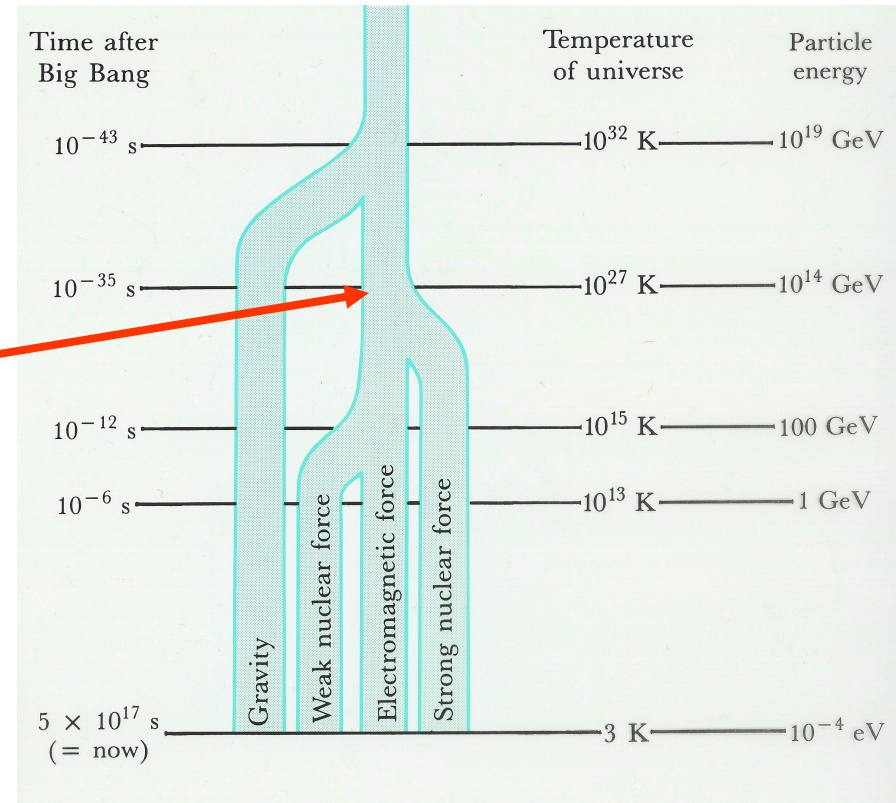
$$* n \simeq 400 \text{ fotons cm}^{-3}$$

ela era muito quente no começo do universo e se resfriou com a expansão



A evolução do universo a inflação

- imagina-se que logo após o Big Bang o universo passou por um breve fase de expansão exponencial: a inflação
- esse modelo surge com a aplicação de idéias das Teorias de Grande Unificação (GUT) à cosmologia
- em $t \sim 10^{-35}$ s o universo passa por uma transição de fase e sua densidade de matéria e energia é dominada pela densidade do vácuo ρ_v (análoga à constante cosmológica) de um certo campo físico
- transição de fase: quebra de simetria da “grande unificação” (interações fortes + eletrofracas)



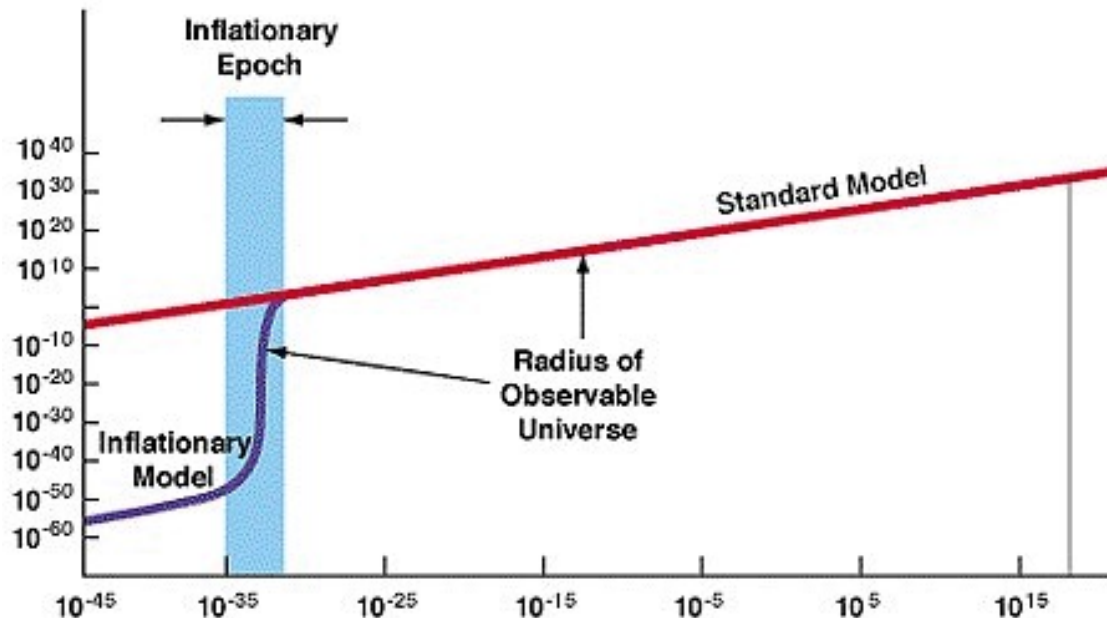
A evolução do universo a inflação

- enquanto o universo é dominado pela densidade do vácuo ele sofre uma expansão muito forte:

$$R \propto \exp(H_v t)$$

$$H_v = (8\pi G\rho_v/3)^{1/2}$$

- R cresce pelo menos 10^{27} vezes em um intervalo de tempo muito curto: inflação do universo



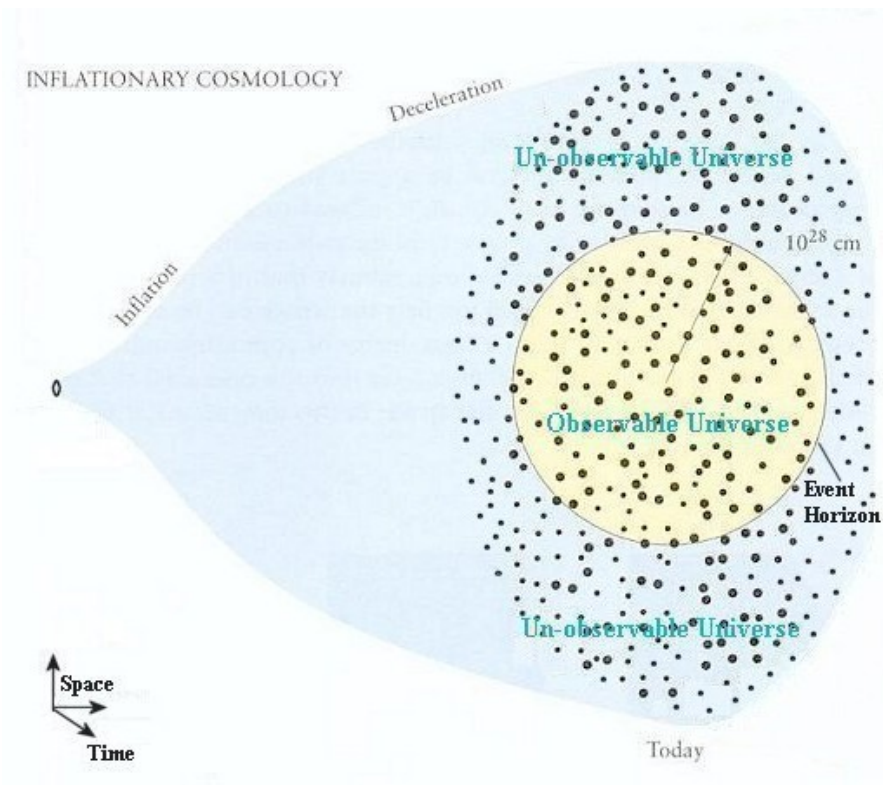
A evolução do universo a inflação

- motivação do modelo: resolve alguns problemas do modelo padrão

exemplo:

- *problema do horizonte*: porquê a temperatura da RCF é a mesma em todas as direções (com grande precisão), mesmo em regiões que não tiveram contacto causal entre si?

porque o universo observável hoje estava dentro do horizonte (isto é, suas partes tinham contacto causal) antes da inflação!

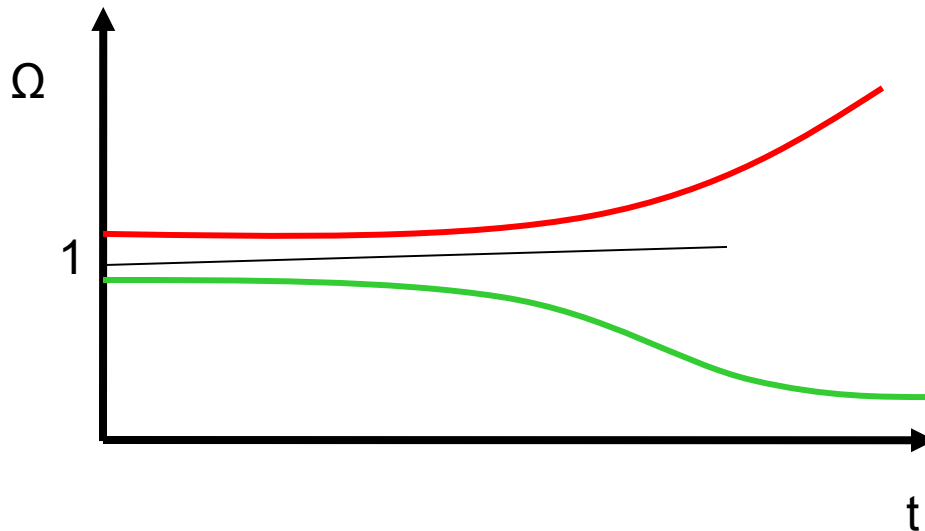


A evolução do universo a inflação

- motivação do modelo: resolve alguns problemas do modelo padrão

exemplo:

- *problema da curvatura*: para se ter Ω_T próximo de 1 hoje é necessário condições iniciais muito especiais, a menos que $\Omega_T = 1$



$$\Omega(t) = 1 \pm \frac{t_{pl}}{t_0} = 1 \pm 10^{-60}$$

- os modelos inflacionários implicam que o universo é plano: $\Omega_m + \Omega_v = 1$

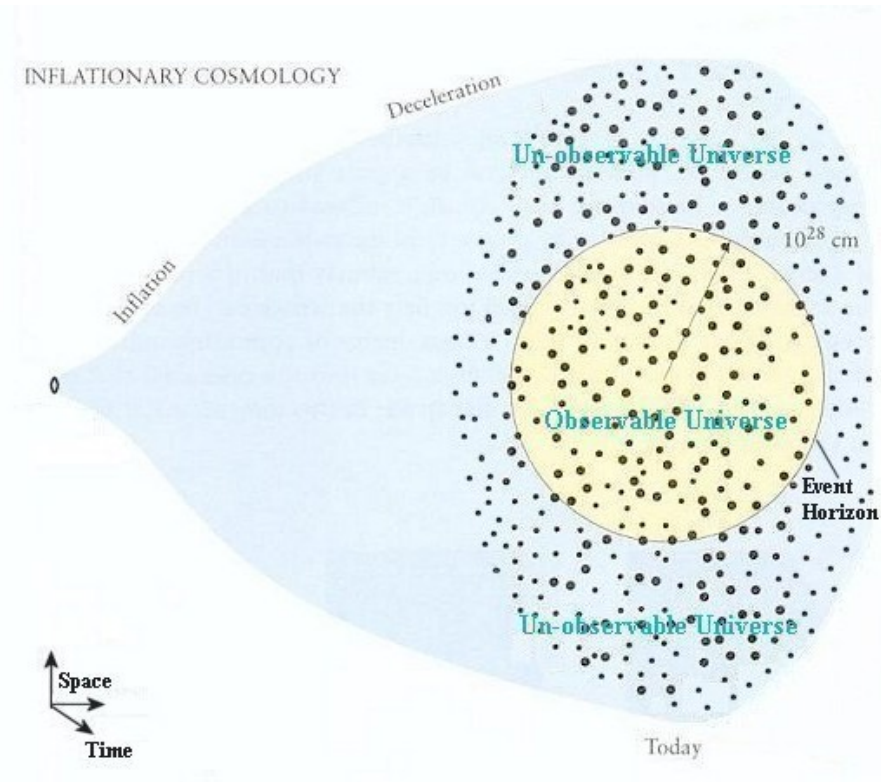
A evolução do universo a inflação

- motivação do modelo: resolve alguns problemas do modelo padrão

exemplo:

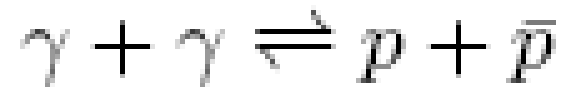
- *origem das flutuações primordiais*: os corpos celestes evoluem por ação da gravitação a partir de pequenas flutuações de densidade. Qual a origem dessas flutuações?

eram flutuações quânticas que foram tremendamente amplificadas pela inflação!



A evolução do universo a origem da matéria

- formada a partir da radiação por “interconversão de partículas”:



(produção de pares de partícula-antipartícula a partir do campo de radiação)

- conservação de energia: $kT \geq 2m_p c^2$

kT : energia média dos ftons

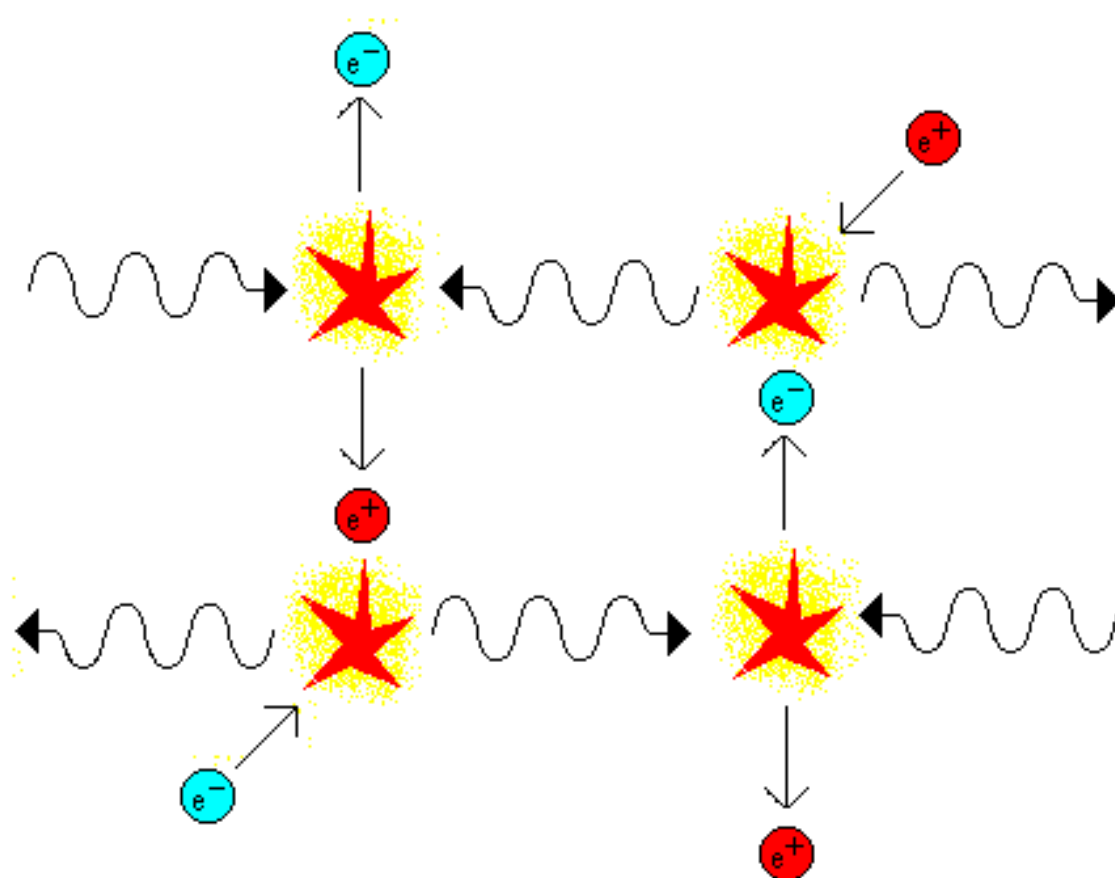
m_p : massa da partícula formada

Exemplos:

- pares proton-antiproton: podem ser formados até $t \sim 10^{-6} \text{ s}$
- pares eletron-positron: podem ser formados até $t \sim 2 \text{ s}$

Particle Equilibrium

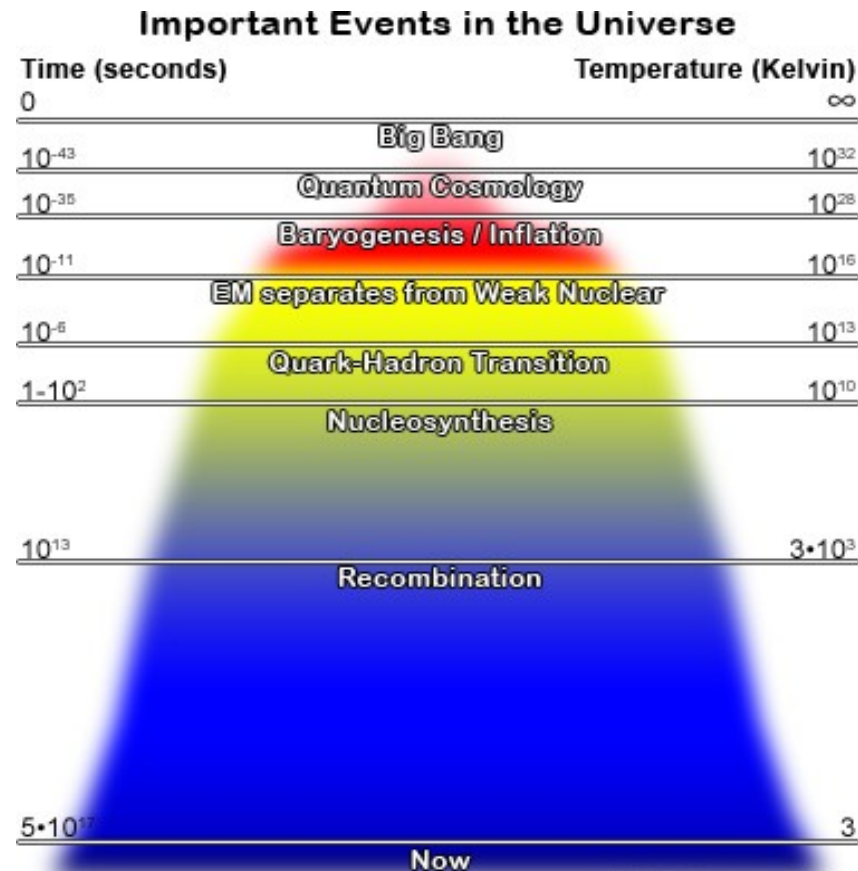
a state of particle equilibrium exists when the number of particle creations exactly matches the number of annihilations. Usually this is because there is no time for matter to decay or combine into new forms before a collision with an anti-particle

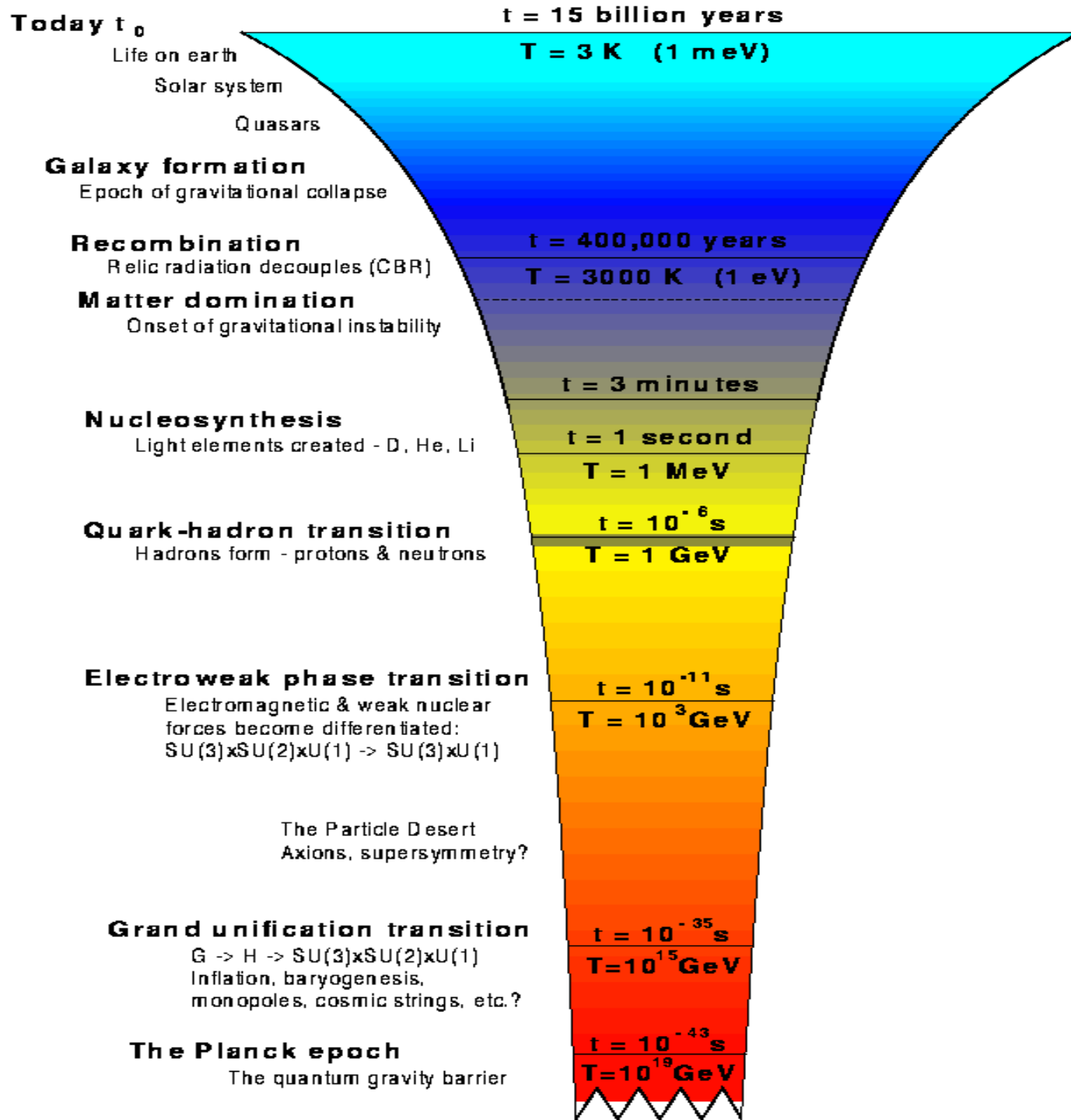


Notice that an equilibrium process keeps the number of matter and anti-matter particles equal.

A evolução do universo a origem da matéria

durante a era radiativa a temperatura varia rapidamente e leva a uma sucessão de processos físicos, associados à produção de vários tipos de partículas





A evolução do universo

a nucleosíntese primordial

- no começo do universo não podem existir núcleos atômicos estáveis: T é muito alto
- os núcleos se formam por colisão de partículas, mas são imediatamente desintegrados
- quando a temperatura cai abaixo de um certo limiar ocorre a nucleosíntese
- *nucleosíntese primordial:*
a nucleosíntese e a radiação competem entre si: os fótons muito energéticos podem quebrar o núcleo
 - pouca radiação leva a muita nucleosíntese
 - muita radiação leva a pouca nucleosíntese
- as observações da RCF e da abundância dos elementos leves permite determinar o estado do universo primitivo

A evolução do universo a nucleosíntese primordial

- quando $T < 10^{10}$ K ($t \sim 3$ min) protons colidem formando núcleos de He (processo análogo ao que ocorre no centro do Sol)

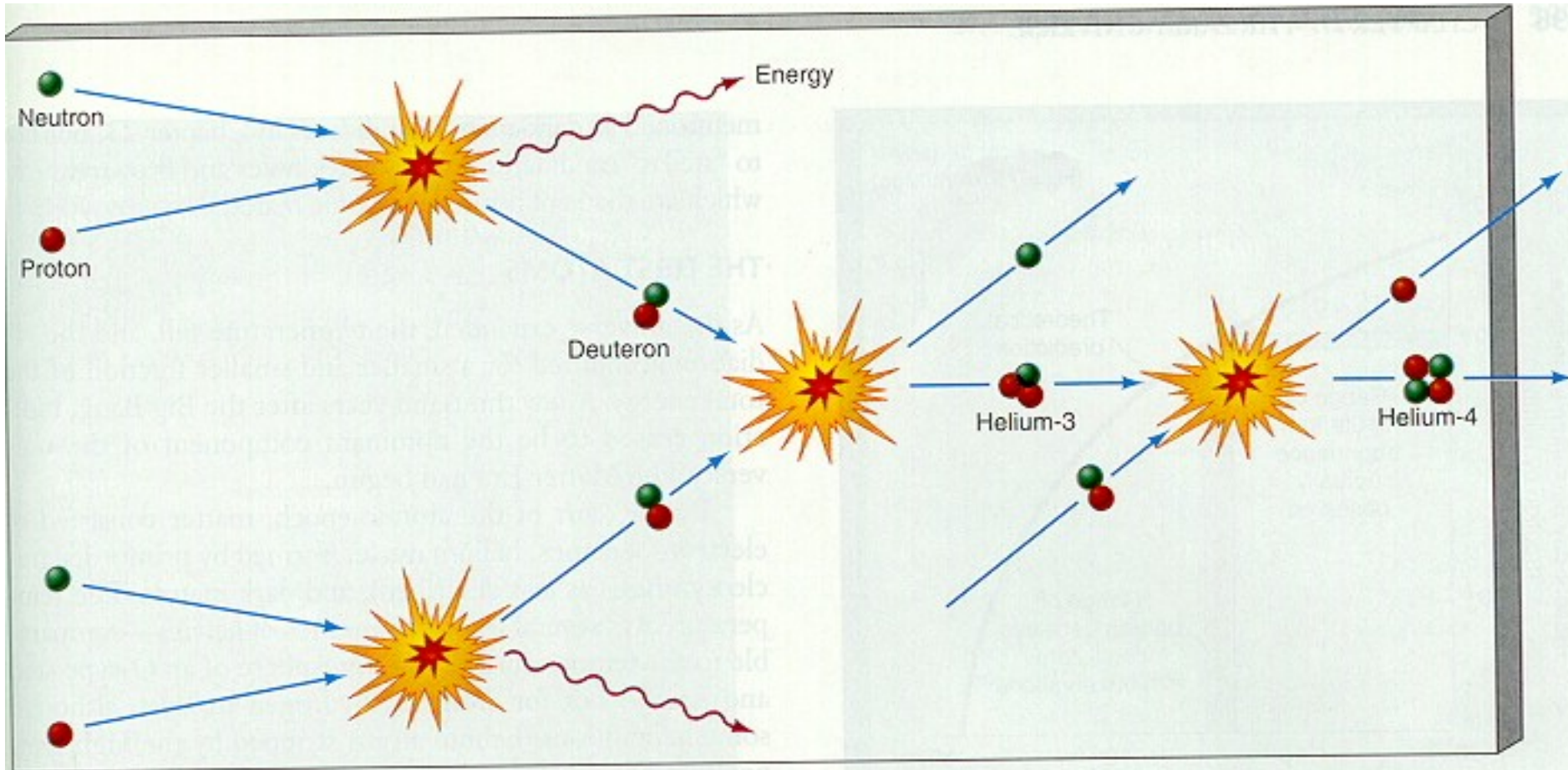
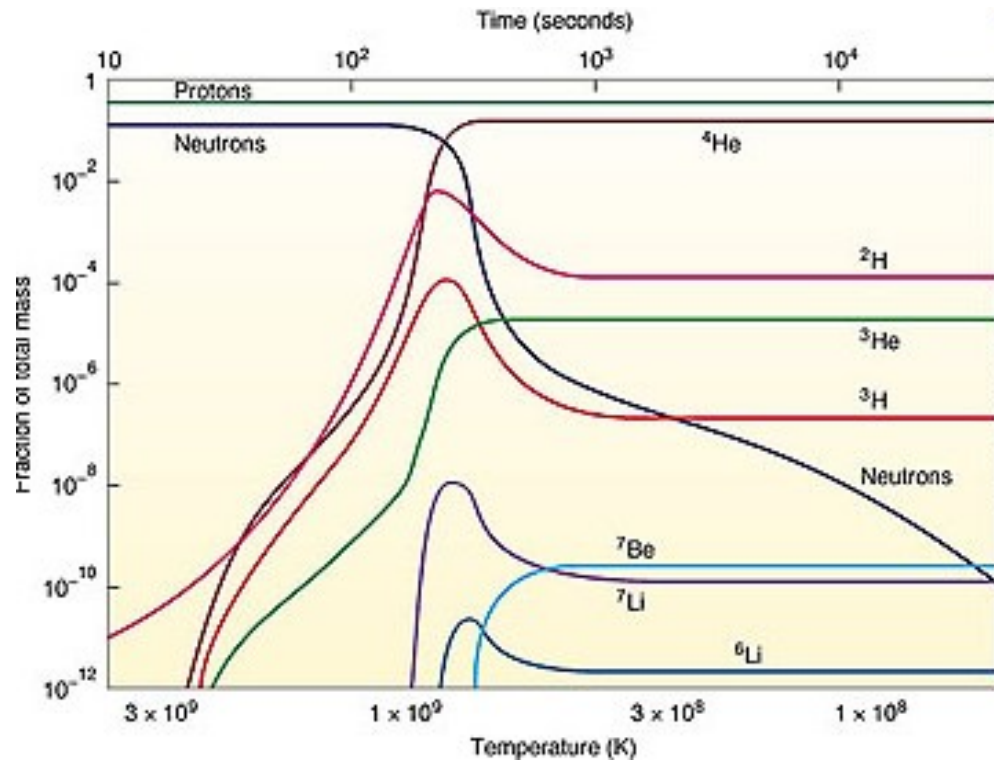


Figure 27.5 Some of the reaction sequences that led to the formation of helium in the early universe. Compare this figure with Figure 16.28, which depicts the proton-proton chain in the Sun.

A evolução do universo a nucleosíntese primordial

- a teoria prevê que ~25% da massa de matéria é convertida em He
- isso é muito próximo do que se observa (entre 25 e 30%): a idéia é que 25% foi formado no Big Bang e as estrelas contribuíram com o resto
- formam-se também pequenas quantidades de D e Li: os núcleos de elementos mais pesados são formados muito mais tarde, nas estrelas



A evolução do universo a nucleosíntese primordial

produção do He em estrelas:

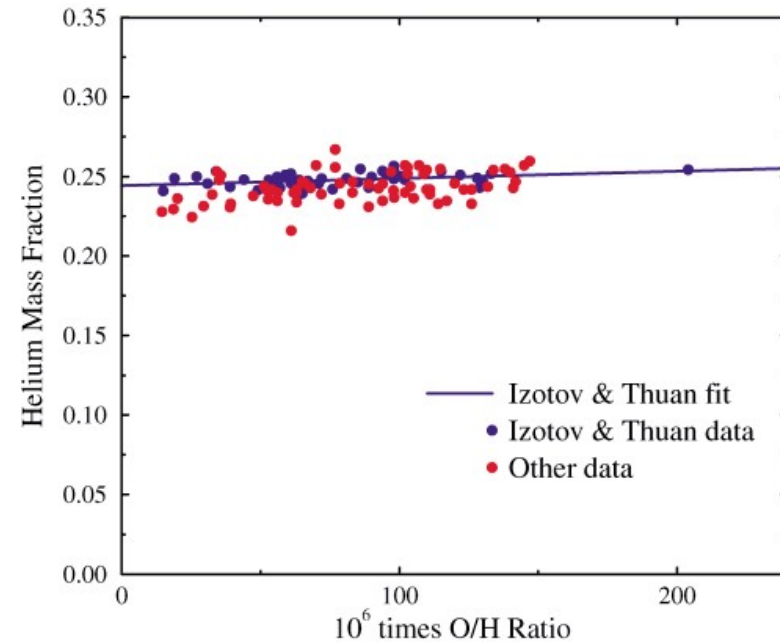
- a transformação de 4 átomos de H em He libera $\Delta E = 26 \text{ MeV} = 4.27 \times 10^{-5} \text{ erg}$
- a luminosidade do Sol é $L_{\odot} \approx 4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ e corresponde à criação de $L_{\odot} / \Delta E \approx 9.4 \times 10^{37}$ núcleons de He por segundo ou $\Delta M / \Delta t = L_{\odot} m_{\text{He}} / \Delta E \approx 6.3 \times 10^{14} \text{ g/s}$ de He

sendo a massa do Sol igual a $1 M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33} \text{ g}$, a fração da massa que é convertida em He é $(\Delta M / \Delta t) / M_{\odot} \approx 3.1 \times 10^{-19}$ por segundo

supondo que esta taxa é típica, a fração da massa de uma estrela convertida em He durante metade do tempo de Hubble será

$$(\Delta M / \Delta t) / M_{\odot} / (2 H_0) \approx 0.05$$

- logo, a nucleosíntese estelar só pode transformar uns 5% da massa em He, longe dos 25 – 30% observado!



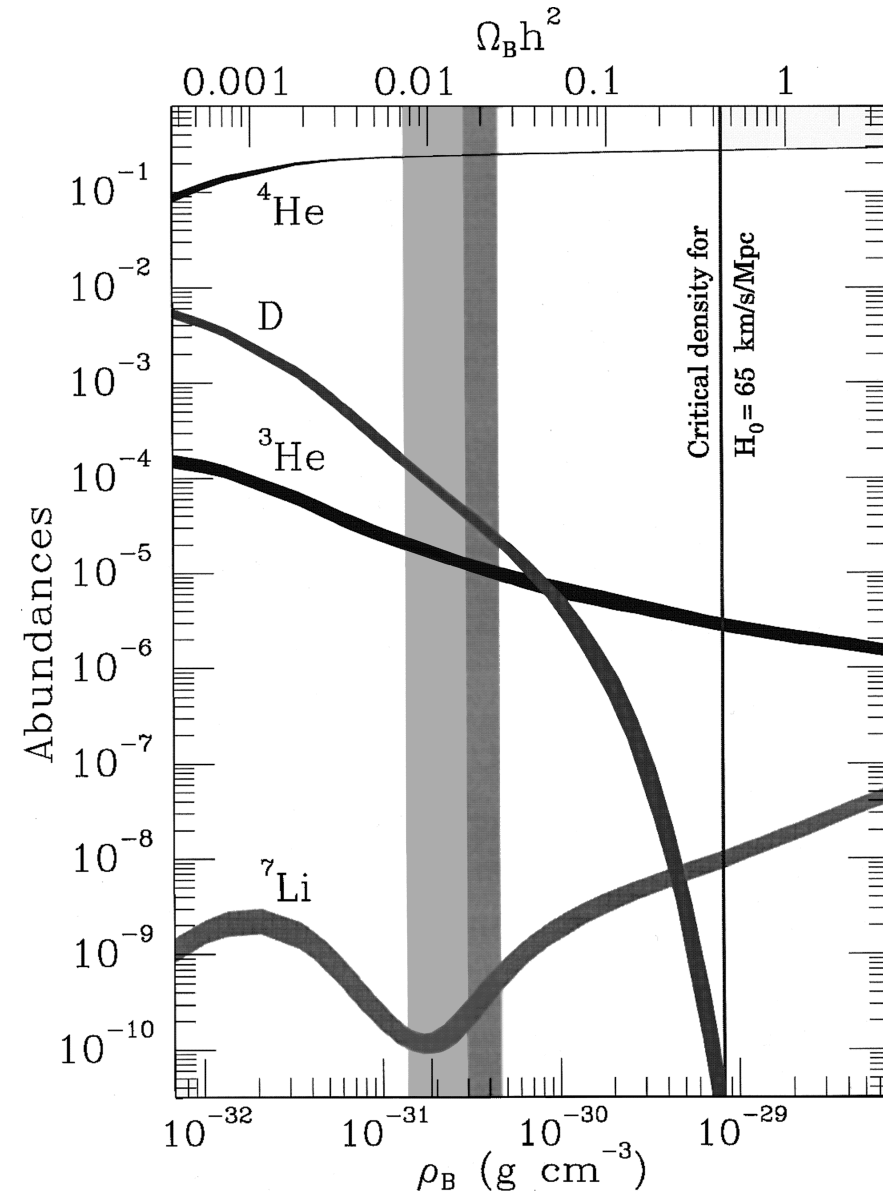
A evolução do universo a nucleosíntese primordial

- a abundância de He, Li e D depende da densidade de bárions (protons, neutrons...)
- assim, medindo-se a abundância dos elementos leves pode-se conhecer a abundância de bárions no universo
- medidas de abundância do deutério:

$$\Omega_b = (0.0221 \pm 0.0025)h^{-2}$$

e, para $h=0.7$, tem-se que:

$$\Omega_b = 0.045$$



A evolução do universo a nucleosíntese primordial

- a abundância do D leva a:

$$\Omega_b = (0.0221 \pm 0.0025)h^{-2}$$

e, para $h=0.7$, tem-se que:

$$\Omega_b = 0.045$$

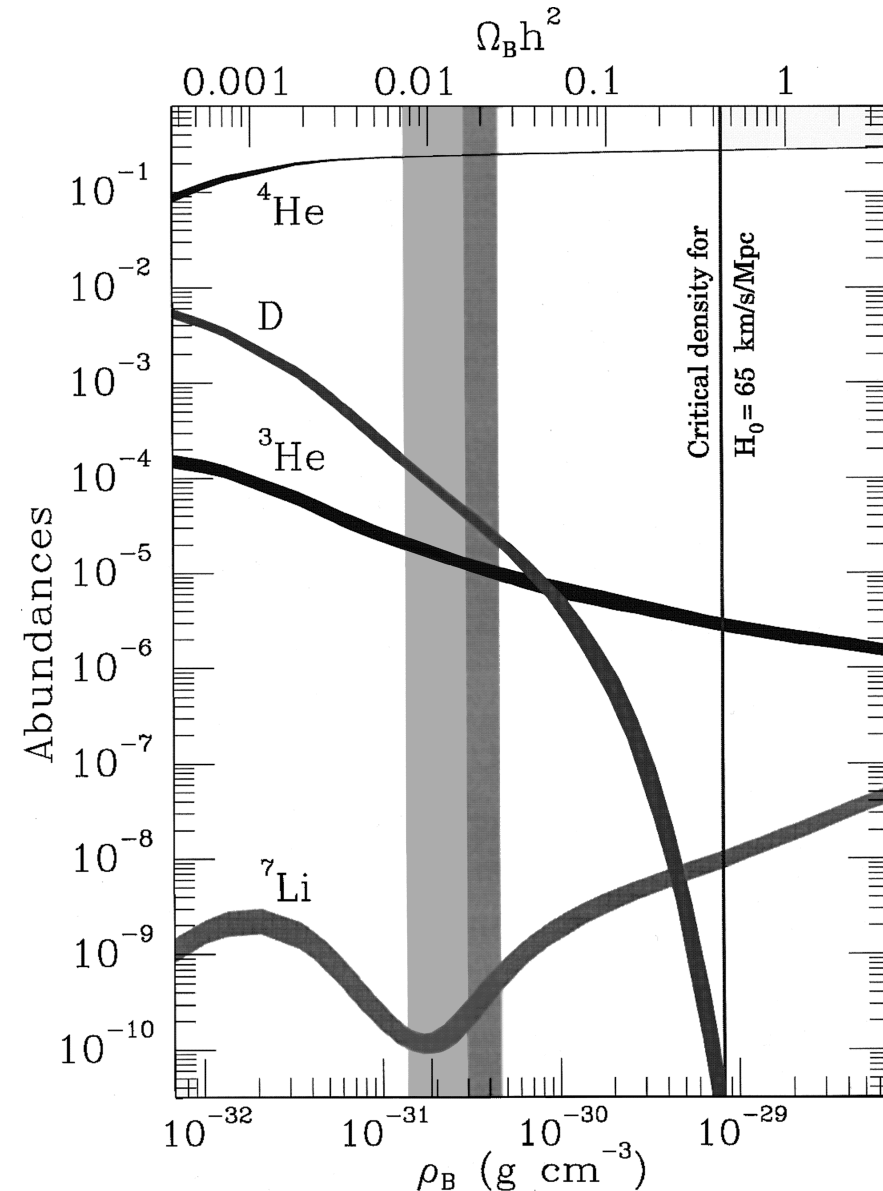
- vínculos colocados pelo WMAP e outras medidas da estrutura em grandes escalas:

$$\Omega_b = (0.02265 \pm 0.00059)h^{-2}$$

e, para $h=0.7$, tem-se que:

$$\Omega_b = 0.046$$

determinações completamente independentes!



A evolução do universo a nucleosíntese primordial

- note que:

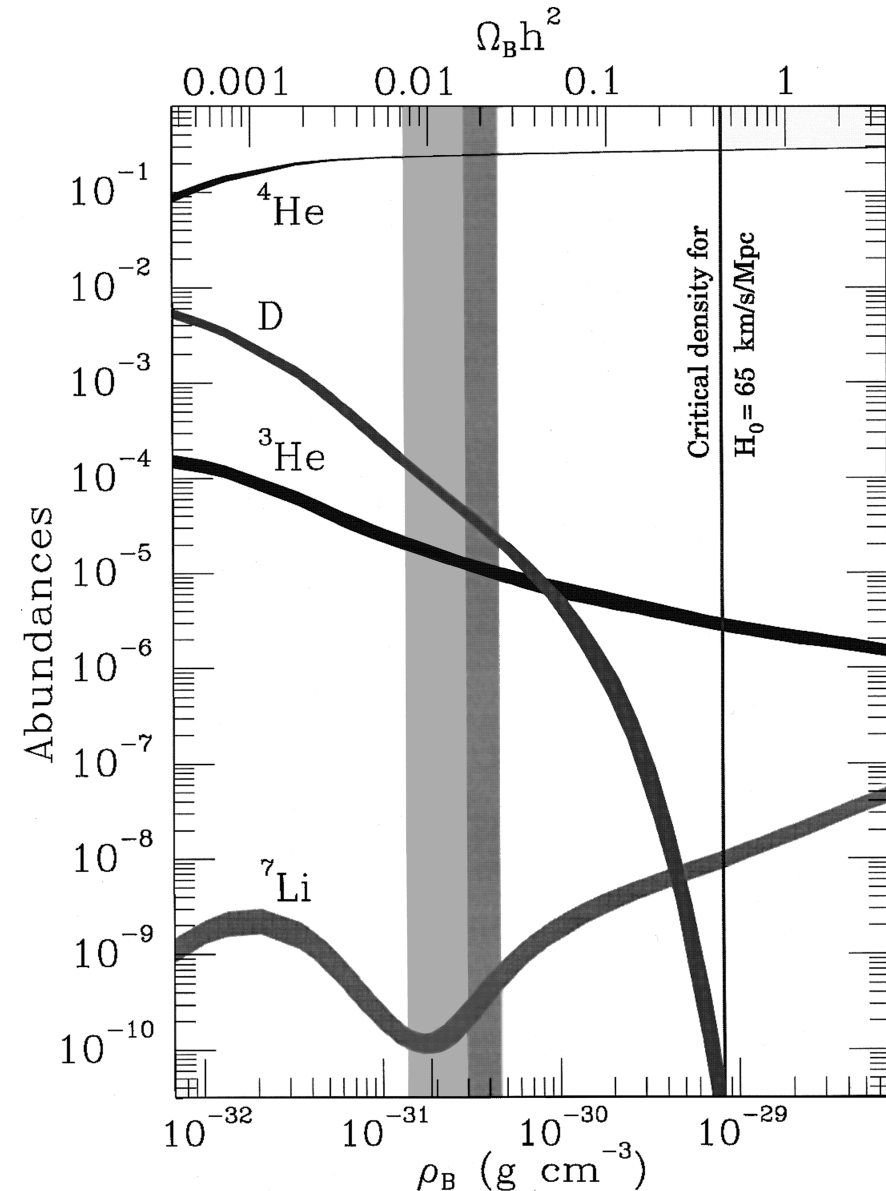
$$\Omega_b = 0.046$$

e

$$\Omega_m = 0.233$$

- esse resultado tem uma implicação muito importante para a natureza da matéria escura:

***a maior parte da matéria escura
não pode ser bariônica!***

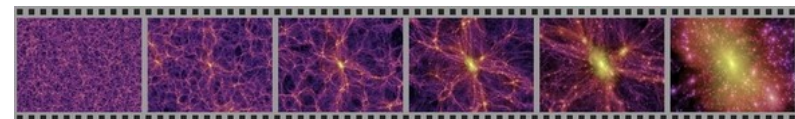
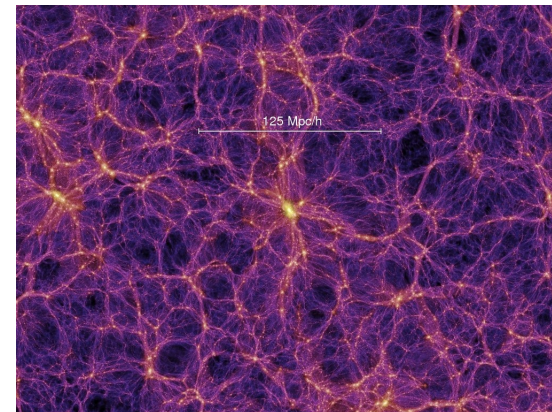


a matéria escura fria

- nucleosíntese primordial, flutuações de temperatura da RCF, formação de galáxias: a ME não pode ser toda bariônica
 $\Omega_b \sim 0.05$



- modelo padrão: a matéria escura é fria
- explica bem a estrutura em grande escala
- explica porque as galáxias podem se formar

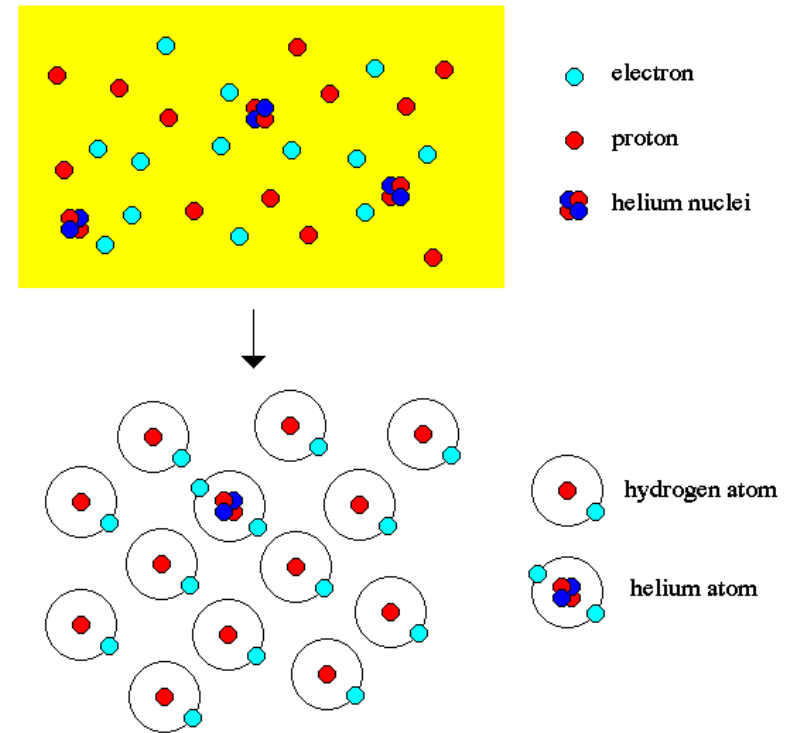


A evolução do universo a época da recombinação

- quando $T < 10^4$ K ($t \sim 400$ mil anos) a energia média dos fótons fica menor que o potencial de ionização do H: os prótons podem capturar elétrons e formar o átomo de H (reações de “recombinação”):
é a época da recombinação
- isso ocorre em $z \sim 1100$
- antes da recombinação a matéria estava ionizada e portanto era opaca aos fótons
- depois da recombinação o universo fica transparente aos fótons

Recombination

As the Universe expands and cools, protons and electrons combine to form hydrogen (the most abundant element). And helium nuclei combine with electrons to form helium atoms. This process is called recombination.

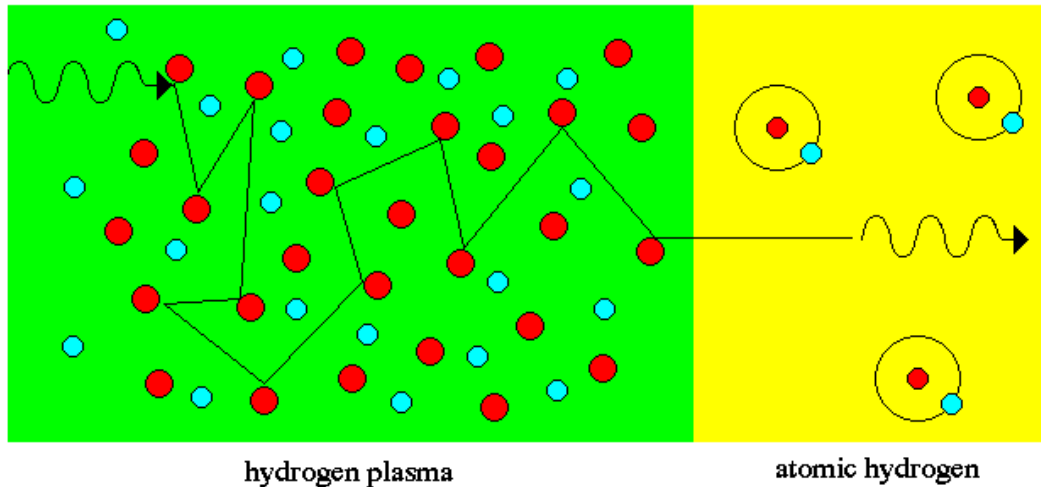


A evolução do universo a época da recombinação

- antes da recombinação a matéria estava ionizada e portanto era opaca aos fótons
- depois da recombinação o universo fica transparente aos fótons: por isso, $z \sim 1000$ é também denominada *época do último espalhamento*

Last Scattering Epoch

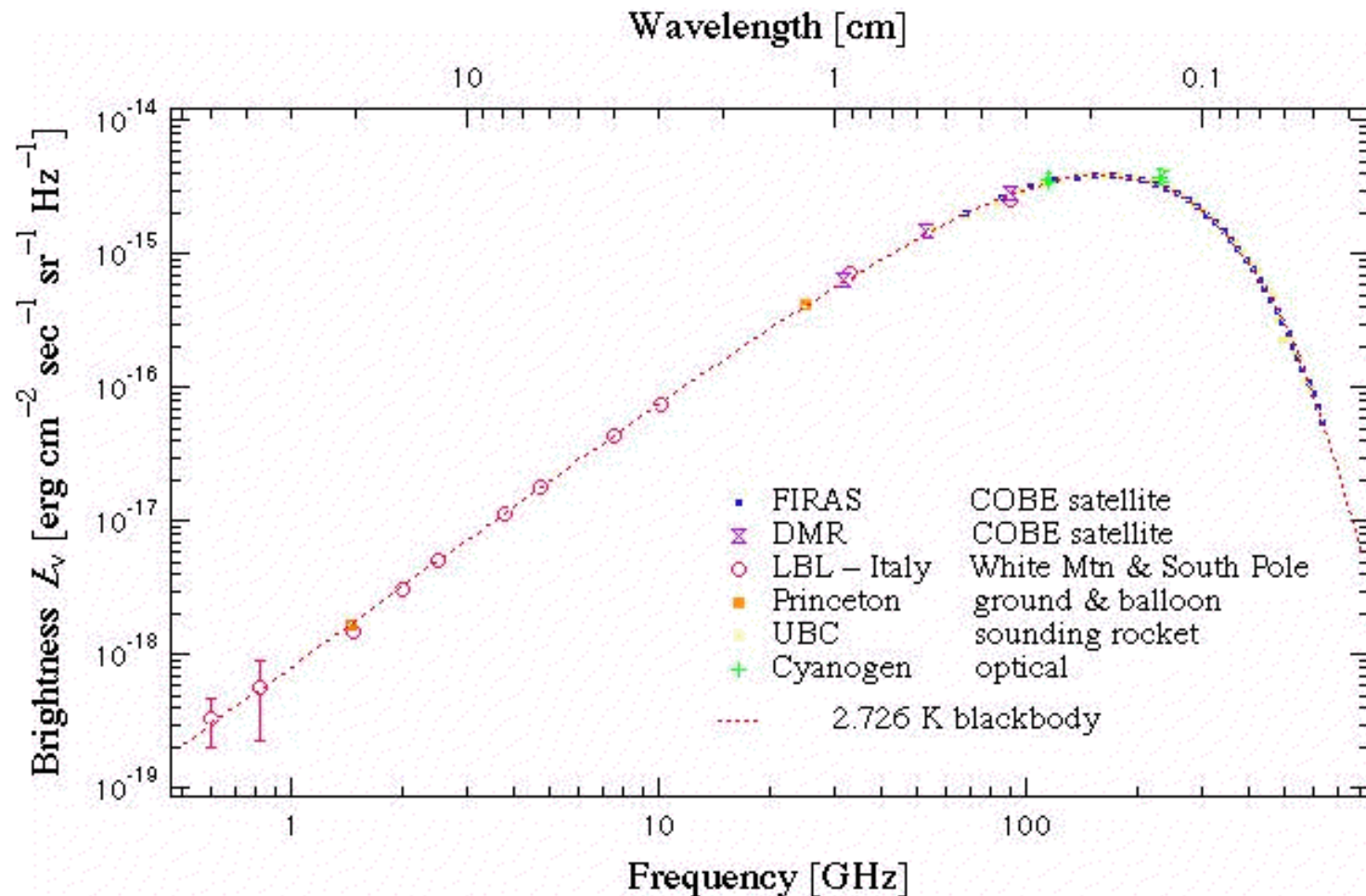
As the Universe cooled, the free electrons and protons could finally bond together to form hydrogen atoms. At the same time, the Universe went from a rich plasma to a gas of neutral hydrogen.



In a plasma, the mean free path of a photon is very short. In a gas of atomic hydrogen, the mean free path is very long, as long as the size of the Universe. Thus, the transition from the early plasma to atomic hydrogen is the epoch of last scattering, the point in time when the photons became free to travel without hindrance.

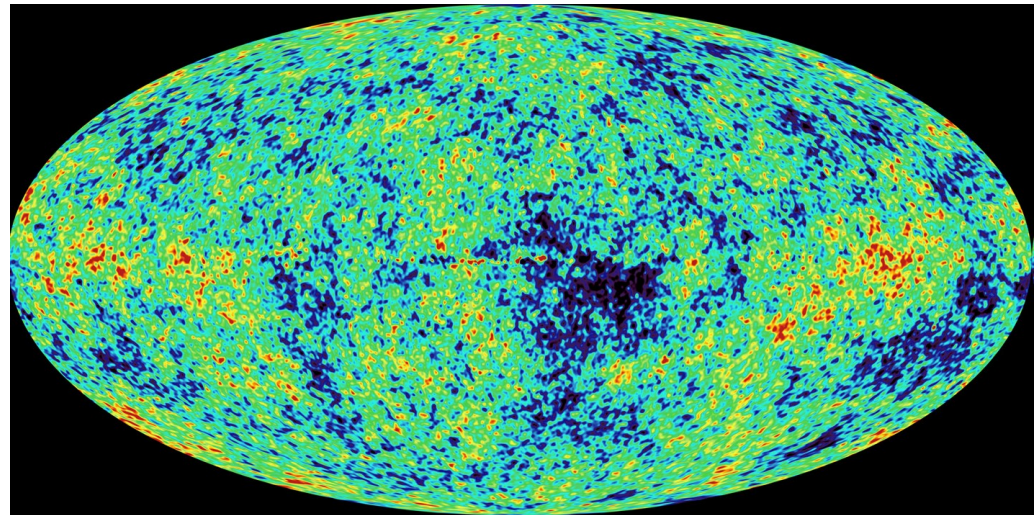
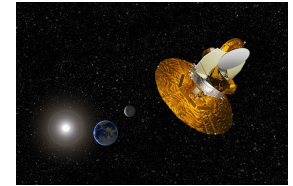
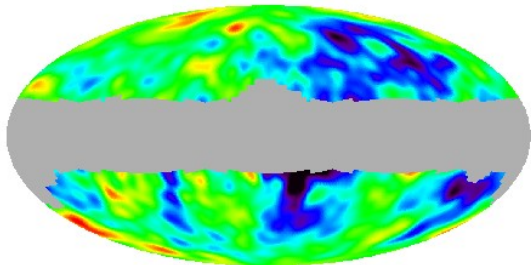
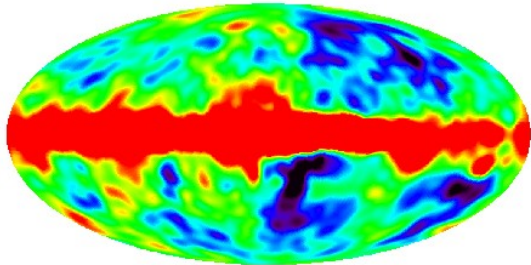
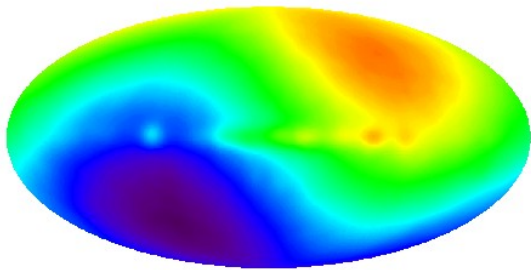
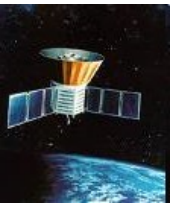
A evolução do universo a época da recombinação

- os fótons da radiação cósmica de fundo em microondas são justamente aqueles que estão viajando livremente desde a época da recombinação



a radiação cósmica de fundo

- a RCF apresenta um dipolo: o sol se move com $\sim 600 \text{ km s}^{-1}$ na direção $(l = 10h.5, b = -26^\circ)$

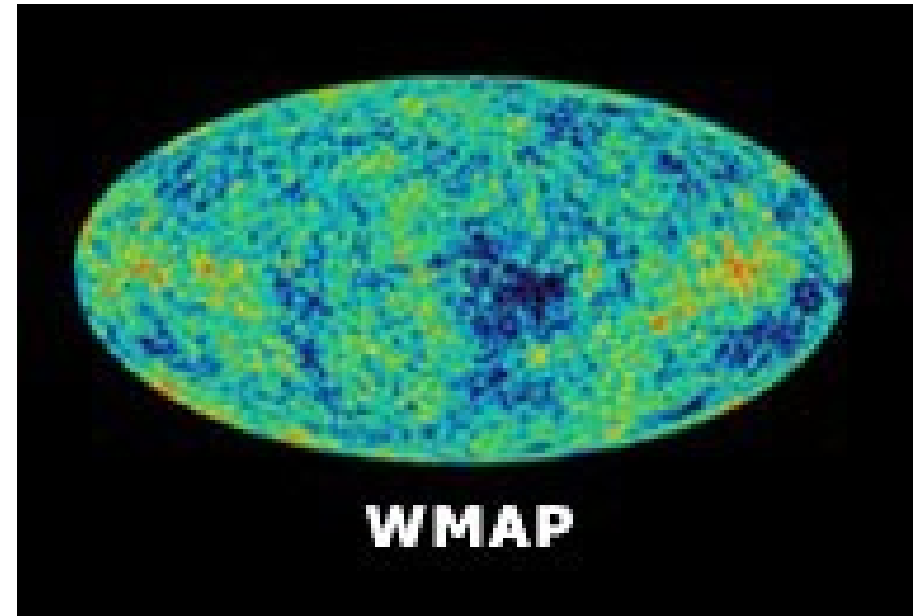
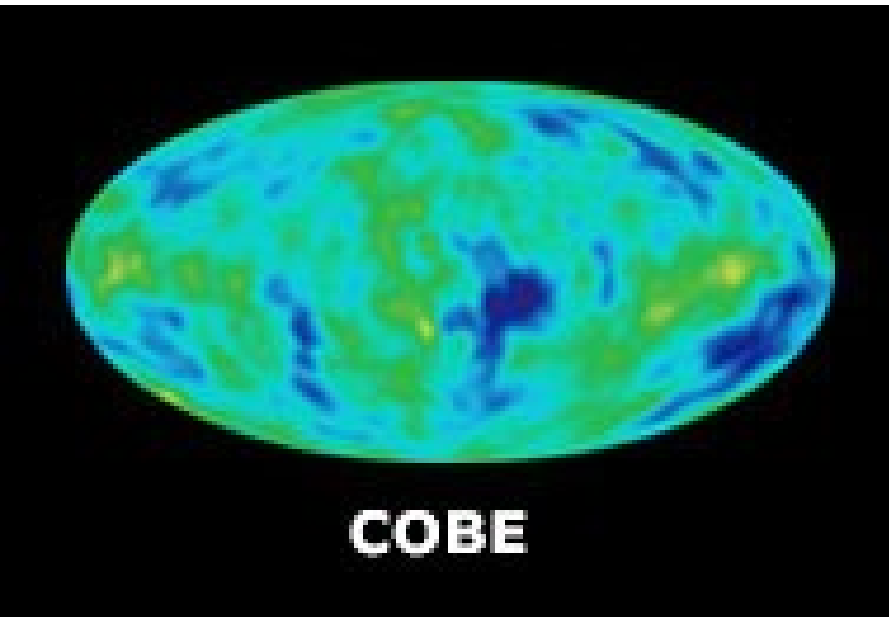


WMAP (2003): $\Delta T/T$

COBE (~1990): determinação de T

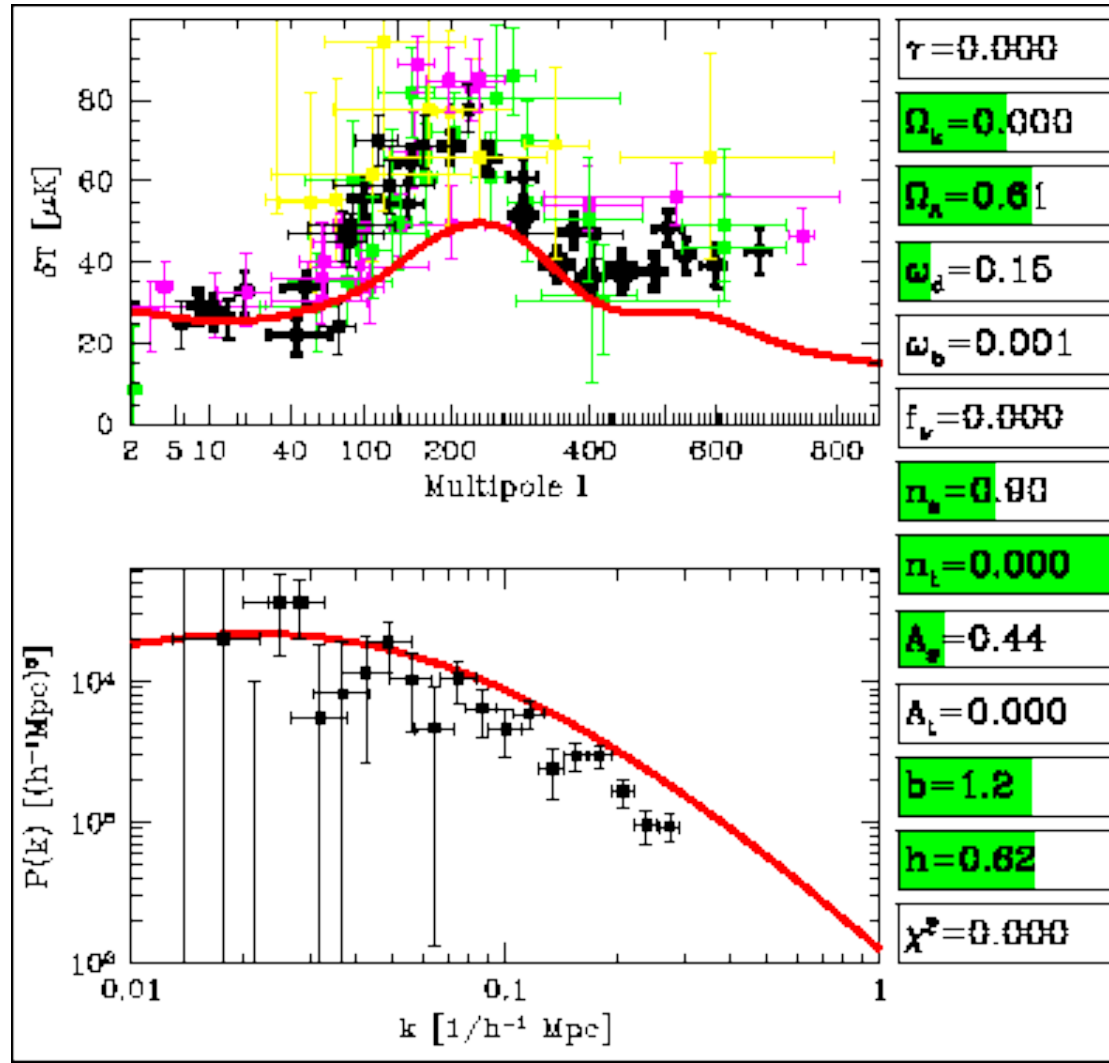
a radiação cósmica de fundo

- as medidas das flutuações de temperatura da RCF pelo WMAP permitem estimar os parâmetros cosmológicos com alta precisão



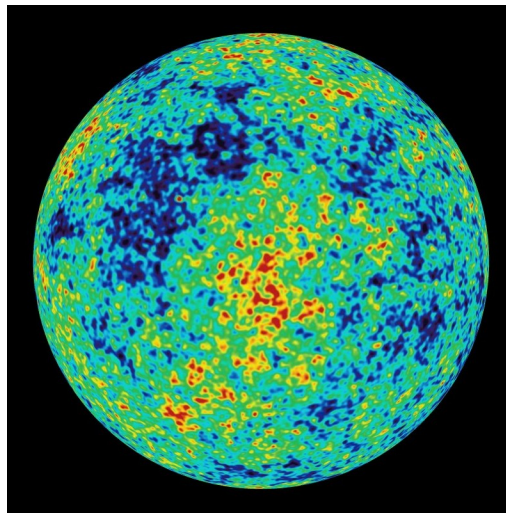
a radiação cósmica de fundo

- as medidas das flutuações de temperatura da RCF pelo WMAP permitem estimar os parâmetros cosmológicos com alta precisão



resultados do WMAP

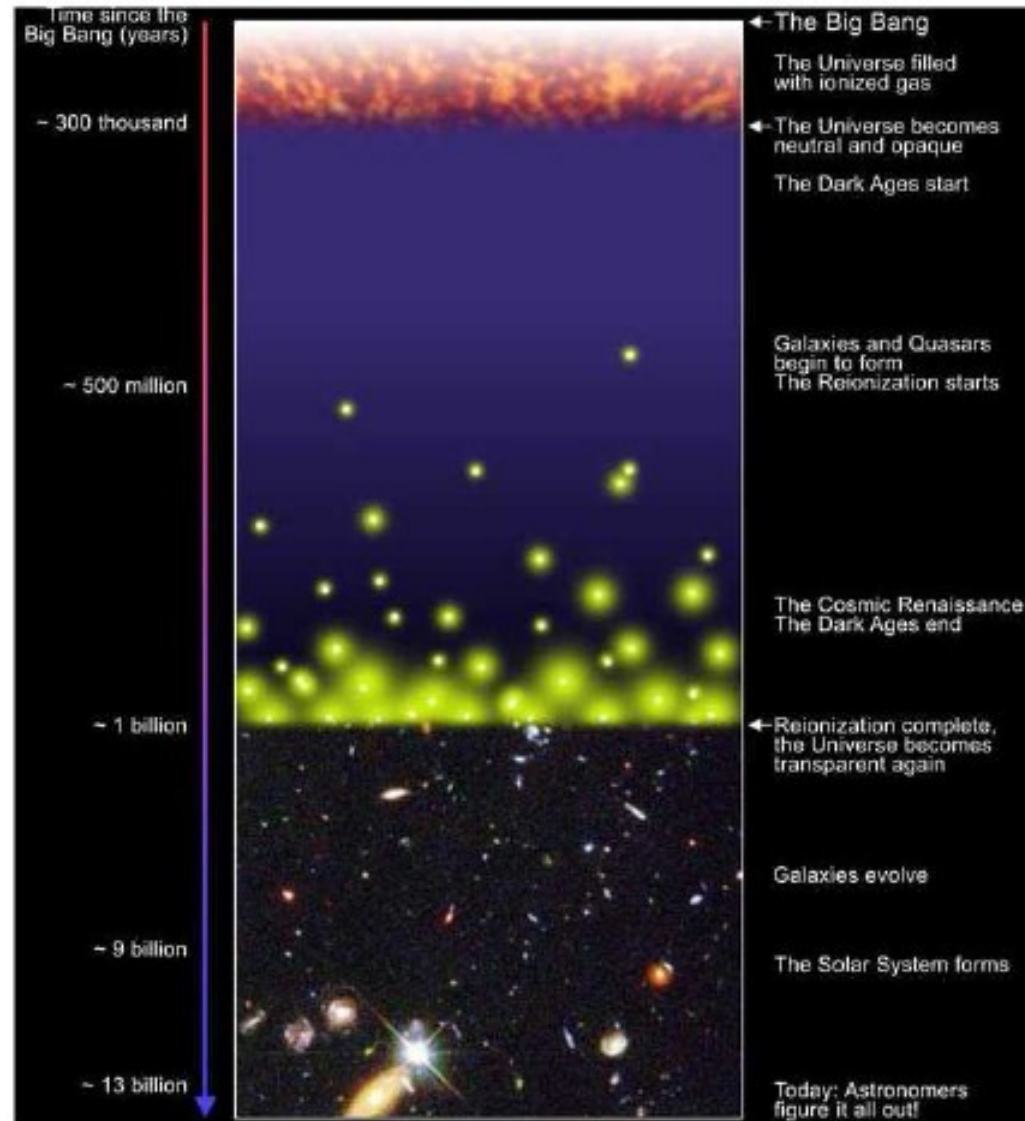
Number	Name	Meaning	Value
H_0	Hubble Constant	Present speed of universe's expansion	71^{+4}_{-3} km/sec/Mpc
Ω_0	Cosmological density parameter	Present density of mass-energy divided by the amount required to make space flat	1.02 ± 0.02
Ω_m	Matter density parameter	Present density of matter alone, same units	0.27 ± 0.04
Ω_b	Baryon density parameter	Present density of baryons alone, same units	0.044 ± 0.004
Ω_Λ	Dark-energy density parameter	Present density of dark energy alone, same units	0.73 ± 0.04
t_0	Time since Big Bang	Expansion age of universe	13.7 ± 0.2 billion years
t_{dec}	Age of universe at decoupling	Age of universe when CMBR was formed	379^{+8}_{-7} thousand years
z_{dec}	Redshift of microwave background	Amount universe has grown since CMBR was formed	$1,089 \pm 1$
t_i	Age of universe at reionization	Likely age of universe when first stars began to shine	180^{+220}_{-20} million years
z_i	Redshift of reionization	Likely redshift of radiation from first stars	20^{+10}_{-9}



cosmologia de precisão!

A evolução do universo a idade das trevas e a reionização

- após a recombinação ($z \sim 1000$) o universo fica praticamente neutro e entra no que se denomina a idade das trevas (*dark age*)
- a idade das trevas termina quando as primeiras estrelas começam a se formar ($z \sim 20 - 30$, ou $t \sim$ algumas centenas de milhões de anos) e a reionizar o universo
- por volta de $z \sim 6$ o universo está já praticamente totalmente reionizado



A evolução do universo a idade das trevas e a reionização

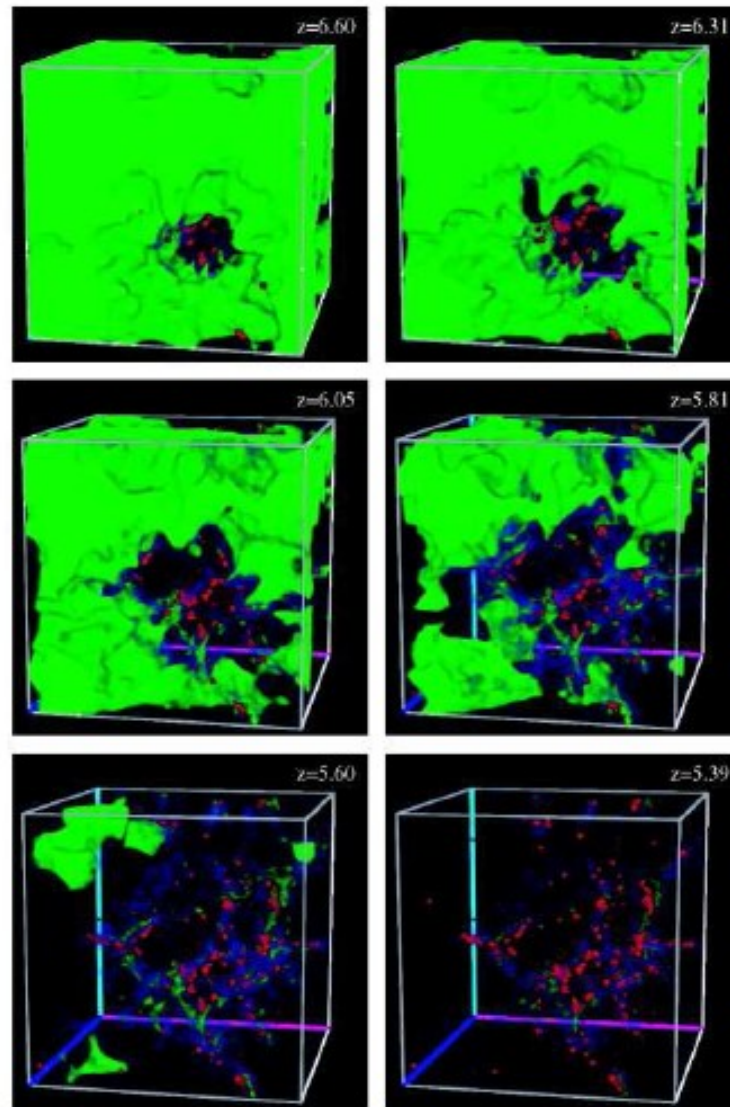
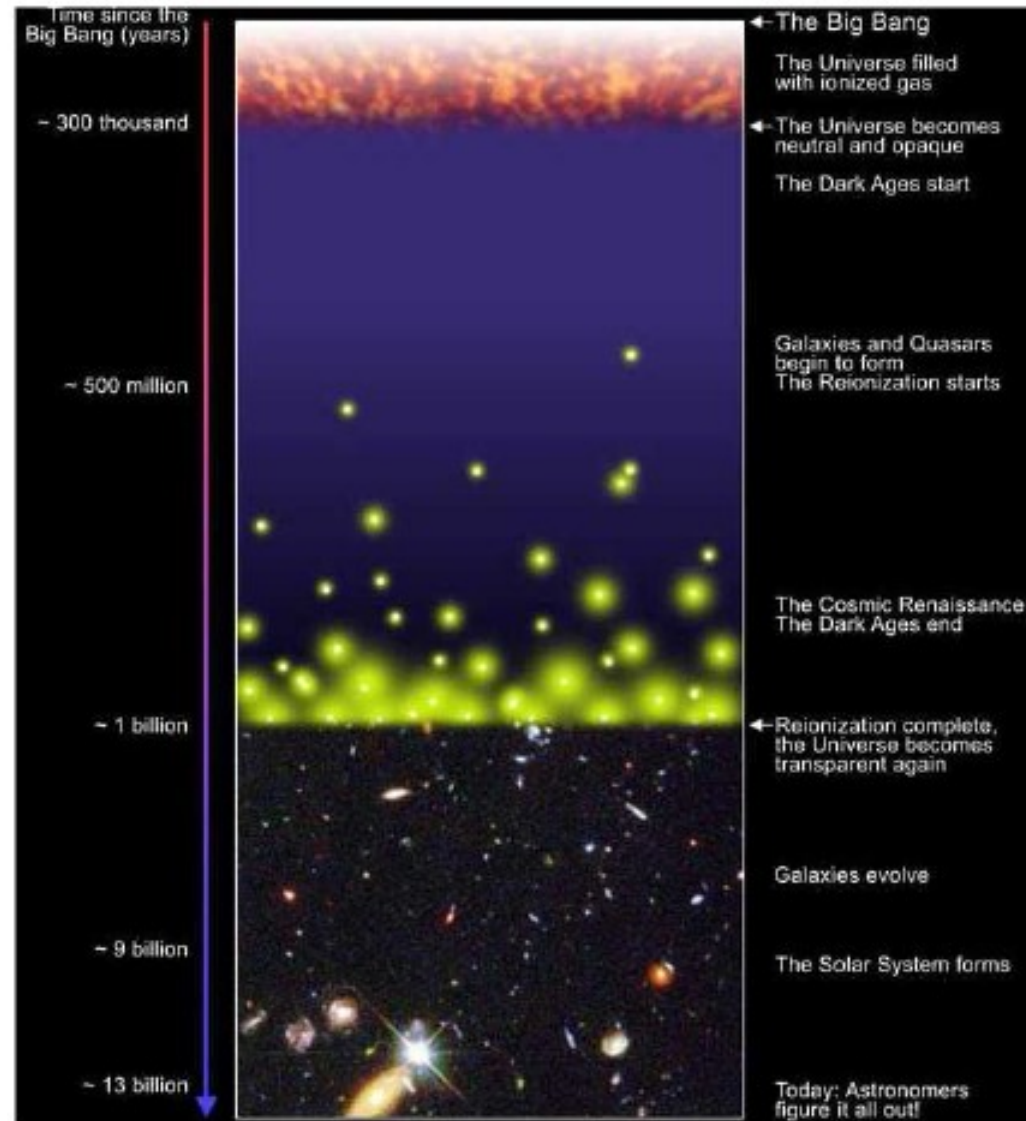


Figure 2: Simulação da reionização por Razoumov et al. (2002).

A evolução do universo

- por volta de $z \sim 6$ o universo está já praticamente totalmente reionizado
- com a reionização a idade das trevas termina e as galáxias evoluem...

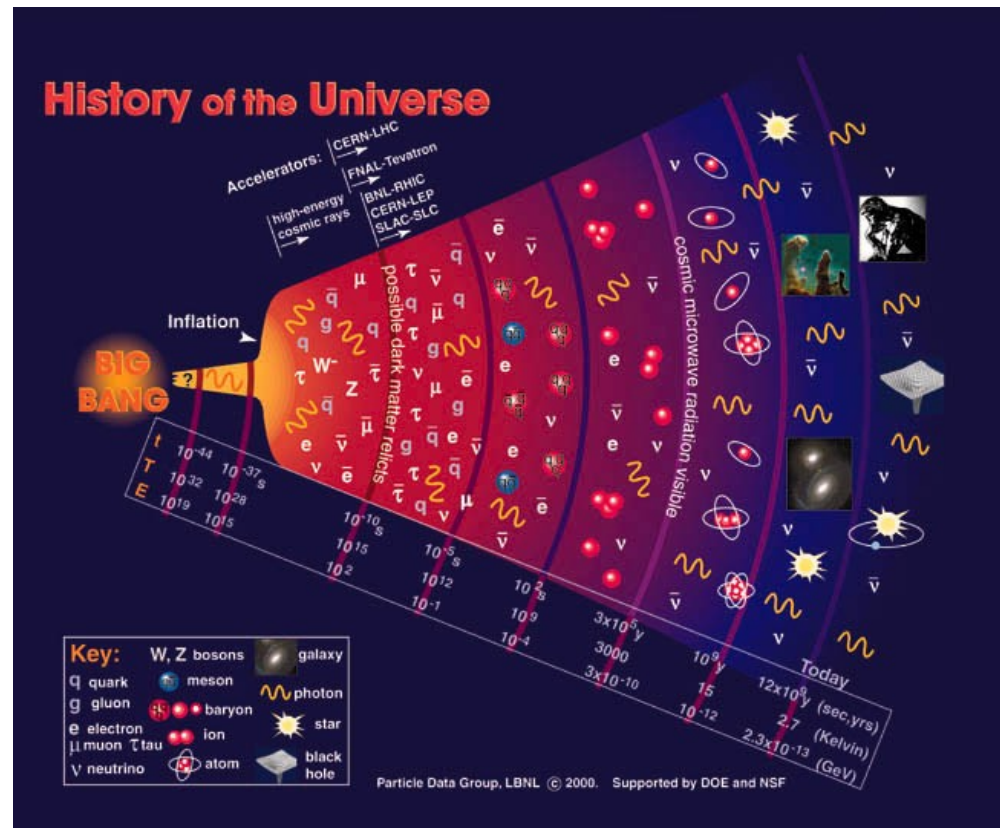


ME e formação de galáxias

formação de galáxias:

idéia básica: logo após o Big-Bang o universo era bastante homogêneo, com pequenas irregularidades (*flutuações primordiais*); estas irregularidades crescem sob a ação da gravidade, vindo a formar galáxias, estrelas e outros corpos celestes

origem das flutuações primordiais: flutuações quânticas produzidas durante a inflação



ME e formação de galáxias

formação de galáxias:

galáxias se formam pelo crescimento, devido à atração gravitacional, de flutuações de densidade

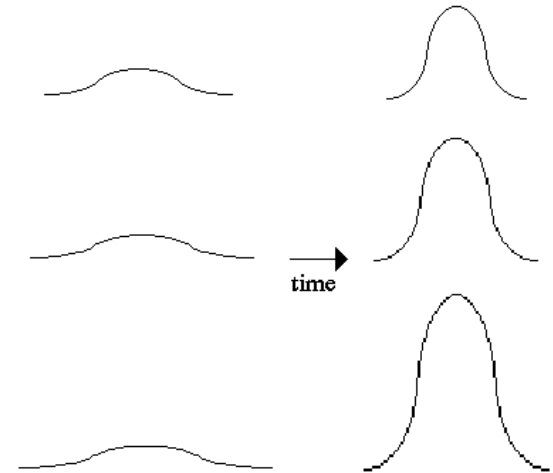
na era radiativa as flutuações de bárions não podem crescer, porque estão acoplados ao campo de radiação:

-a matéria bariônica está ionizada e a interação eletromagnética entre partículas carregadas se dá por troca de fótons

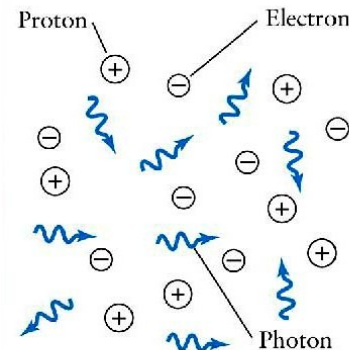
-em um universo dominado pelos fótons, os bárions ionizados “seguem” os fótons

Fluctuation Growth

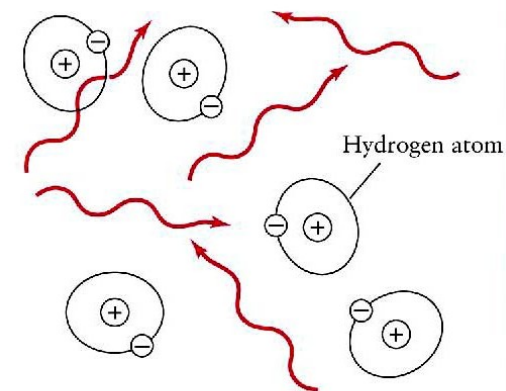
small scale, low mass density enhancements disperse over time due to pressure effects



large mass density enhancements grow due to the attractive force of gravity which overcomes outward pressure effects



a Before recombination



b After recombination

ME e formação de galáxias

formação de galáxias:

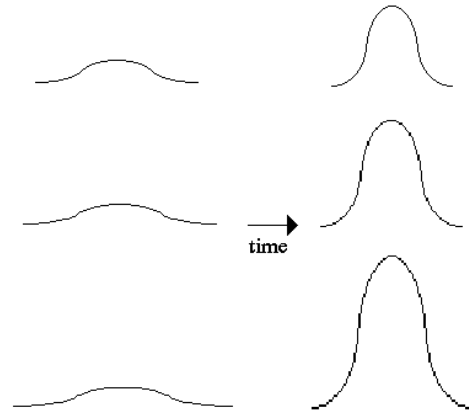
idéia básica: logo após o Big-Bang o universo era bastante homogêneo, com pequenas irregularidades;

estas irregularidades crescem sob a ação da gravidade

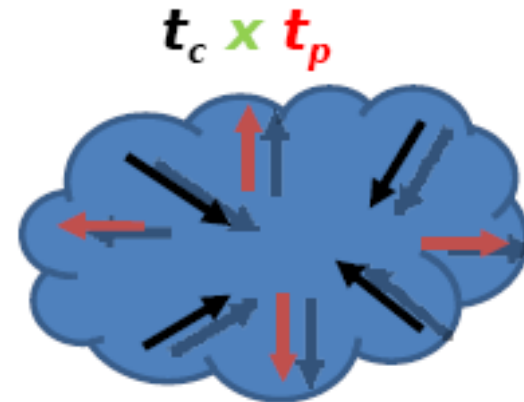
teoria de Jeans em um universo em expansão:
competição entre o tempo de colapso e o tempo de restauração pela pressão

Fluctuation Growth

small scale, low mass density enhancements disperse over time due to pressure effects



large mass density enhancements grow due to the attractive force of gravity which overcomes outward pressure effects

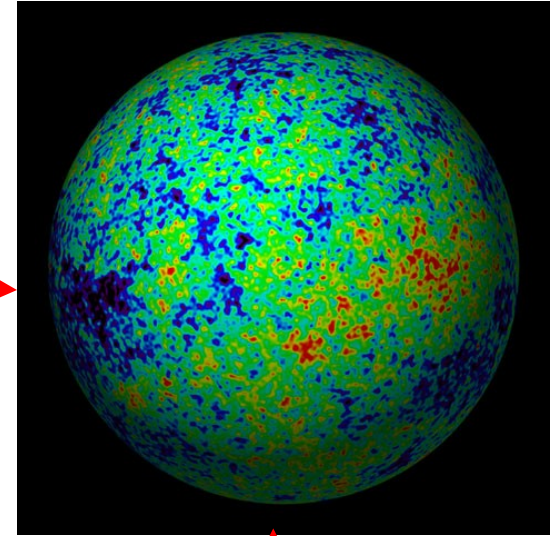


ME e formação de galáxias

formação de galáxias:

flutuações de bárions só
podem crescer depois da
época da recombinação
($z \sim 1000$, $t \sim 400$ mil
anos)

na recombinação as
flutuações de densidade
dos bárions são da mesma
ordem de grandeza que as
flutuações de temperatura



$$(\Delta\rho/\rho)_{\text{hoje}} \approx (\Delta\rho/\rho)_{\text{rec}} (1+z_{\text{rec}})$$

$\approx 10^{-5}$

$10^{-2}!!$

1000

**problema: num universo puramente bariônico
não dá tempo de formar galáxias!!**

ME e formação de galáxias

formação de galáxias:

problema: num universo puramente bariônico não dá tempo de formar galáxias!!

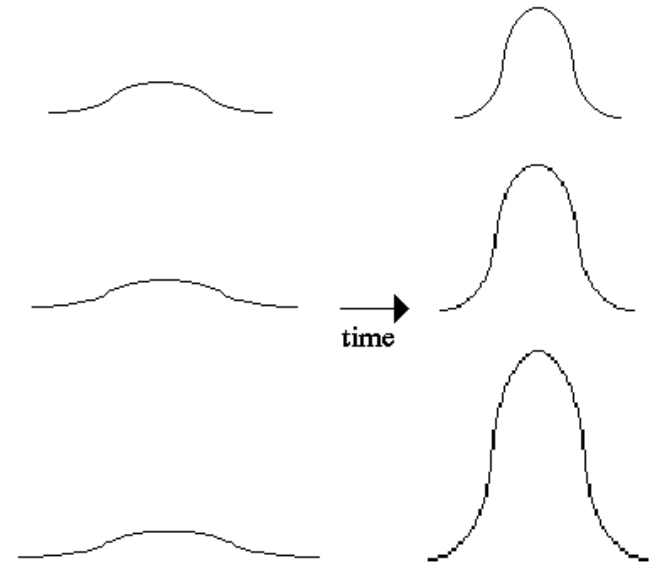
na era radiativa as flutuações de bárions não podem crescer (estão acoplados ao campo de radiação), mas as de ME podem e evoluem formando “halos”

após a recombinação (começo da era da matéria) os barions “caem” no poço de potencial dos halos, formando as galáxias

a ME torna a formação de galáxias possível!

Fluctuation Growth

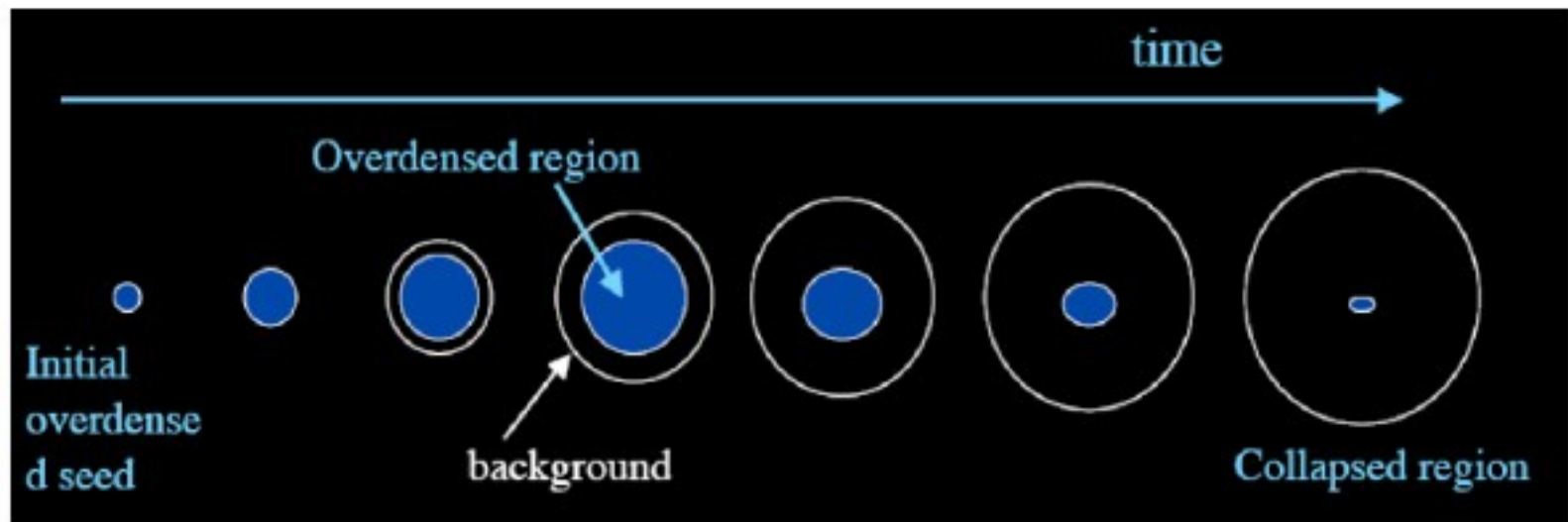
small scale, low mass density enhancements disperse over time due to pressure effects



large mass density enhancements grow due to the attractive force of gravity which overcomes outward pressure effects

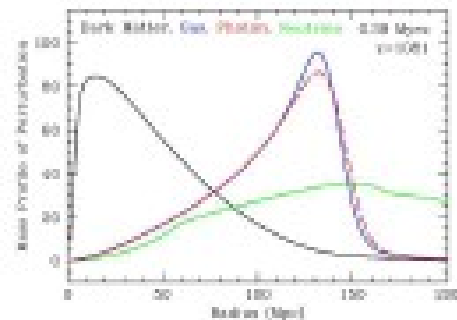
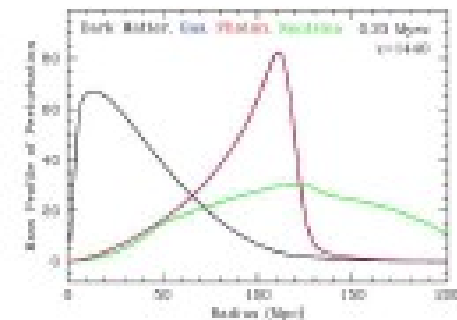
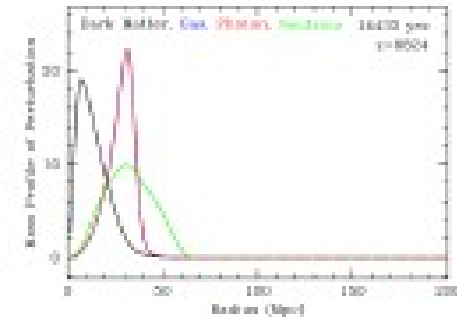
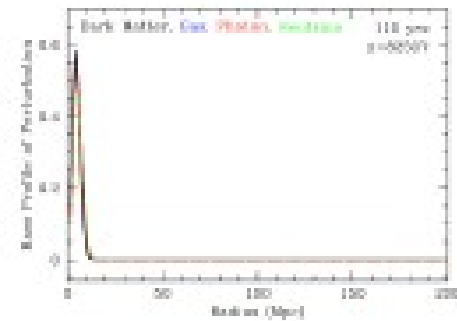
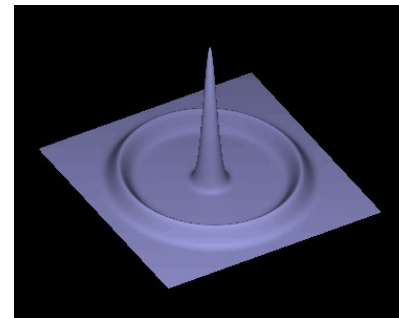
Evolução das flutuações de densidade na era radiativa

- evolução de uma flutuação de ME: ela cresce, capturando gravitacionalmente matéria da vizinhança, até colapsar (se separar da expansão) e, eventualmente, se virializar



Evolução das flutuações de densidade na era radiativa

- a figura mostra como evolui uma flutuação de densidade constituída, inicialmente, por ME, MB, fótons e neutrinos
- está plotado ρ^2 em função do raio para 4 tipos de matéria:
- preto**: ME – como a ME não interage com os fótons e é fria (não-relativística), as flutuações de ME podem crescer
- azul**: matéria bariônica (MB) – acompanha os fótons
- vermelho**: fótons – devido à pressão da radiação, os fótons escapam da flutuação de ME com a velocidade do som: $\sim c/3^{1/2}$
- verde**: neutrinos – como são relativísticos, escapam da flutuação de ME



Evolução das flutuações de densidade na era radiativa

-vermelho: fótons – devido à pressão da radiação, os fótons escapam da flutuação de ME com a velocidade do som: $c_s \sim c/3^{1/2}$

na época da recombinação o raio da flutuação de fótons + MB vai ser

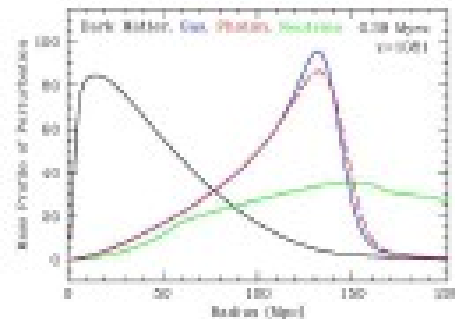
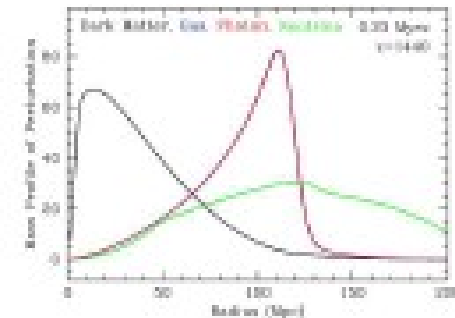
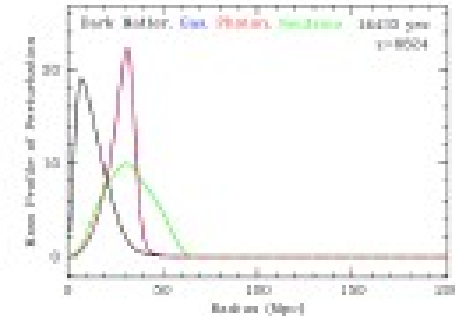
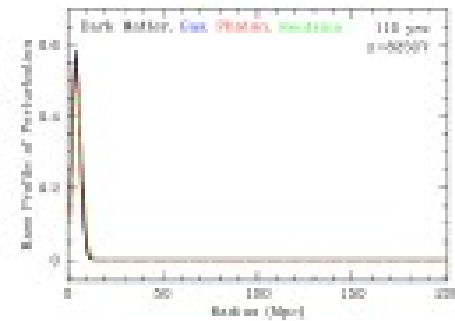
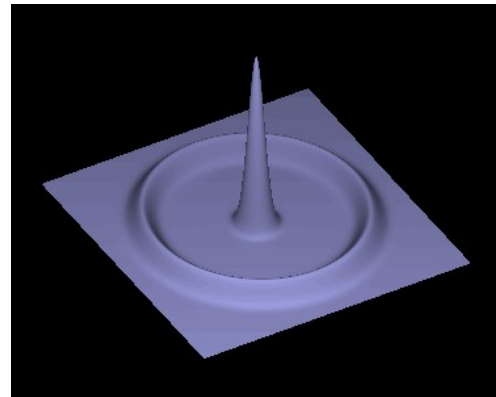
$$\sim c_s t_{rec}$$

que hoje, devido à expansão do universo, corresponde a

$$\sim c_s t_{rec} (1 + z_{rec}) \sim 150 \text{ Mpc}$$

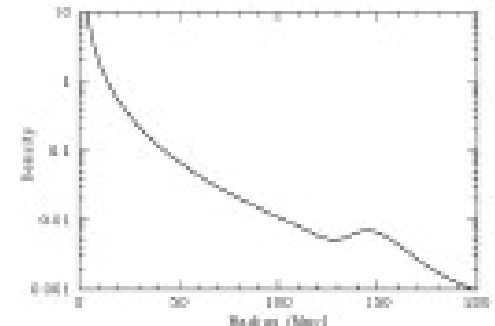
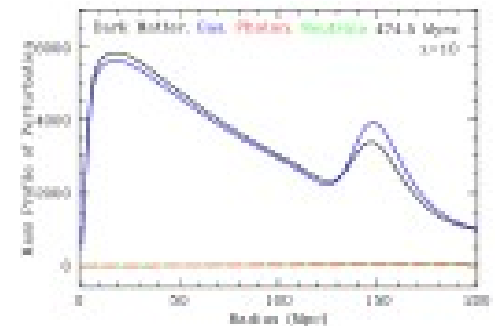
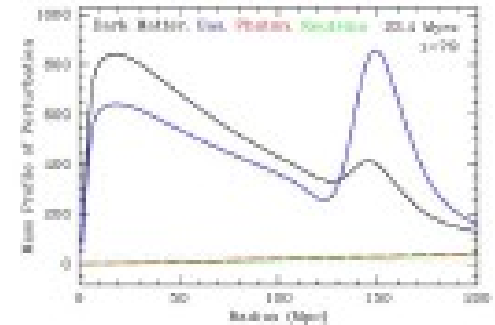
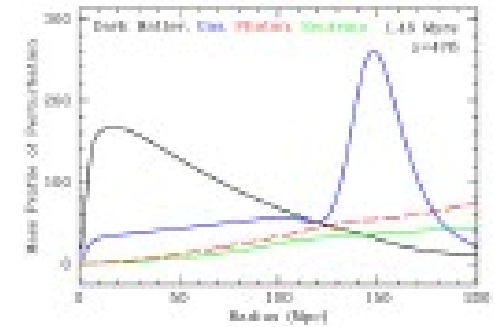
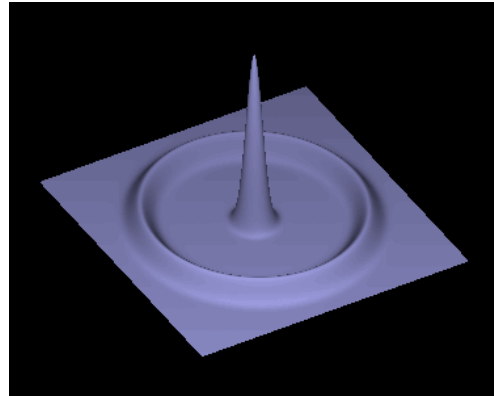
este é o raio característico da “oscilação acústica dos bárions”

(BAOs- baryon accoustic oscillations)

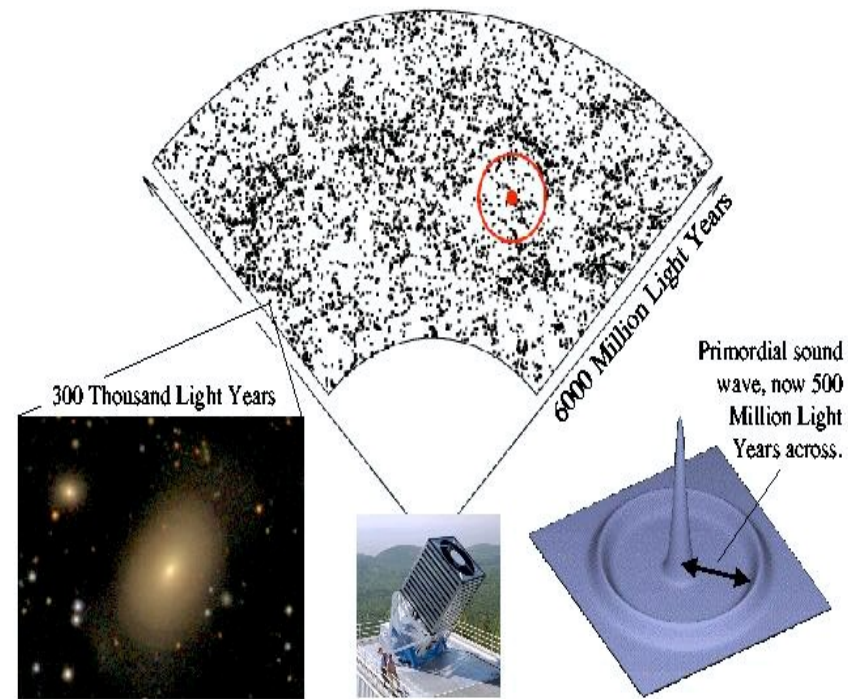
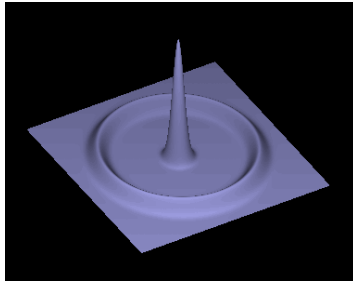


Evolução das flutuações de densidade depois da recombinação

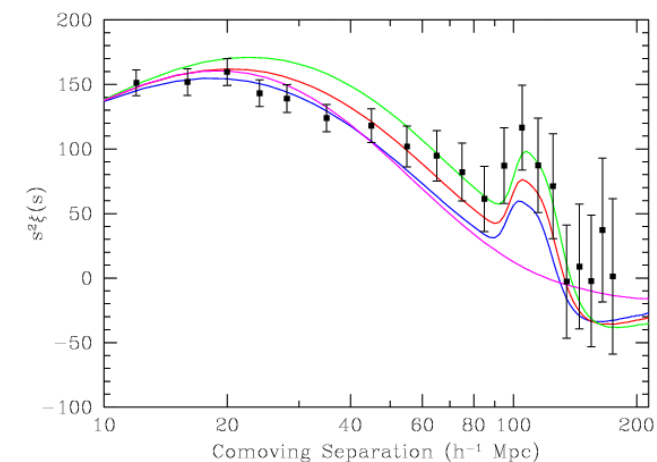
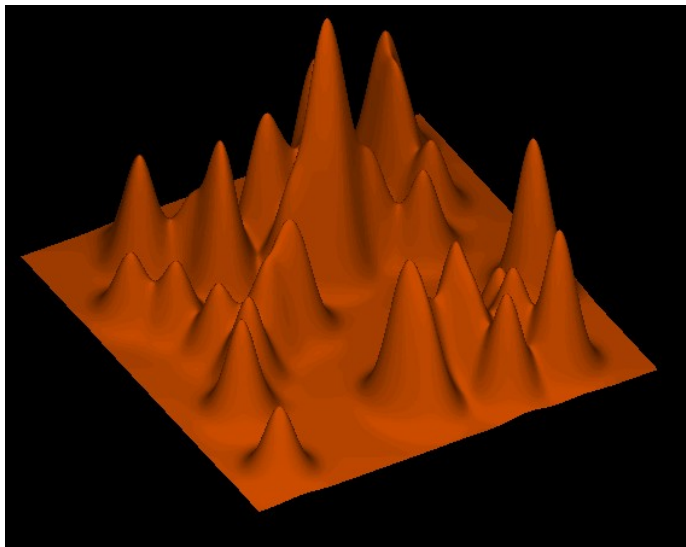
- depois da recombinação os fótons escapam e param de interagir com a matéria bariônica
- os bárions começam a cair sobre as flutuações de ME para começar a formar as galáxias
- mas o pequeno excesso de MB atrai a ME e cria um pequeno excesso de densidade (com ME e MB) no raio da BAO



ME e formação de galáxias



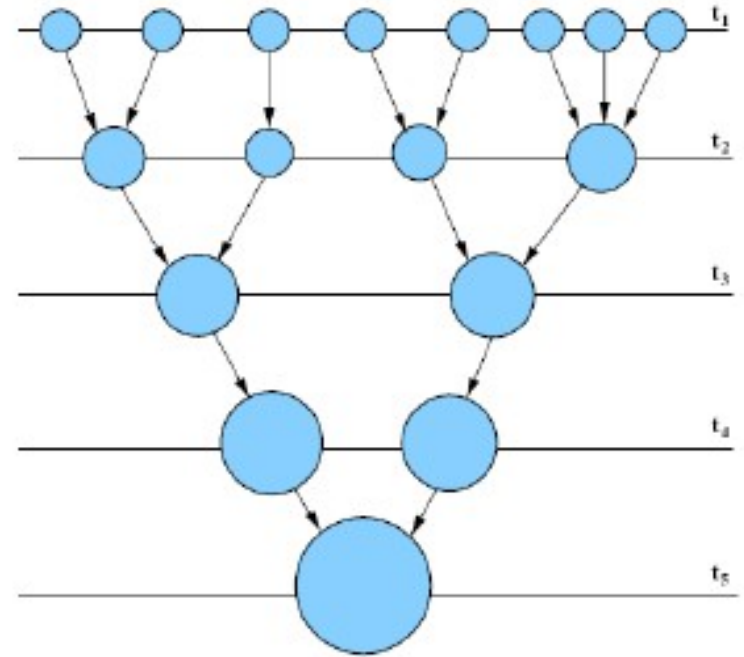
mas o mundo real é mais complexo:



2005: detecção das “oscilações acústicas” na função de correlação das galáxias

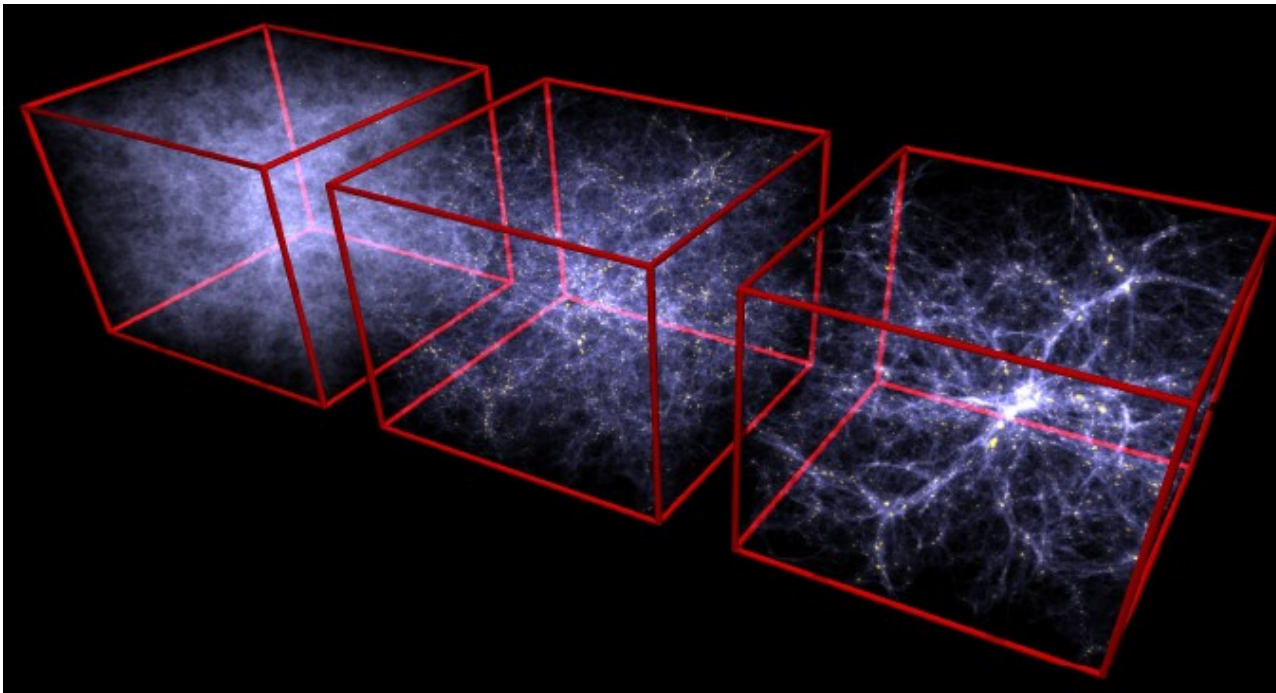
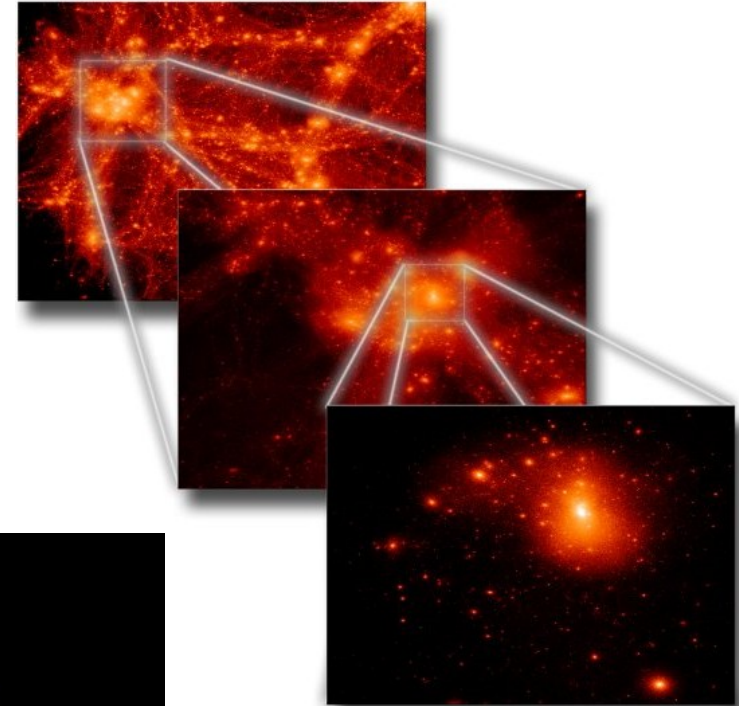
formação de galáxias com ME fria

- cenário hierárquico: os halos crescem por fusão com outros halos
- o processo pode ser descrito com uma árvore de fusões (*merger tree*)



evolução de halos de CDM

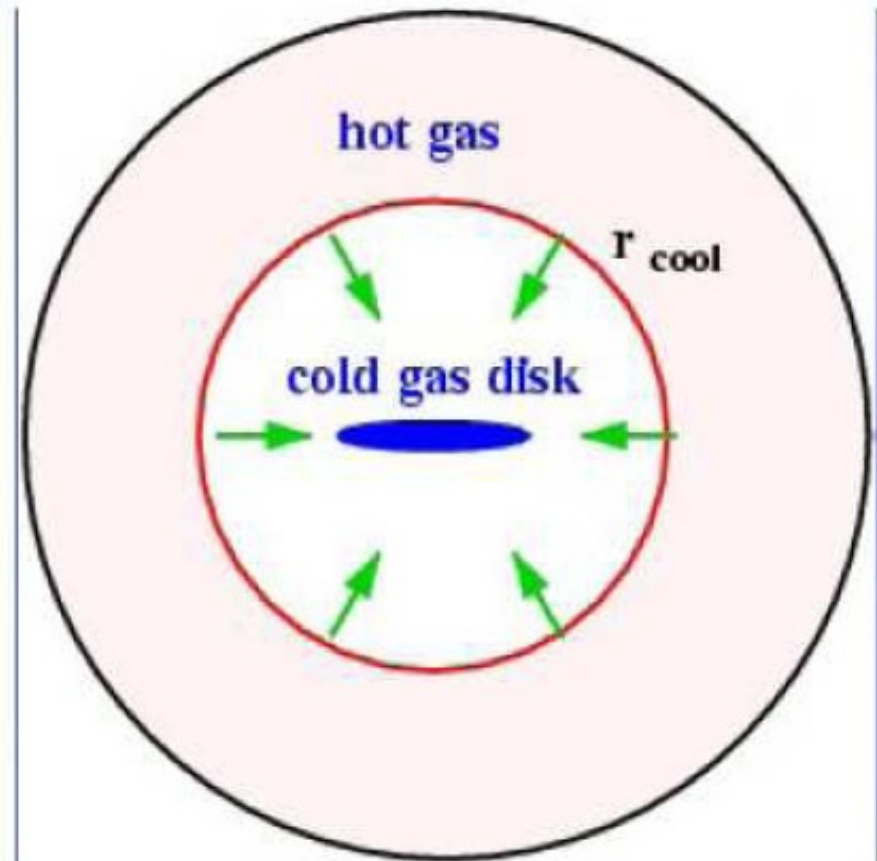
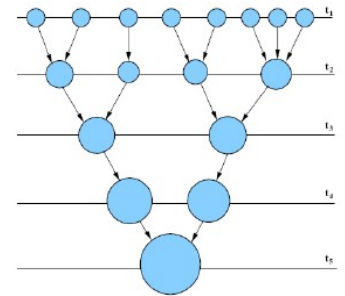
- estudo da formação de estruturas com simulações numéricas de N-corpos



formação de galáxias com ME fria

evolução da matéria bariônica

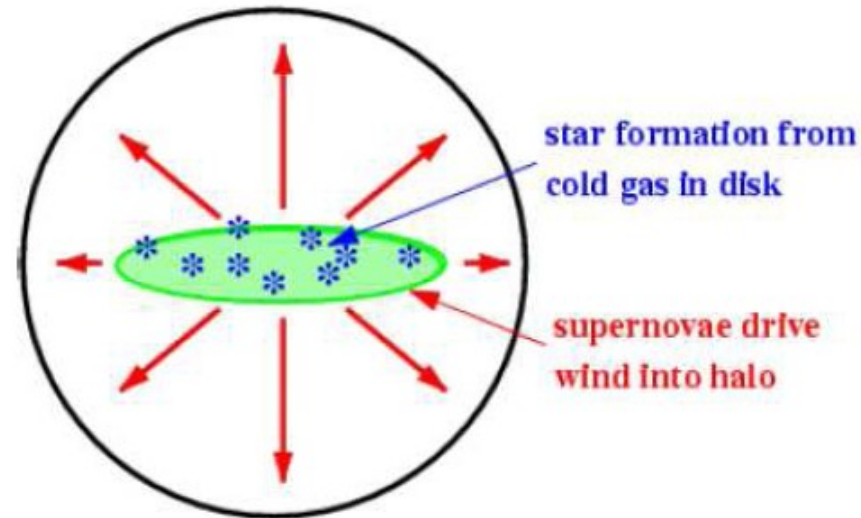
- os bárions caem nos halos de ME e se virializam, ficando muito quentes
- parte do gás pode se resfriar e formar um disco



formação de galáxias com ME fria

evolução da matéria bariônica

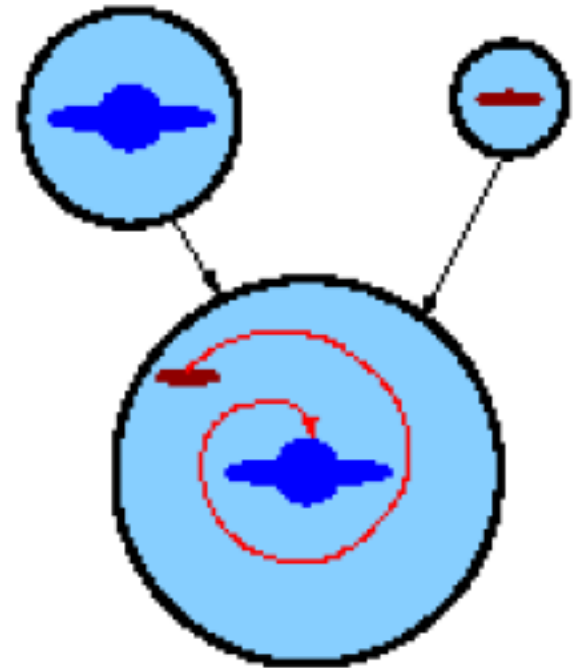
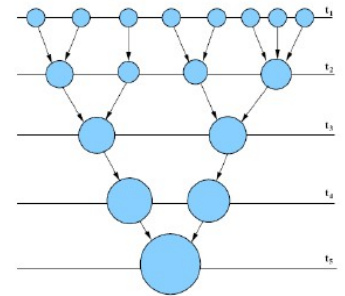
- os bárions caem nos halos de ME e se virializam, ficando muito quentes
- parte do gás pode se resfriar e formar um disco
- estrelas se formam no disco; as SNs podem aquecer o gás no disco e produzir ventos galácticos que enriquecem o gás quente
- (efeito de *feedback*)



formação de galáxias com ME fria

evolução da matéria bariônica

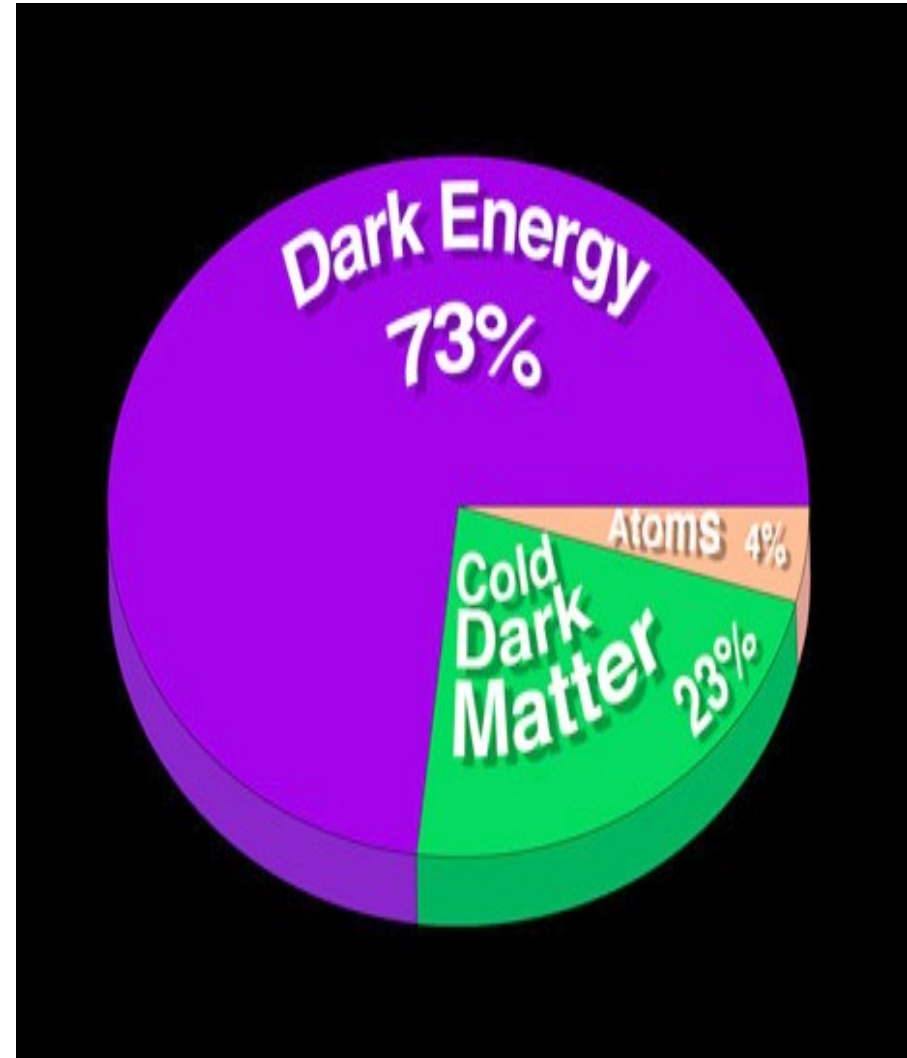
- as fusões levam ao crescimento das galáxias
- fusões de galáxias com massas semelhantes podem destruir os discos, formando elípticas
- se o gás quente pode se resfriar, um novo disco se forma
- *no cenário hierárquico a morfologia das galáxias pode mudar com o tempo*



O paradigma cosmológico

- WMAP (Hinshaw et al. 2008)
- Para um universo de curvatura nula:
 - Energia escura: 0.72
 - Matéria escura: 0.23
 - Matéria bariônica: 0.046

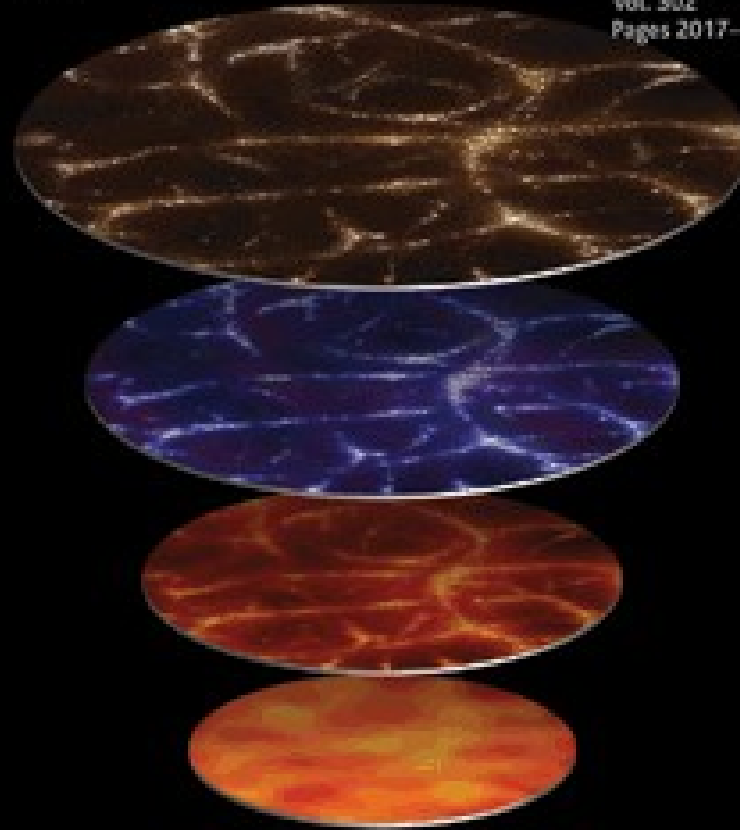
(em unidades da densidade crítica)



Science

19 December 2003

Vol. 302 No. 5653
Pages 2017-2172 510



Breakthrough of the Year

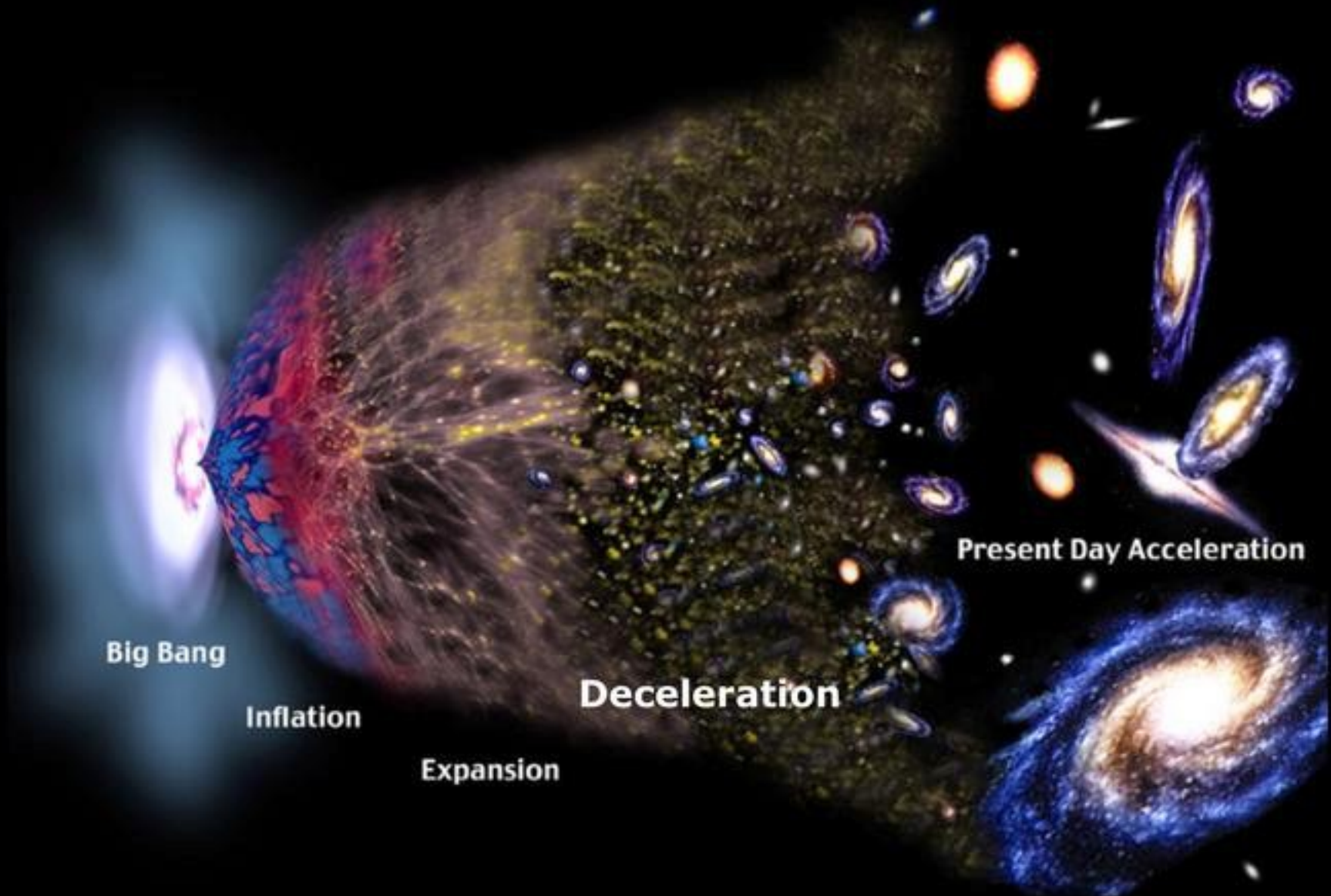
**Cosmic
Convergence**

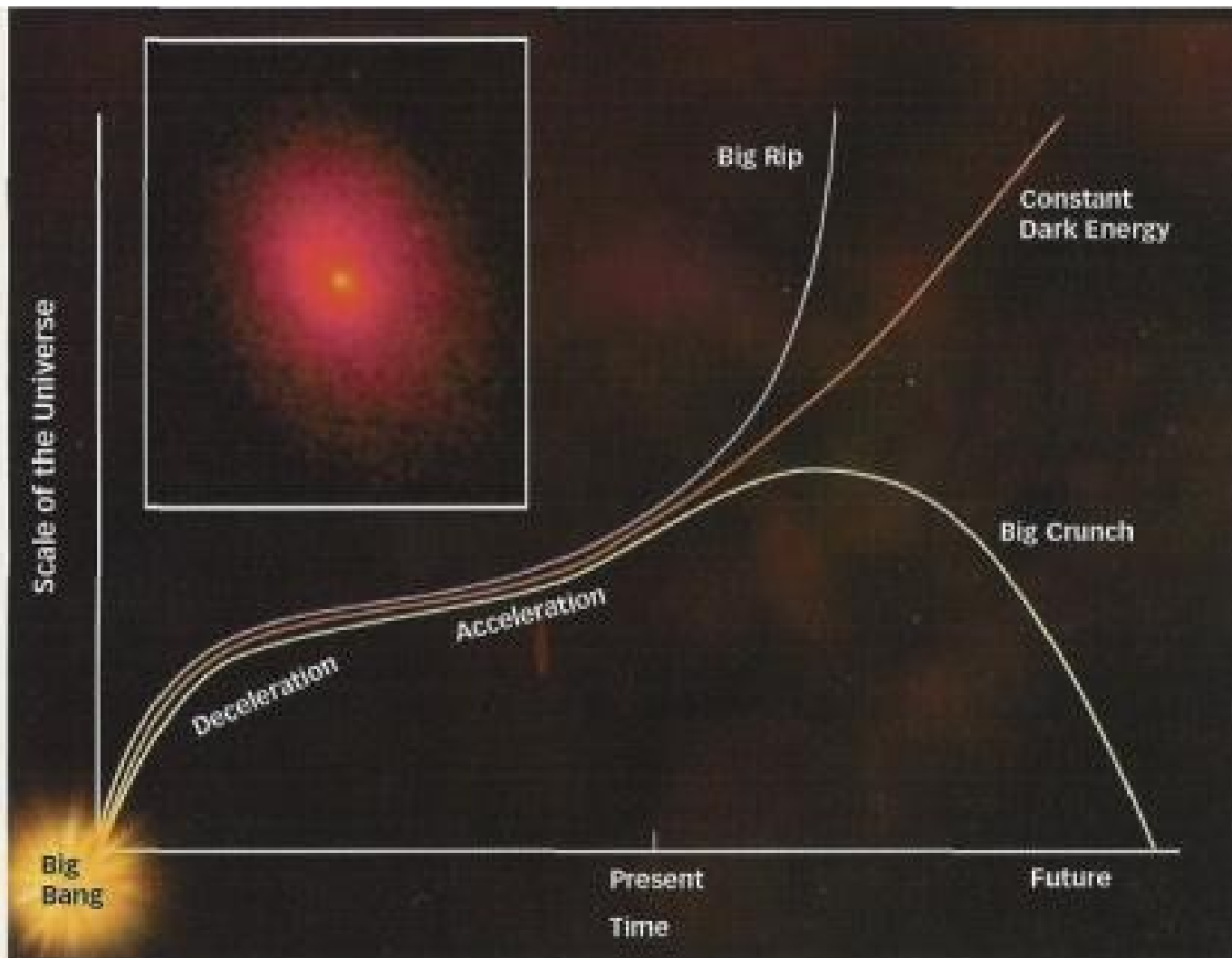
cosmologia
de precisão



AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

Cosmic Deceleration from Dark Matter, then Acceleration from Dark Energy!





DARK FUTURE If the density of dark energy is constant, cosmic expansion will accelerate forever but galaxies will remain intact (red curve). If the density increases, galaxies will be torn apart in the Big Rip (blue curve). If the density decreases, the universe may recollapse in a Big Crunch (yellow curve). Inset: X-ray image of hot gas bathing a galaxy cluster.

Exercícios

1. Qual é o valor de H_0 no slide 9?
2. Calcule quanto tempo levou a luz de uma galáxia observada em $z = 1$ para chegar até nós. Suponha que vivamos num universo de Einstein - de Sitter.
3. Mostre que em um universo de Einstein - de Sitter a temperatura da radiação varia com $t^{-1/2}$.
4. Qual era a temperatura da radiação em $z = 1100$?

COSMOLOGY MARCHES ON

