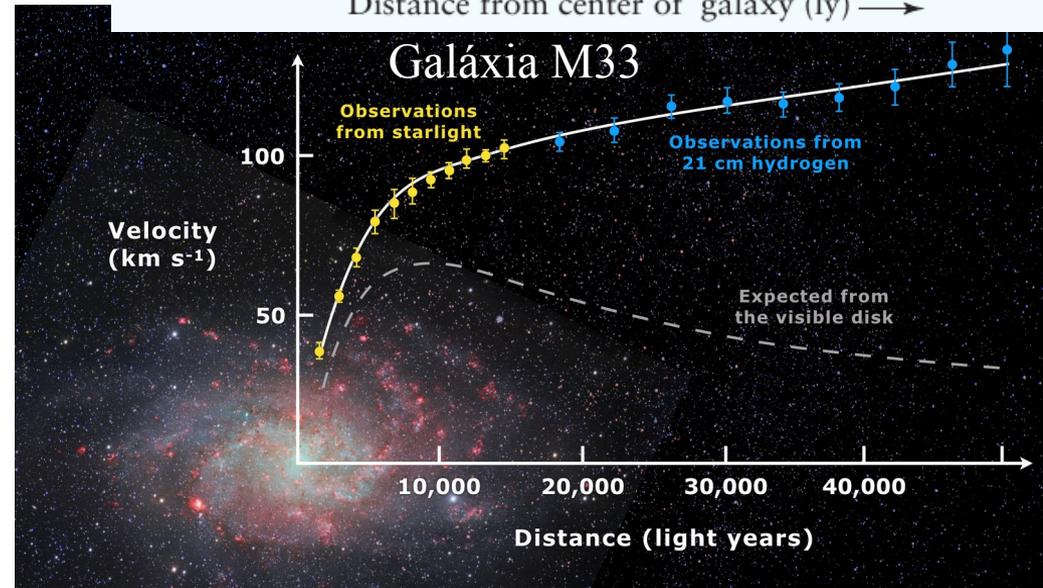
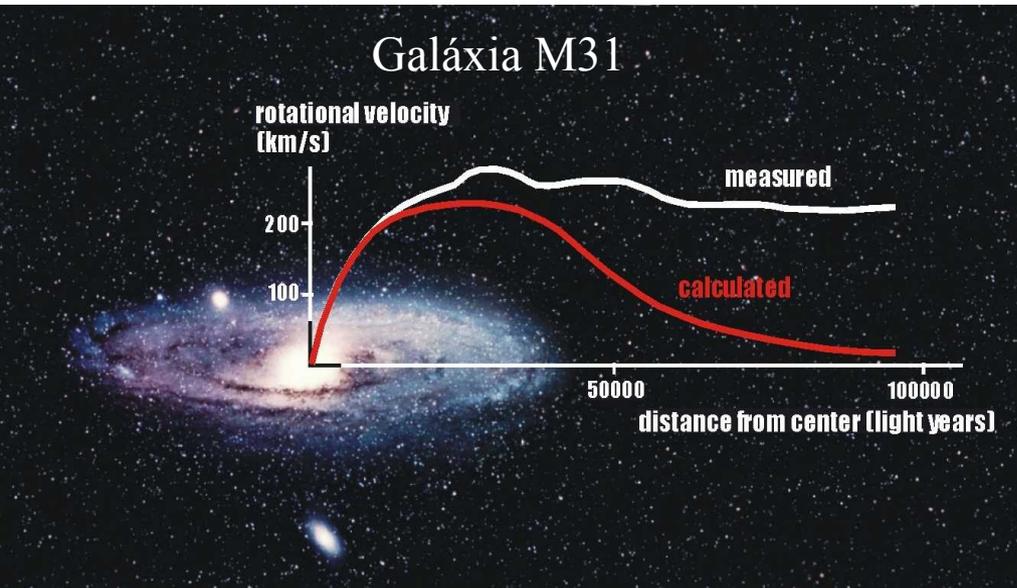
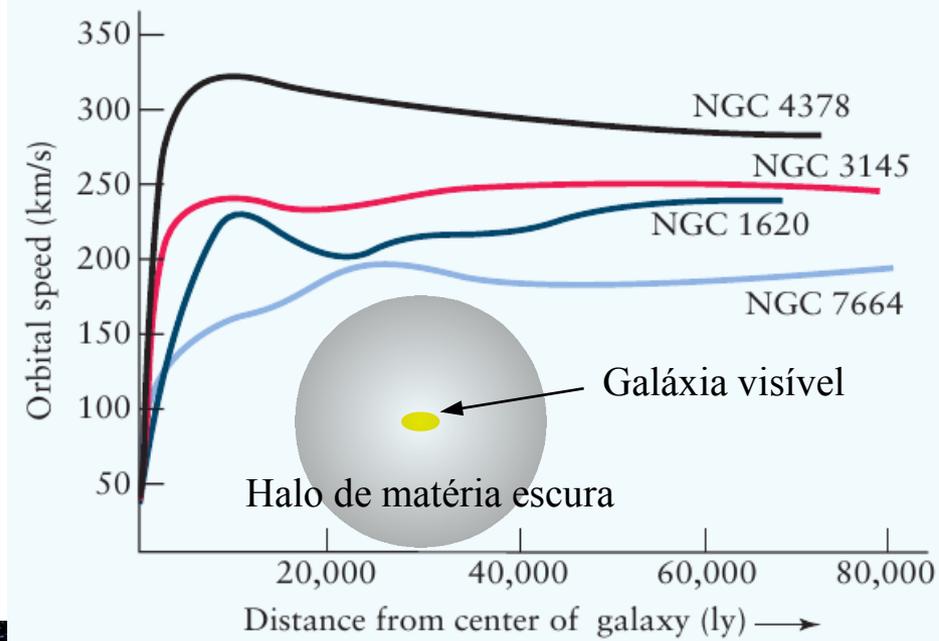


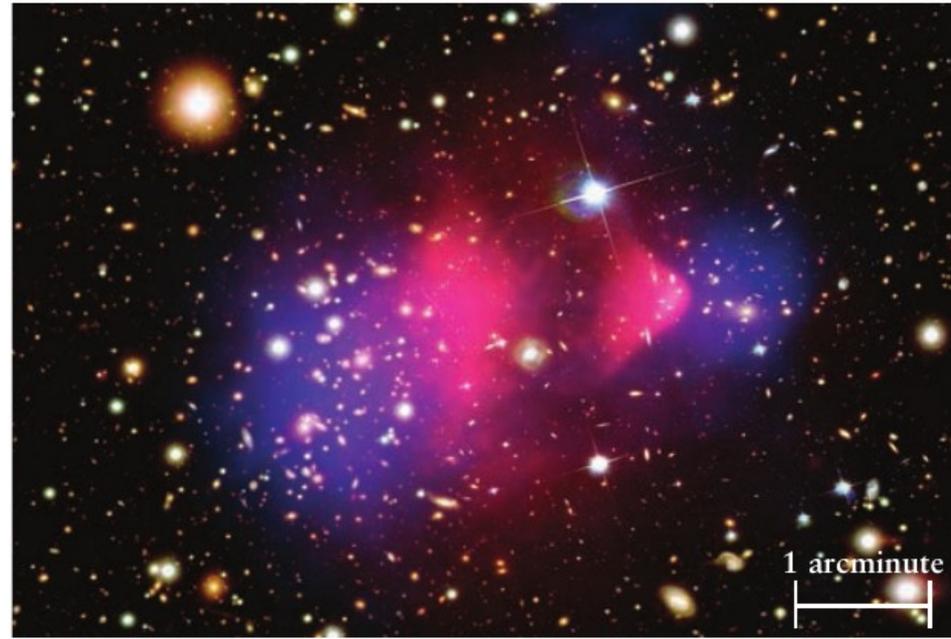
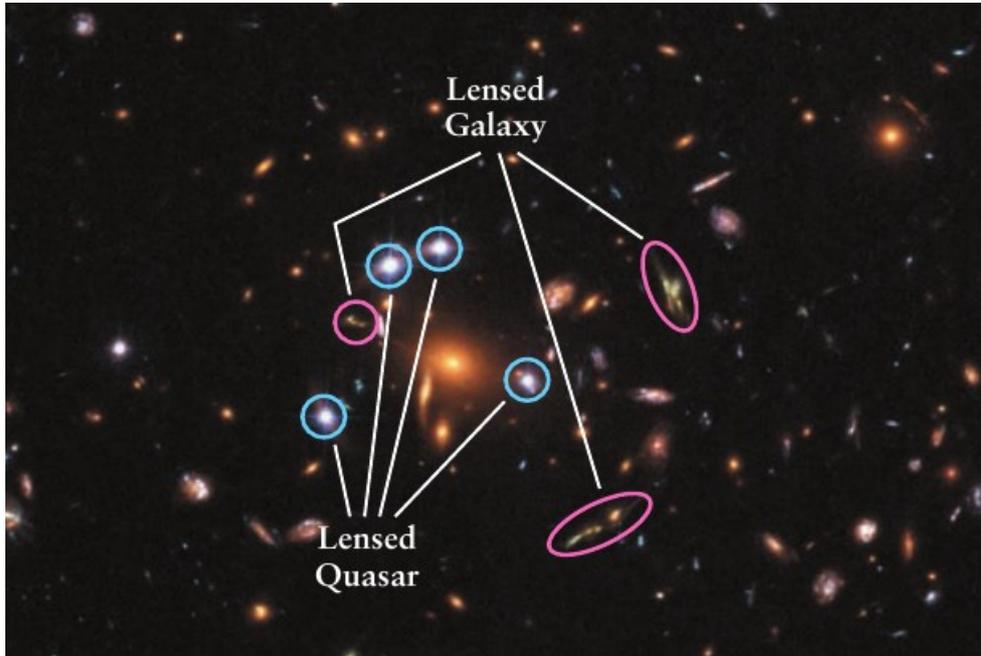
# Matéria escura

Como na Via Láctea, as curvas de rotação das galáxias não são compatíveis com órbitas Keplerianas. Tipicamente, 80% da matéria necessária para explicar os dados observacionais está faltando.



# Matéria escura

Assim como nas galáxias, a matéria visível também não é suficiente para segurar as galáxias em aglomerados. Tipicamente, 90% da matéria necessária para explicar os dados observacionais está faltando (alta velocidade das galáxias e fortes lentes gravitacionais).



d

Composite image of galaxy cluster 1E0657-56 showing visible galaxies, X-ray emitting gas (red), and dark matter (blue).

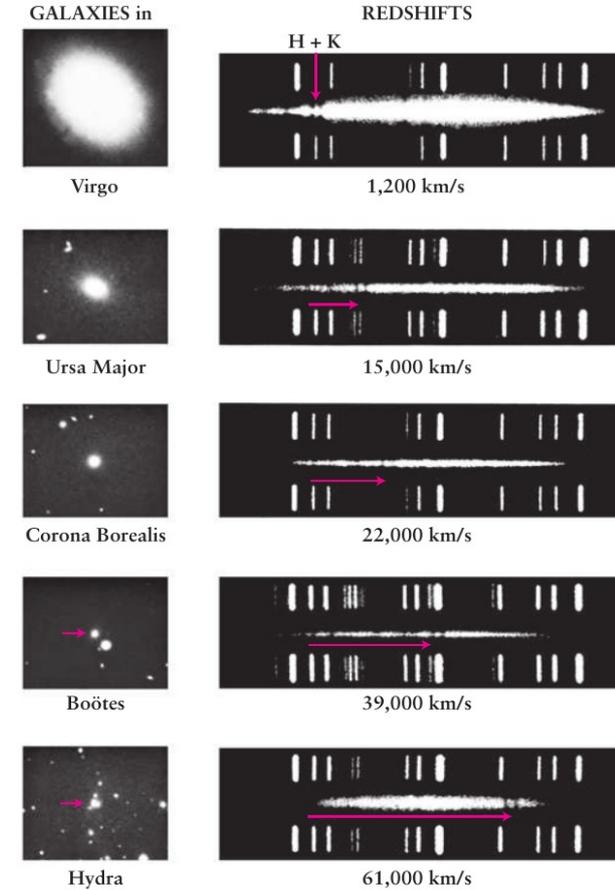
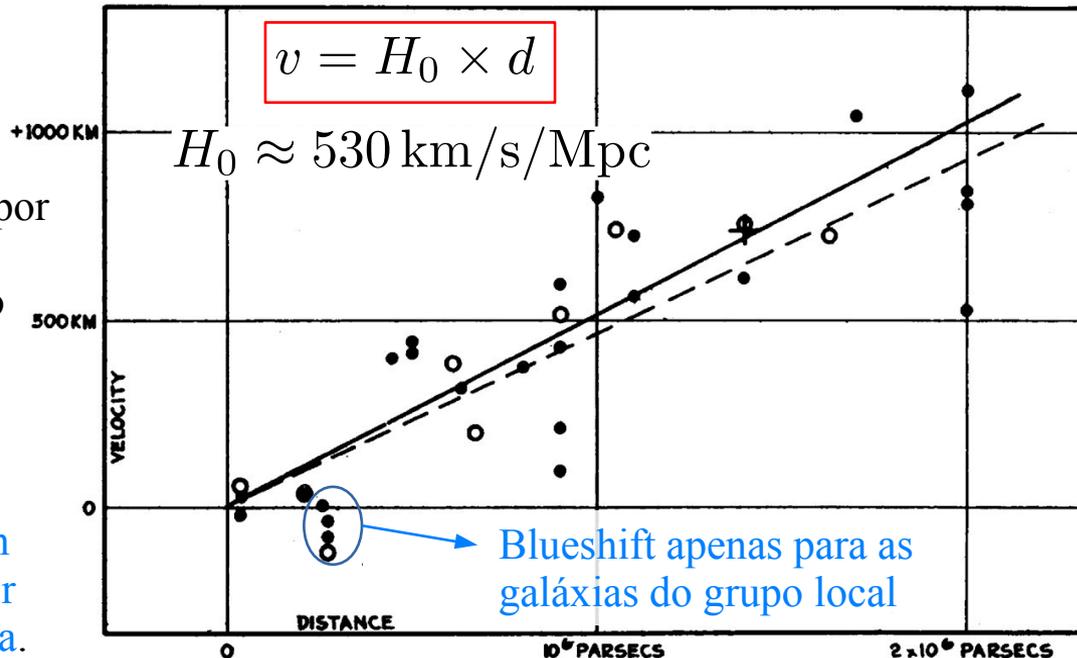
“Bullet cluster”: colisão de 2 aglomerados onde ocorreu a separação do gás intergaláctico (por fricção, medido em raios-X) e da matéria escura (medida por lentes gravitacionais).

# Lei de Hubble

Visto Melvin Slipher em 1912: galáxias (na época nebulosas espirais) tinham espectro deslocado para o vermelho (na maioria; M31 mostrava deslocamento para o azul,  $v \sim 300$  km/s), e que quanto mais fraca e, portanto mais distante, maior era o deslocamento para o vermelho.

Em 1923, Edwin Powell Hubble, usando o telescópio de 2,5 m de diâmetro do Monte Wilson (Califórnia), identificou estrelas Cefeidas em M31 → distância ~ 2 milhões de anos-luz.

Em 1929, mediu o deslocamento nas linhas espectrais das galáxias observadas por Milton La Salle Humason, e medindo suas distâncias, descobriu que as galáxias estão isotropicamente se afastando de nós com velocidades tão maior quanto é sua distância.



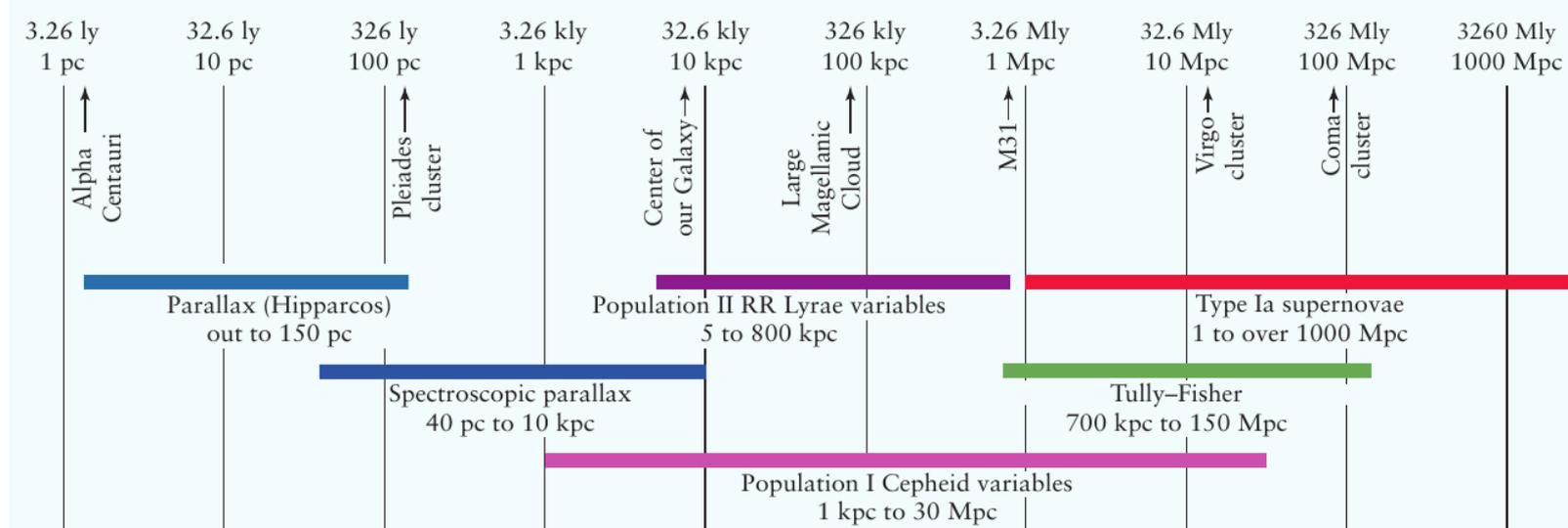
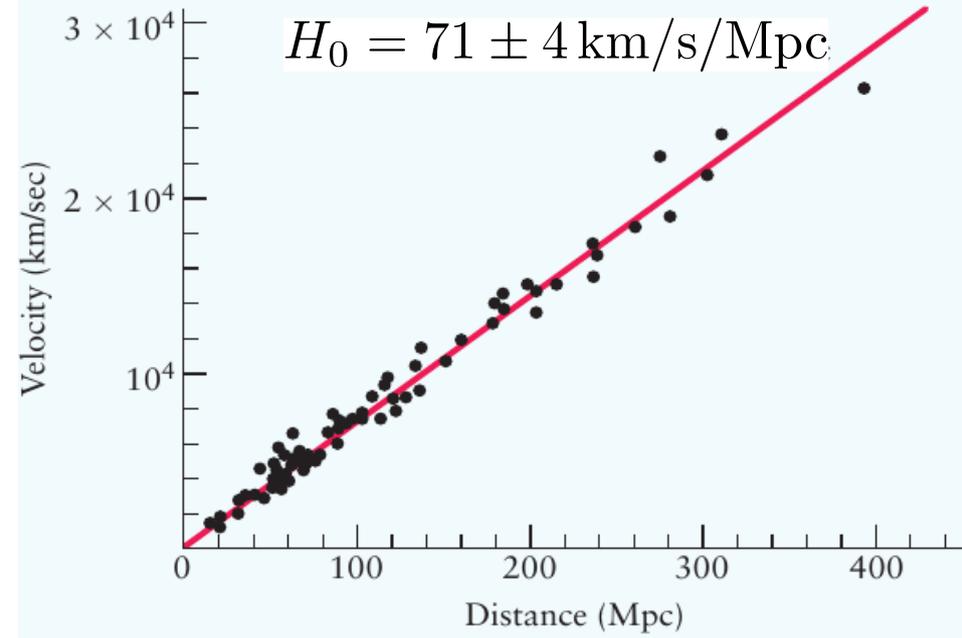
**FIGURE 16-30 Five Galaxies and Their Spectra** The photographs of these five elliptical galaxies were all taken at the same magnification. They are labeled according to the constellation in which each galaxy is located. The spectrum of each galaxy is the hazy band between the comparison spectra at the top and bottom of each plate. In all five cases, the so-called H and K lines of calcium are seen. The recessional velocity (calculated from the Doppler shifts of the H and K lines) appears below each spectrum. Note that the fainter—and thus more distant—a galaxy is, the greater is its redshift. (Carnegie Observatories)

# Lei de Hubble

Refinamentos na medida das velocidades e distâncias levaram a uma melhor estimativa da constante de Hubble.

Tully e Fisher descobriram uma [relação entre a luminosidade de uma galáxia e o alargamento de linha de 21 cm do HI](#) → mais uma maneira de medir distâncias.

Quanto mais brilhante a galáxia, maior é o alargamento Doppler sobre as linhas espectrais.  
Maior brilho → maior massa → maiores variações nas velocidades dos gases orbitantes.



# Lei de Hubble

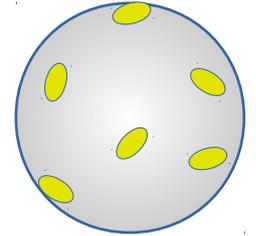
A lei de Hubble diz que todas as galáxias (distantes) estão se afastando isotropicamente da nossa. Isso quer dizer que estamos no centro do universo? Não. A interpretação é a de que as galáxias estão todas se afastando uma das outras. Então o centro do universo está ficando menos denso? Não há um centro porque todos os pontos do universo são **equivalentes**. As galáxias se afastam uma das outras porque o universo (espaço-tempo) está se expandindo.

Analogia do balão inflando: Imagine que o universo é 2D com geometria esférica (a superfície de uma esfera 3D).

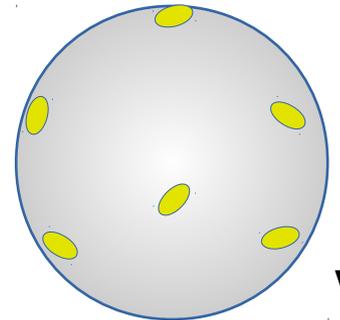
Quando o balão é inflado, o espaço bidimensional expande e todas as galáxias em sua superfície se afastam uma das outras. Quanto mais distantes, maior a velocidade com que se afastam.

O volume do universo (área do balão) cresce, mas o volume das galáxias e dos objetos que nos cercam não, porque há outras forças atuando sobre os objetos próximos – gravidade e forças elétricas – que mantêm os átomos próximos juntos.

Universo  
no  
passado



Universo  
no  
presente



tempo



# Lei de Hubble e “redshift” cosmológico

A lei de Hubble diz que todas as galáxias (distantes) estão se afastando isotropicamente da nossa. Isso quer dizer que uma galáxia mais distante do que o raio de Hubble

$$r_H = \frac{c}{H_0} \approx 13.8 \pm 0.8 \text{ bilhões de anos-luz}$$

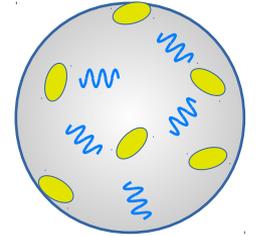
está se movendo mais rápido do que a luz?

Não. Mesmo parada em relação ao espaço local, ainda há o “redshift”. (Daí, a terminologia **velocidade de recessão**.)

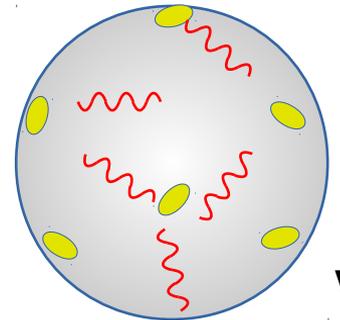
Este é o **redshift cosmológico**. Não é devido ao efeito Doppler, mas porque os fótons (sempre viajando com velocidade  $c$  no vácuo) são “esticados” pela expansão do espaço-tempo. Calcular a exata distância requer conhecimento da história da expansão, daí indica-se apenas  $z$ .

Além do **raio de Hubble**, nenhuma galáxia pode ser observada **a partir de agora**. Isso não quer dizer que ela não é observável se estiver além dele. A luz que ela emitiu no passado (quando estava dentro do raio de Hubble da época) ainda irá nos alcançar.

Universo  
no  
passado



Universo  
no  
presente



tempo



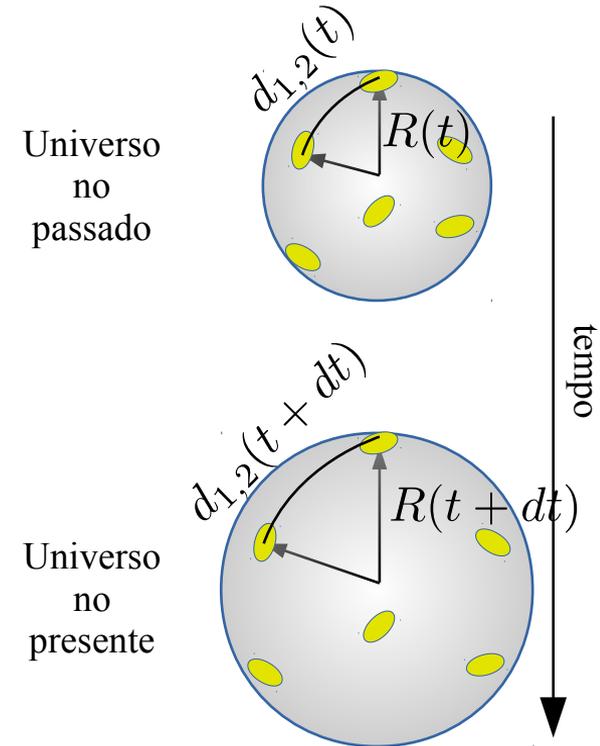
# Lei de Hubble e o tempo de Hubble

A lei de Hubble diz que todas as galáxias (distantes) estão se afastando isotropicamente da nossa. Isso quer dizer que tudo estava mais compacto no passado. Quanto tempo no passado? Para essa resposta, um **modelo cosmológico** se faz necessário. Vamos supor um universo como aquele do balão e vamos assumir que a expansão sempre foi a mesma em toda sua evolução.

$$\begin{aligned}v_{1,2} &\equiv H_0 \times d_{1,2} = H_0 \Delta\theta_{1,2} R(t) \\ &\equiv \frac{d}{dt} d_{1,2}(t) = \Delta\theta_{1,2} \frac{d}{dt} R(t) \\ &\Rightarrow \frac{dR}{dt} = H_0 R, \quad \Rightarrow \quad R(t) = R_0 e^{H_0 t}\end{aligned}$$

Tempo de Hubble: idade que o universo teria supondo  $H_0$  constante.

$$t_H = \frac{1}{H_0} \approx 13.8 \pm 0.8 \text{ bilhões de anos}$$



# Exercício

A teoria do universo estático (1948) de Fred Hoyle, Thomas Gold e Hermann Bondi descreve um universo em expansão (de acordo com a lei de Hubble) no qual matéria se cria entre as galáxias que se afastam, mantendo a densidade de matéria no universo constante e fornecendo novos prótons para a nucleossíntese nas estrelas. O universo conservaria assim uma densidade idêntica a todo momento, e duraria eternamente. Este modelo é amplamente desacreditado porque (i) não é compatível com a população de quasares observada, (ii) apesar de contemplar a existência da radiação cósmica de fundo, sua característica homogênea, isotrópica e despolarizada não é explicada pela teoria, (iii) viola as leis da natureza e (iv) não há como comprová-lo experimentalmente. As afirmações verdadeiras são:

- 1) (i) e (ii)
- 2) (i), (ii) e (iii)
- 3) Todas as 4
- 4) (i) e (iii)
- 5) (ii) e (iv)

# Big Bang

Universo inicial com alta concentração de energia → fortes campos gravitacionais → necessidade de Relatividade Geral: Friedmann, Lemaître, Robertson, Walker e outros. (RG é a base da cosmologia moderna, mas não é objetivo deste curso.)

Solução das equações de Einstein para um universo homogêneo e isotrópico: métrica de FLRW

$$-c^2 d\tau^2 = -c^2 dt^2 + a^2 d\Sigma^2$$

Fator de escala adimensional

$$d(t) = a(t)d_0$$

Lei de Hubble

$$H = \dot{a}/a$$

$$= \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

curvatura gaussiana → geometria do espaço

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

equações de Friedman

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a^2} = -\frac{4\pi G(\rho + \frac{3p}{c^2})}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

+ equação para  $p$

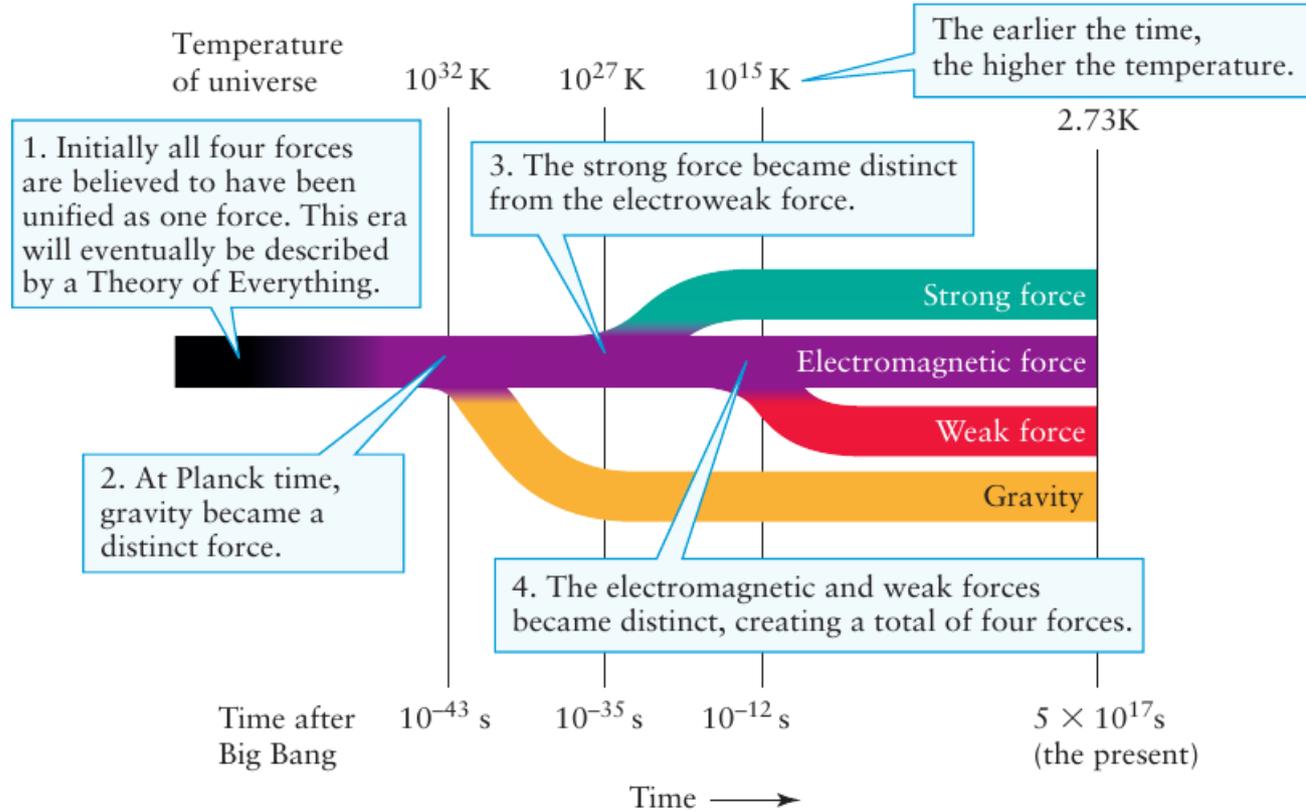
# Big Bang

Não há explosão. (Espaço-tempo expande uniformemente.)

No início os campos de matéria/energia são todos simétricos/iguais.

Espaço-tempo expande → densidade de energia (e temperatura) diminuiu → **transições de fase** → quebras de simetria, universo menos simétrico, i.e., os campos de matéria/energia adquirem propriedades emergentes (carga, spin, etc.)

Transições acontecem quando  
 $T \sim$  energia da interação.



# Big Bang

Especulativo:

1ª transição: gravidade se separa

Como estimar a energia?

RG e MQ

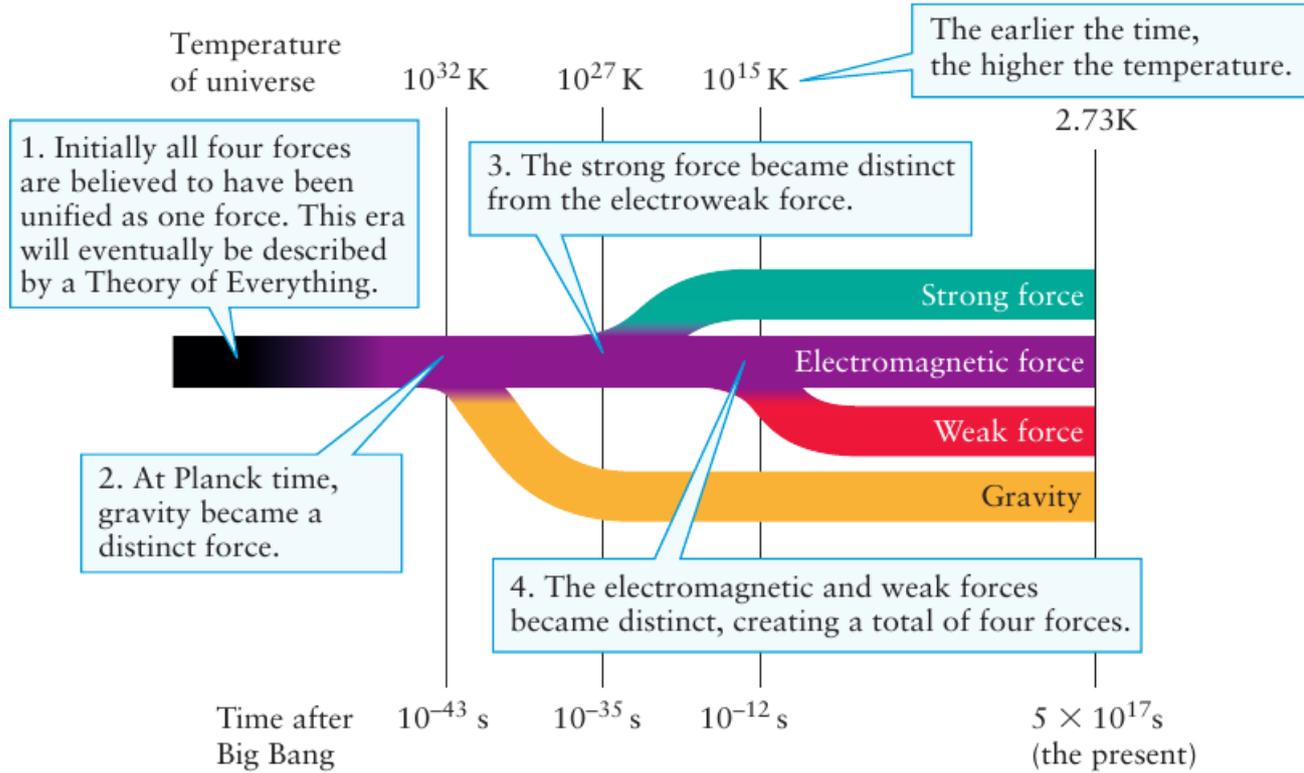
RG: raio de Schwartzschild

$$l_P = \frac{2GM}{c^2} = \frac{2Gp}{c^3}$$

MQ: comprimento de Compton

$$l_P = \frac{\hbar}{p} \Rightarrow l_P \sim \sqrt{\frac{2G\hbar}{c^3}}$$

$$\Rightarrow t_P \sim \sqrt{\frac{2G\hbar}{c^5}} = 7.6 \times 10^{-44} \text{ s}$$



$$k_B T_P = E = pc, \Rightarrow T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{2Gk_B^2}} = 10^{32} \text{ K} \sim 8.6 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

# Big Bang

Relação entre temperatura e tempo?

1ª lei da TM:

$$dE + PdV = 0 \Rightarrow Vdu + (u + P)dV = Vdu + \frac{4}{3}udV = 0 \Rightarrow \frac{du}{u} = -\frac{4dV}{3V} = -4\frac{dr}{r} = -4Hdt$$

Gás ideal:  $P = \frac{1}{3}\rho c^2 = \frac{1}{3}u$

Lei de Hubble:  $v = \frac{dr}{dt} = Hr$

RG (geometria plana + constante cosmológica nula):  $H = \sqrt{\frac{8\pi Gu}{3c^2}}$

$$\Rightarrow \frac{du}{u^{3/2}} = -\sqrt{\frac{128\pi G}{3c^2}} dt \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{u}} = \sqrt{\frac{32\pi G}{3c^2}} t \Rightarrow \frac{1}{T^2} = \sqrt{\frac{32\pi^3 k_B^4 G}{45\hbar^3 c^5}} t$$

Corpo-negro:  $u = \frac{4\sigma}{c} T^4$

$$\frac{T}{T_P} = \left(\frac{45}{16\pi^3}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{t_P}{t}}$$
$$\approx 0.55 \sqrt{\frac{t_P}{t}}$$

# Big Bang

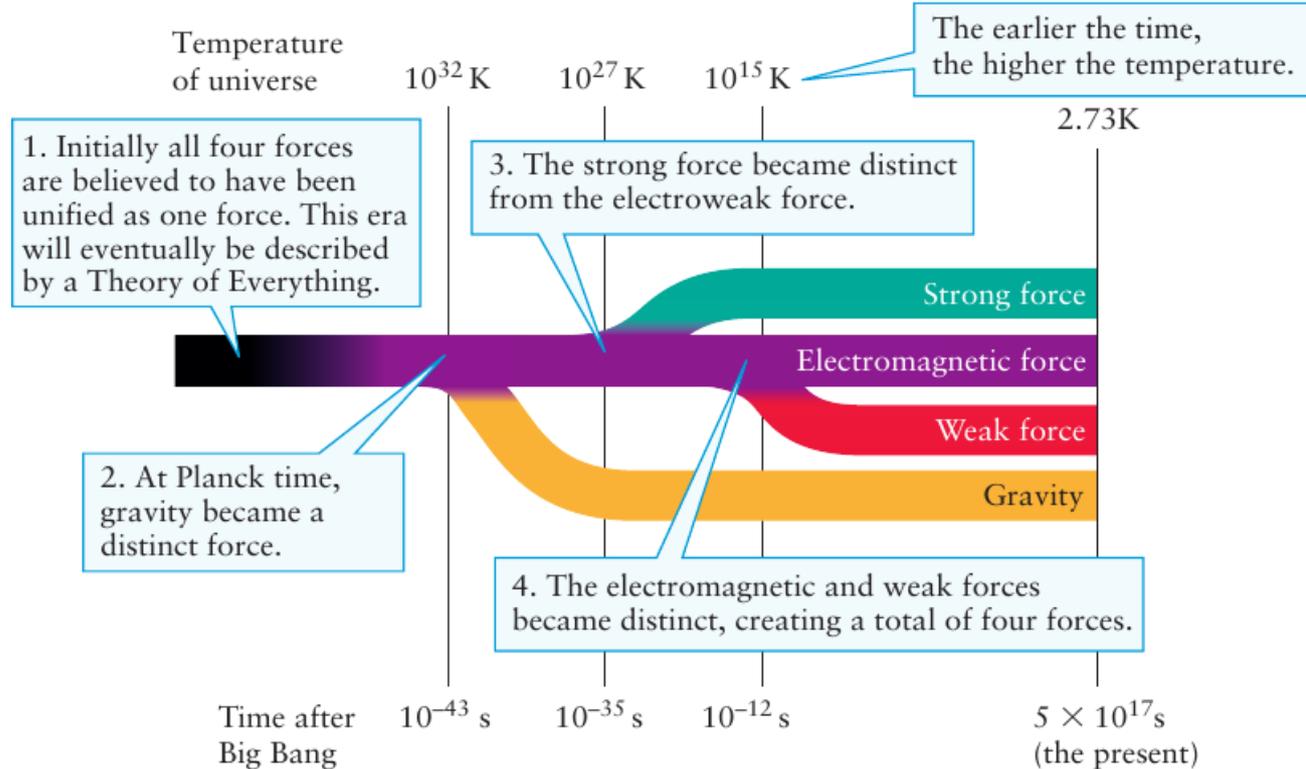
## 2ª transição: Grande Unificação

$$\Lambda_{\text{GUT}} \sim 10^{15} \text{ GeV} \sim 1.2 \times 10^{28} \text{ K}$$

$$\Rightarrow t_{\text{GUT}} \sim 1.7 \times 10^{-36} \text{ s}$$

Bariogênese: quebra espontânea de simetria entre matéria e anti-matéria.

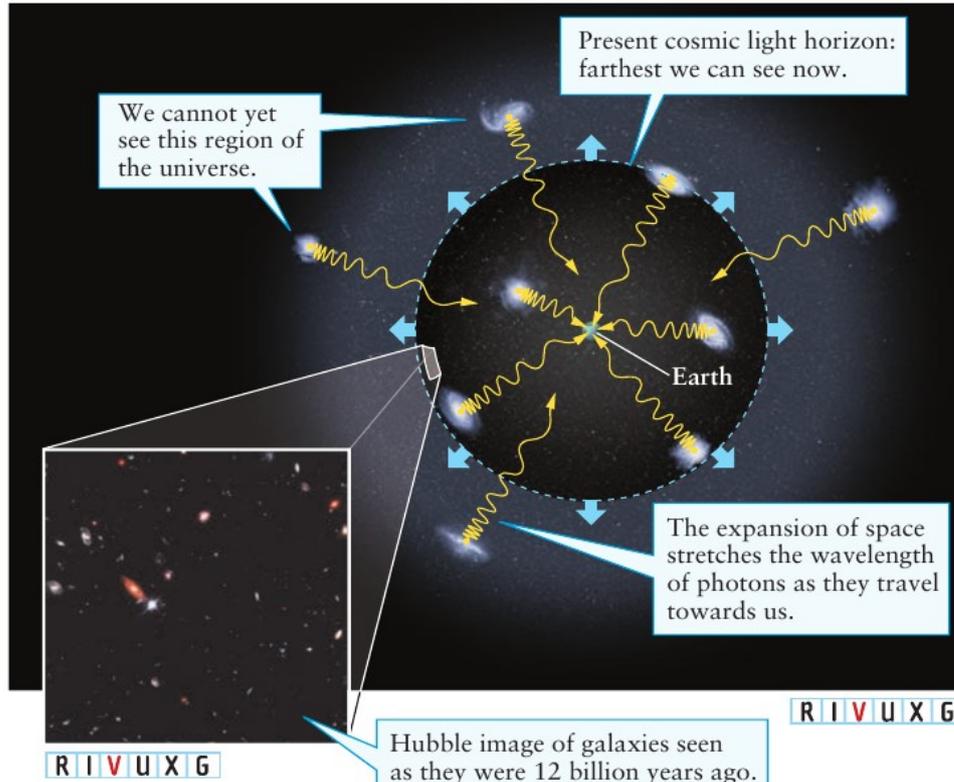
Para cada 1 bilhão de anti-partículas, há 1 bilhão + 1 partículas.



$$t_{\text{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \sim 10^{-43} \text{ s} \quad T_{\text{P}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}} \sim 10^{32} \text{ K} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

# Big Bang

Transição de GU é de 1ª ordem → Calor latente (com o tempo, o universo transiciona para um vácuo menos energético) fornece energia para a extraordinária expansão do tamanho do universo → **inflação** → universo homogêneo e isotrópico em largas escalas. Curvatura gaussiana  $\sim 0$ . Apenas uma pequena fração do universo se torna visível (horizonte cósmico da luz).



**FIGURE 18-11 Observable Universe** This diagram shows why we see only part of the entire universe. As time passes, this volume grows, meaning that light from more distant galaxies reaches us. The farthest galaxies we see appear as they were within a few hundred million years after the Big Bang. These galaxies, formed at the same time as the Milky Way, appear young because the light from their beginnings is just now reaching us. While the light from the most distant galaxies we see was traveling toward us, the universe has been growing. Therefore, objects that appear 13 billion light-years away from us are actually about 3 times farther away today. Put another way, if we could see it all as it is today, rather than as it was when photons from distant objects started their journeys, the visible universe would be nearly 46 billion light-years in radius. Inset: This image shows some of the most distant galaxies we have seen. (inset: Robert Williams and the Hubble Deep Field Team (STScI) and NASA)

# Big Bang

Transição de GU é de 1ª ordem → Calor latente (com o tempo, o universo transiciona para um vácuo menos energético) fornece energia para a extraordinária expansão do tamanho do universo → **inflação** → universo homogêneo e isotrópico em largas escalas. Curvatura gaussiana  $\sim 0$ . Apenas uma pequena fração do universo se torna visível (horizonte cósmico da luz).

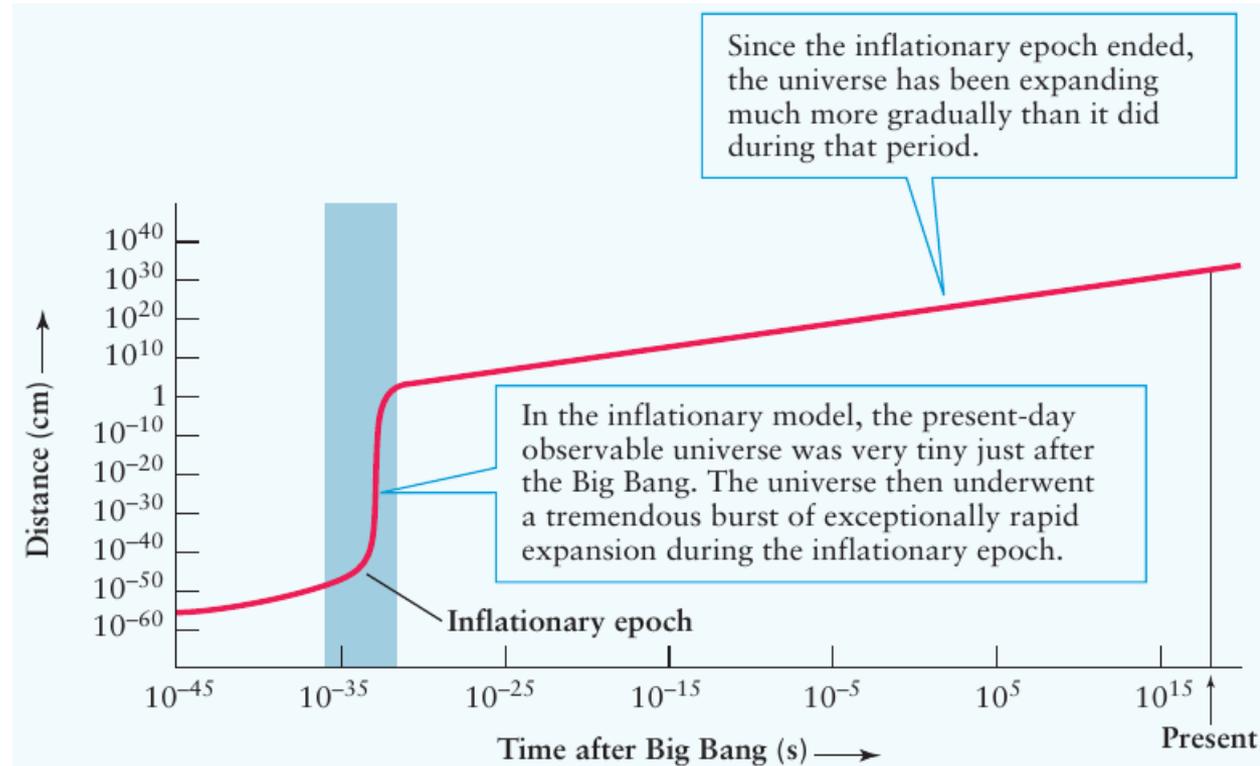
Universo localmente com poucas flutuações. Uma região da ordem de

$$\ell_{\text{inf}} = c \times 10^{-34} \text{ s} = 3 \times 10^{-26} \text{ m}$$

está causalmente conectada. Espera-se poucas flutuações térmicas nessa região. A inflação expande essa região em 50 ordens de grandeza, ou seja

$$\ell_{\text{inf}} \rightarrow 3 \times 10^{24} \text{ m} \approx 317 \text{ Mal}$$

Essa região de temperatura uniforme (após expansão pós-inflação) pode ser o universo que observamos.



# Big Bang

Resumindo, a teoria da inflação resolve 3 grandes problemas (entre outros “menores”) que a teoria do Big Bang “usual” não explicaria.

- 1) **O problema da planicidade**: a teoria do BB prediz que a curvatura do espaço-tempo cresce com o tempo. As observações indicam que a geometria do universo é praticamente plana. Para explicar esse fato, certos parâmetros devem ser muito coincidentes na cosmologia usual, o que não parece plausível.
- 2) **O problema do horizonte**: observações indicam que os pontos mais distantes diametralmente opostos no universo são muito parecidos (universo homogêneo). Entretanto, essas regiões não poderiam estar em contato causal no passado.
- 3) **O problema dos monopolos magnéticos**: a teoria do BB prediz um alto número de monopolos magnéticos. Mas nenhum foi encontrado até hoje. (A teoria da inflação inibe enormemente a formação de monopolos magnéticos, preditos pelas teorias de Grande Unificação e teriam sido produzidos na era pré-inflacionária. Se há monopolos no universo, o período inflacionário faz com que sua abundância caia a níveis indetectáveis.)

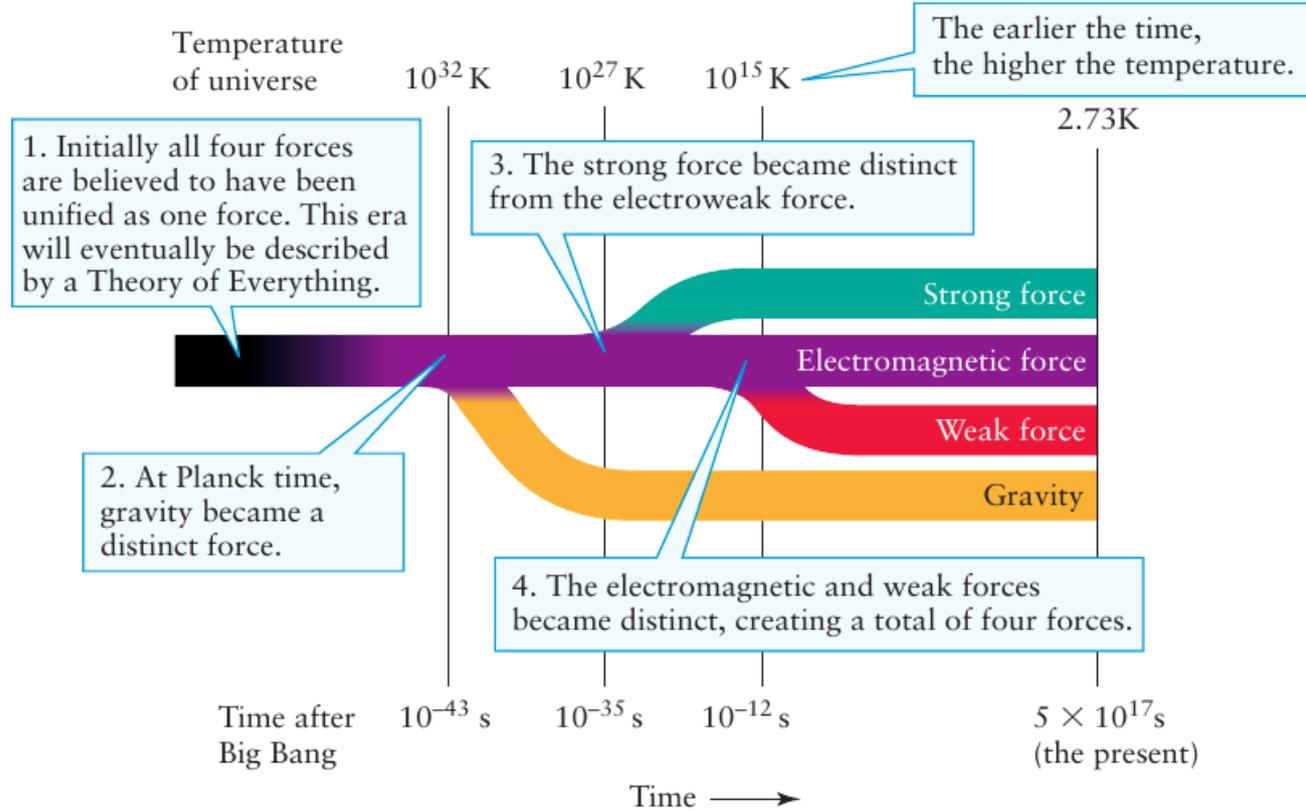
# Big Bang

## 3ª transição: Electrofraca

$$m_{\text{Higgs}} \sim 125 \text{ GeV} \sim 1.5 \times 10^{15} \text{ K}$$

$$\Rightarrow t_{\text{EW}} \sim 1.1 \times 10^{-10} \text{ s}$$

A partir desse instante, a matéria é como a conhecemos: as **partículas fundamentais do modelo padrão são formadas**: quarks, elétrons, neutrinos, fótons, matéria escura e as suas antipartículas.



# Big Bang

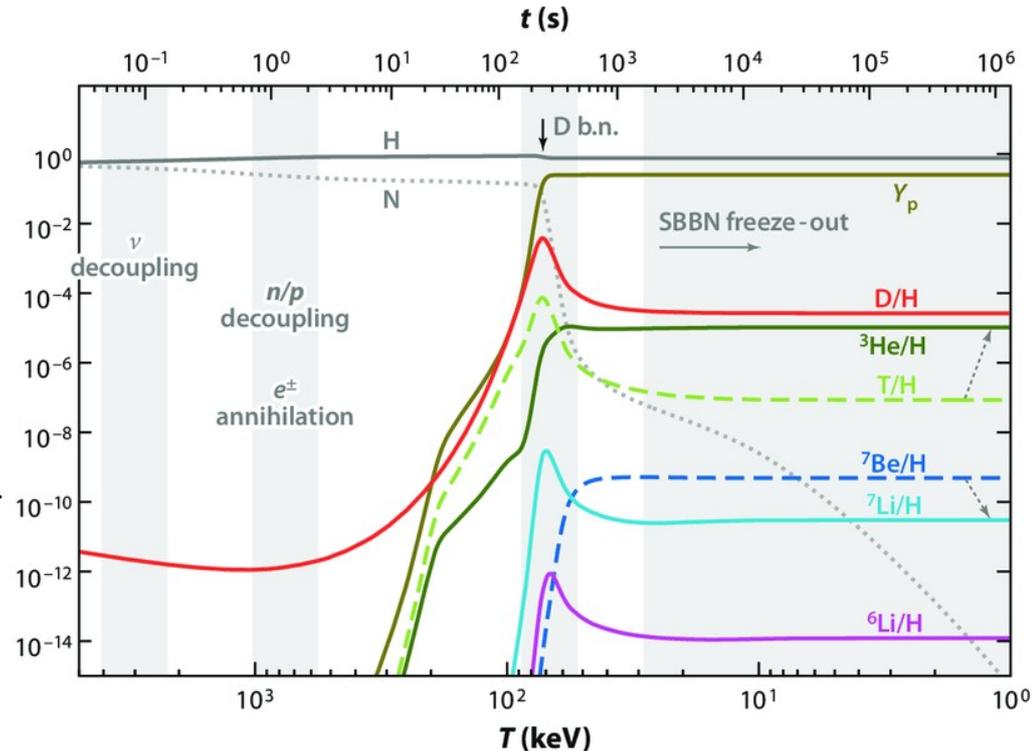
$T$  continua diminuindo  $\rightarrow$  **hadronização**: transição de fase quark-hádron (energia de ligação dos quarks dentro do próton = 928,9 MeV  $\sim 1,1 \times 10^{13}$  K  $\rightarrow t \sim 2,0 \times 10^{-6}$  s; por curiosidade, compare com a massa do próton  $m_{\text{próton}} = 938$  MeV)  $\rightarrow$  prótons e nêutrons são formados (**quarks confinados**).

Inicia-se a produção de elementos mais pesados? Ainda não.

**Gargalo do deutério**:  $p + n \rightarrow d + \gamma$

$$\begin{aligned} m_p &\sim 938.27 \text{ MeV} & E_\gamma &= (m_p + m_n - m_d)c^2 \\ m_n &\sim 939.56 \text{ MeV} & &\sim 2.2 \text{ MeV} \sim 2.6 \times 10^{10} \text{ K} \\ m_d &\sim 1857.51 \text{ MeV} & \Rightarrow &t = 0.34 \text{ s} \end{aligned}$$

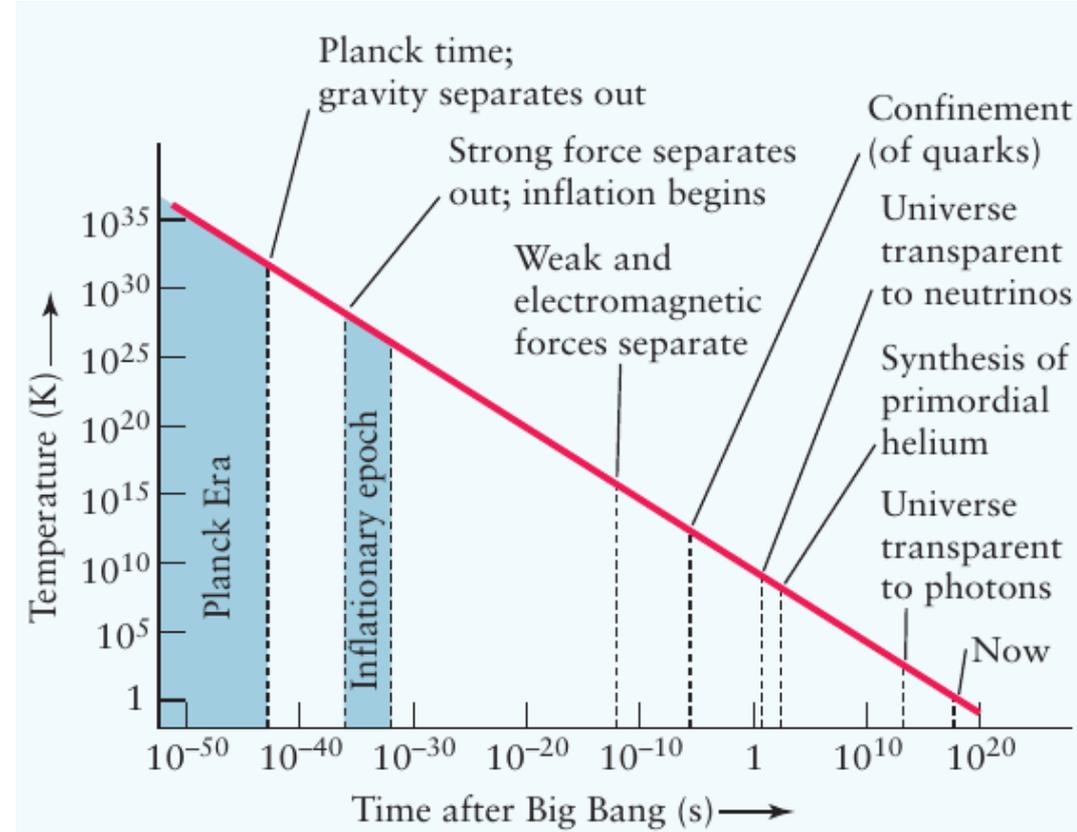
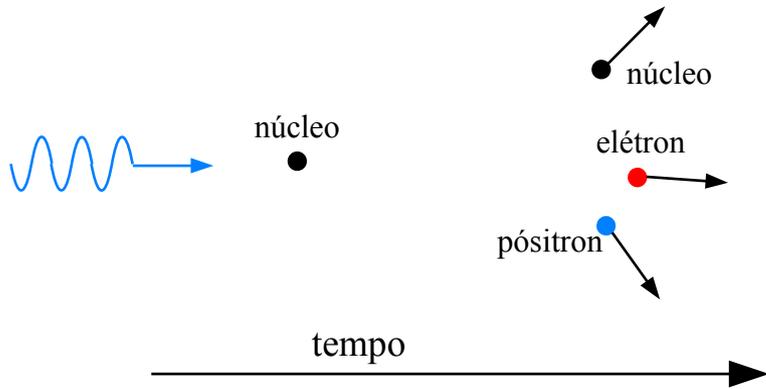
Após  $t = 0,34$  s ( $T = 2,6 \times 10^{10}$  K), deutério não “derrete” e a produção de elementos mais pesado inicia-se  $\rightarrow$  **nucleossíntese primordial** (SBBN).  $T$  diminui e poucos elementos pesados são formados. SBBN cessa quando  $T < 10^9$  K,  $t \sim 228$  s. Abundância resultante (75% H e 25% He) é similar às observadas nas estrelas da população II.



# Big Bang

Após 1,6 s ( $2m_e = 2 \cdot 511 \text{ KeV} \sim 1,2 \times 10^{10} \text{ K}$ ),  
produção de pares cessa.

Até então, antipartículas do elétron (pósitron)  
eram continuamente produzidas.  
A partir desse instante, a antimatéria restante  
se aniquila com a matéria e apenas matéria  
sobra no universo.



# Big Bang

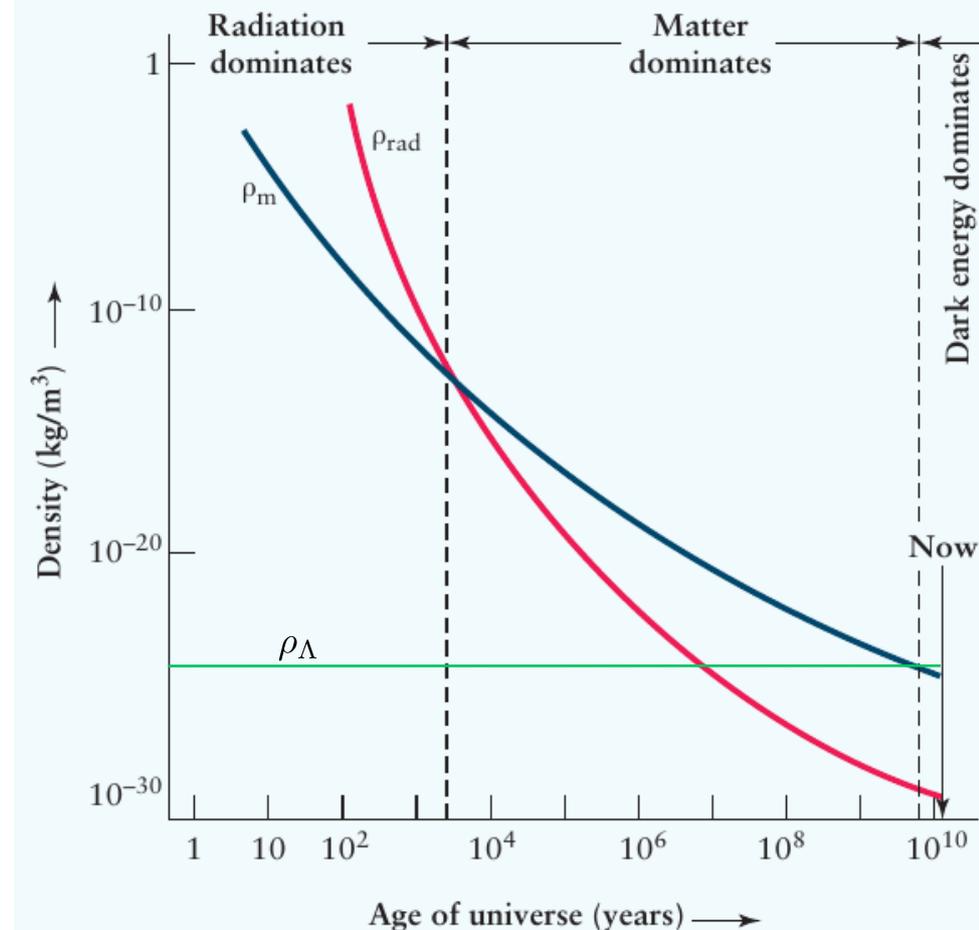
$T$  continua diminuindo  $\rightarrow$  densidade de energia da radiação (fótons) diminui mais rapidamente por causa do redshift cosmológico.

Em  $t \sim 30$  mil anos  $\rightarrow$  universo dominado pela matéria  $\rightarrow$  gravidade inicia a formação de estruturas.

$$T \propto t^{-2/3}$$

A 5 bilhões de anos atrás, a densidade de energia escura passou a dominar.

$$T \propto t^{-1/4}$$



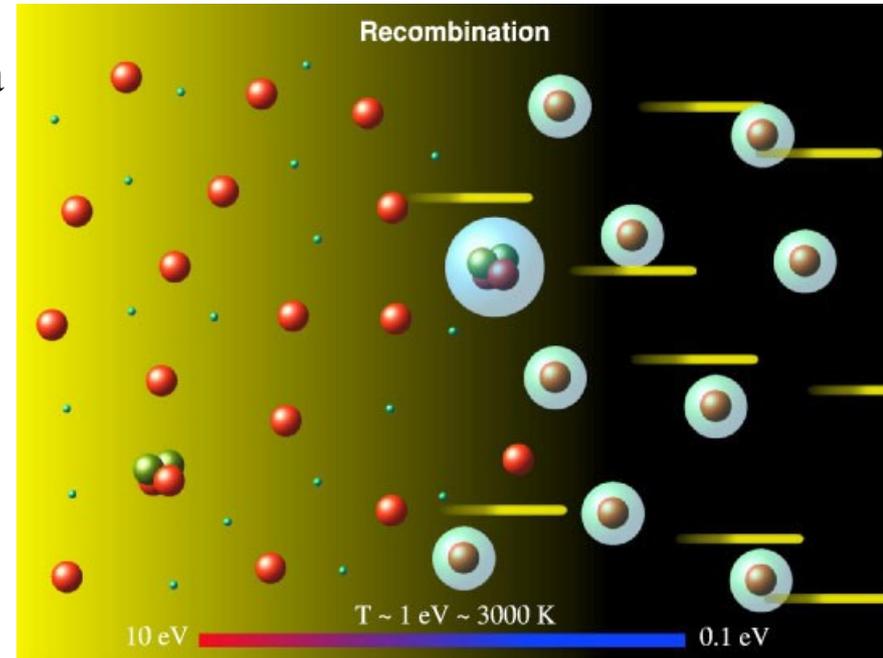
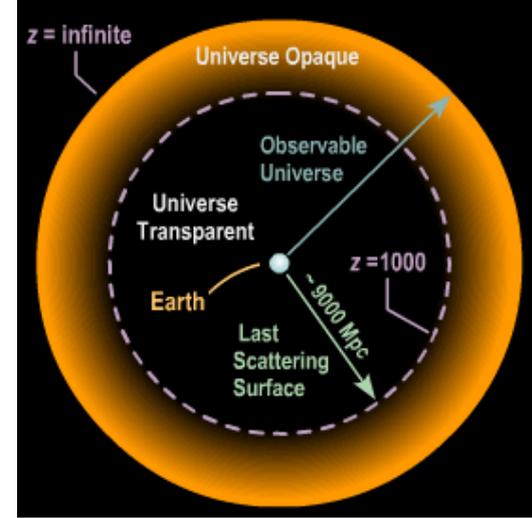
# Big Bang

Quando o universo ficou transparente?

Mesmo depois da nucleossíntese primordial, o universo ainda era muito quente e denso: plasma (**bola de fogo primordial**).

Em  $t \sim 380$  mil anos ( $T = 3$  mil K)  $\rightarrow$  matéria se torna neutra pela 1ª vez e a interação radiação-matéria diminui (desacoplamento). A partir desse momento, radiação e matéria deixam de estar em equilíbrio térmico  $\rightarrow$  **Radiação cósmica de fundo** é liberada. Corpo negro de  $T = 3$  mil K (na época).

Quando da neutralização, luz é emitida e absorvida por outro átomo que acaba se ionizando.  $\sim 50$  mil anos se passam até que a densidade de energia diminua a ponto da ionização se tornar desprezível e que toda a matéria fique completamente neutra e, conseqüentemente, fracamente interagente com a luz. Esse período é denominado de **recombinação**. Dá-se início a **era das trevas** (apesar do HI estar emitindo fótons de 21cm) até as primeiras estrelas se formarem em  $t \sim 200 - 400$  milhões de anos).



# Exercício

Os fótons da radiação cósmica foram espalhados pela última vez (antes de nos alcançar) quando o universo tinha  $\sim 380$  mil anos e  $\sim 3$  mil K de temperatura. Hoje há, em média, 411 desses fótons em cada  $\text{cm}^3$ , e eles são medidos como uma radiação de corpo negro de 2,725 K. Qual é o redshift cosmológico correspondente.

$$1) z = \Delta\lambda/\lambda = 3000/2,725 = 1101$$

$$2) z = \Delta\lambda/\lambda = (1/2,725 - 1/3000) / (1/3000) = 1100$$

$$3) z = \Delta\lambda/\lambda = (1/2,725 - 1/3000) / (1/2,725) = 0,9990$$

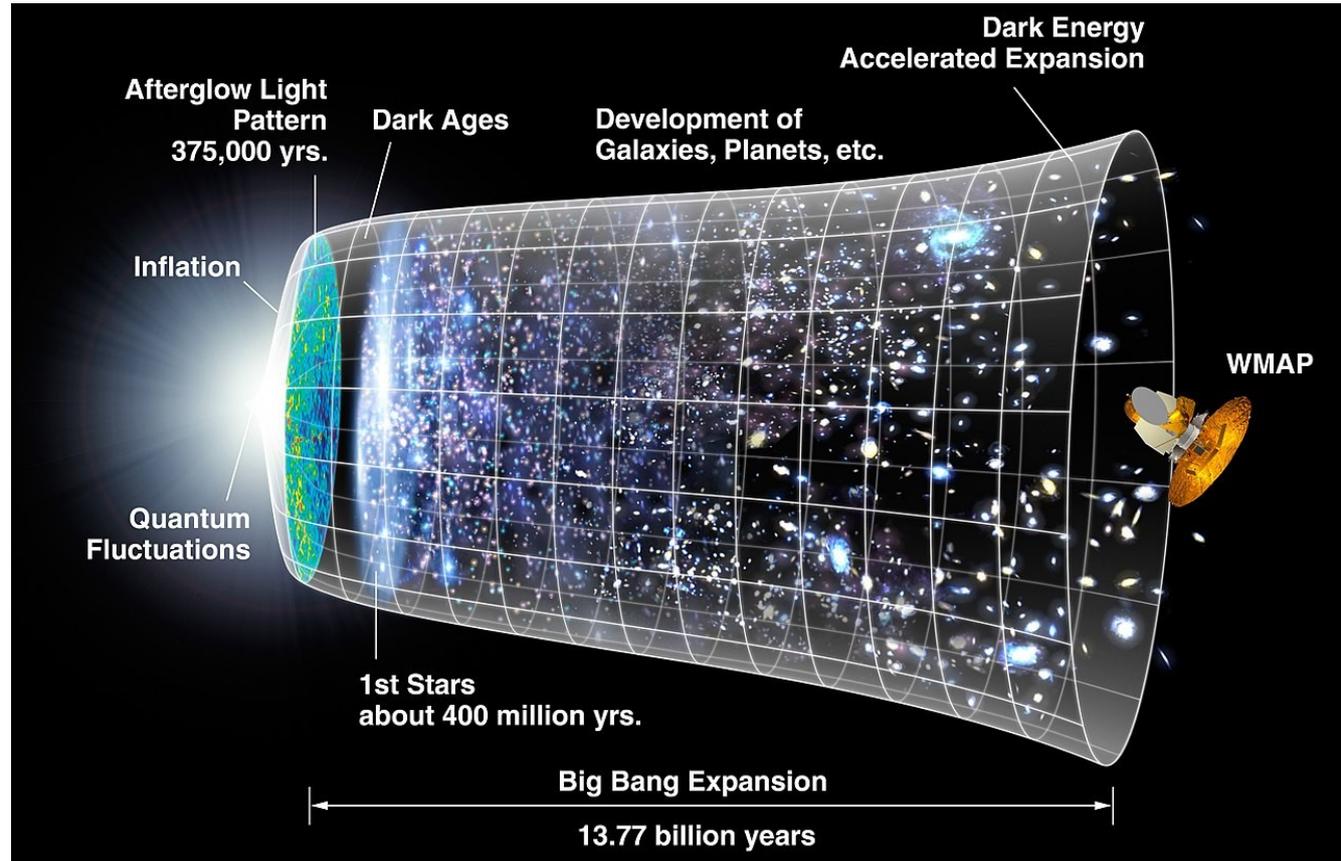
$$4) z = \Delta\lambda/\lambda = (1/2,725 - 1/3000) / (1/2,725 + 1/3000) = 0,9982$$

# Big Bang

Após a **recombinação**, como as galáxias e estrelas se formaram num universo homogêneo?

Flutuações de densidades (de origem quântica, princípio da incerteza) deram origem a ondas sonoras no plasma → flutuações de densidade na matéria neutra → estrelas, galáxias, aglomerados e super-aglomerados (a estrutura de larga escala do universo).

Essas flutuações de densidade (ondas acústicas) devem ser observadas na radiação cósmica de fundo (CMBR: “cosmic microwave background radiation”)



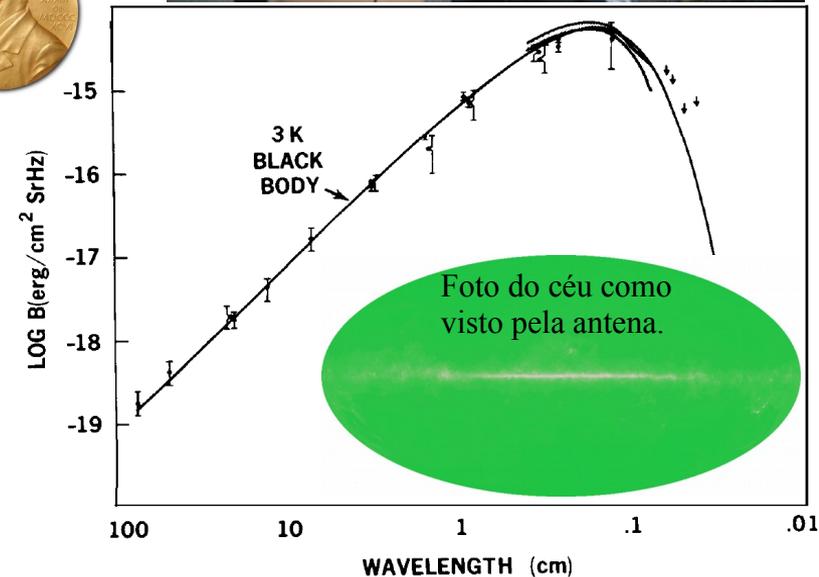
# Radiação cósmica de fundo

1960s: Penzias e Wilson (dos laboratórios Bell) usam um antena em forma de chifre para rádio-astronomia (que originalmente foi construída para comunicação com satélites ECHO e TELSTAR) e percebem um ruído (de fundo) para qualquer direção que apontassem a antena. Caracterizam o ruído como um corpo negro de  $T \sim 3\text{K}$ .

Nobel 1978: “for their discovery of cosmic microwave background radiation”.

No final dos anos 1940s e começo dos 50s, Ralph Alpher, Hans Bethe (apenas anedoticamente), Robert Herman e George Gamow fizeram a conexão entre cosmologia e física de partículas ao descreverem como teria sido os **5 primeiros minutos** do universo.

Nesta descrição, explicam a nucleossíntese primordial (abundância de H e He) e a predizem a radiação cósmica de fundo de sua temperatura.

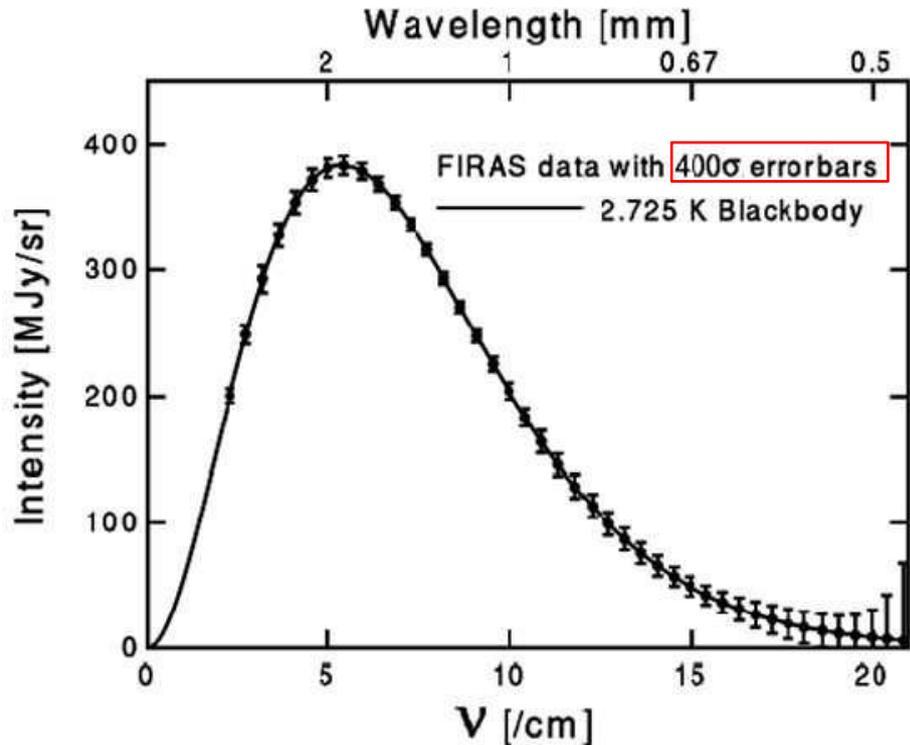


# Radiação cósmica de fundo

1989 – 94: Satélite COBE (“cosmic background explorer”).

Resolução angular:  $7^\circ$ .  $T = 2.725$  K. Mostram “flutuações” de  $300 \mu\text{K}$  na CMBR.

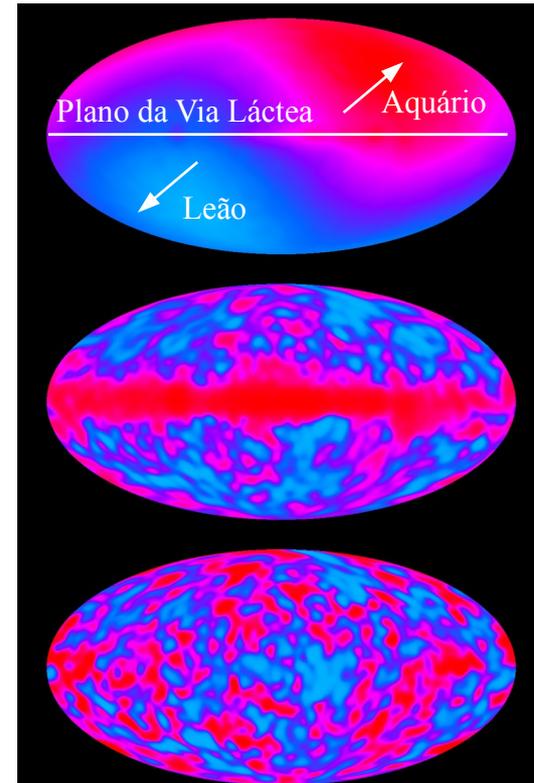
Nobel 2006 a John Mather e George Smoot “for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation”.



A concordância experimental com o espectro de corpo negro é bastante impressionante.

Em relação à CMBR, a Terra se desloca a  $371$  km/s em direção à constelação de Leão.

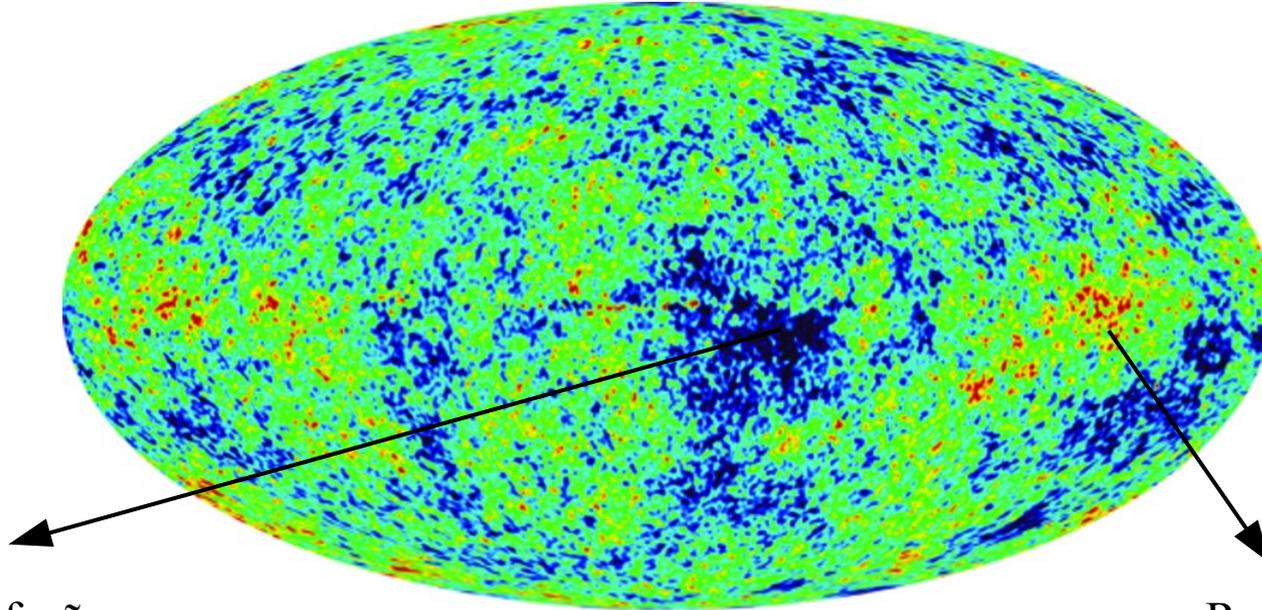
Regiões azuis/vermelhas são  $\sim 300 \mu\text{K}$  mais frias/quentes que a média.



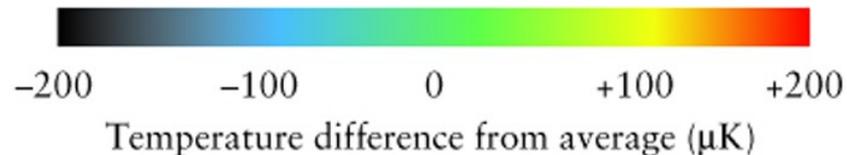
# Radiação cósmica de fundo

2001 – 2010: WMAP (“Wilkinson Microwave Anisotropy Probe”; <https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/>)  
Resolução angular: 13’.

Foto das **ondas acústicas** no universo quando da recombinação,  $t \sim 380$  mil anos;  $T \sim 3$  mil K.



Regiões de rarefação  
(frias) quando do  
desacoplamento



Regiões de compressão  
(quentes) quando do  
desacoplamento

# Radiação cósmica de fundo

2001 – 2010: WMAP (“Wilkinson Microwave Anisotropy Probe”; <https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/>)  
Resolução angular: 13’.

Foto das **ondas acústicas** no universo quando da recombinação,  $t \sim 380$  mil anos;  $T \sim 3$  mil K.

Análise harmônica dos modos acústicos.

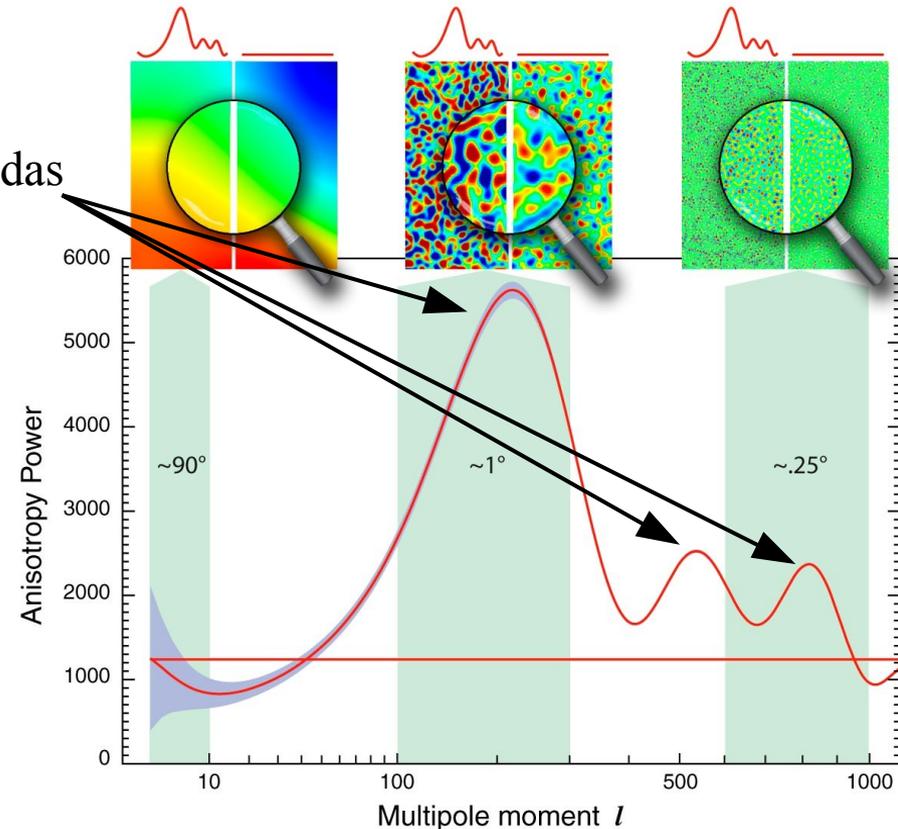
Eixo  $y$ : Energia relativa armazenada  
no modo acústico correspondente.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad \leftrightarrow \quad \lambda_\theta = \frac{2\pi}{\ell}$$

Harmônicos  $\rightarrow$   
comprimentos de ondas  
excitados

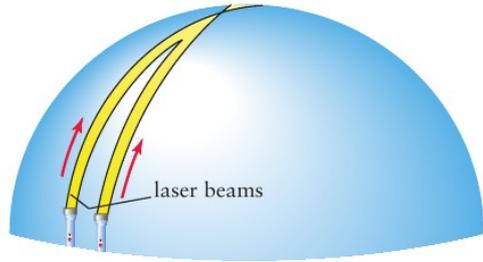
Harmônico fundamental:  $\ell \approx 200 \Rightarrow \lambda_\theta \approx \frac{\pi}{100} \sim 1.8^\circ$

Comprimento espacial correspondente (horizonte acústico):  $L \approx \lambda_\theta \times 13.4 \text{ Gal} \approx 421 \text{ Mal}$

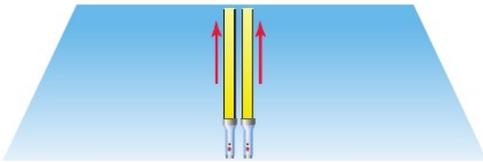


# CMBR e a geometria do universo

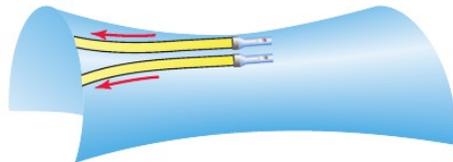
A teoria do BB prediz a intensidade e comprimento das flutuações de  $T$ :  
tamanho angular  $\sim 1^\circ$  se geometria for plana (compatível com as observações).



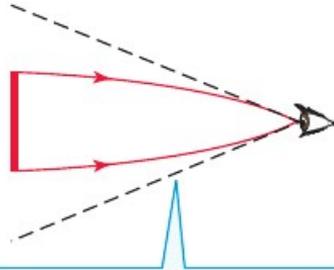
a Parallel light beams converge



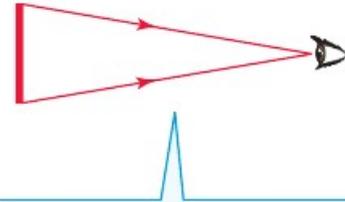
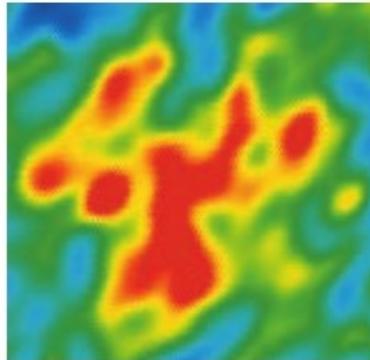
b Parallel light beams remain parallel



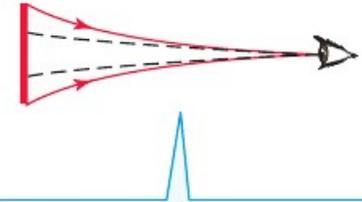
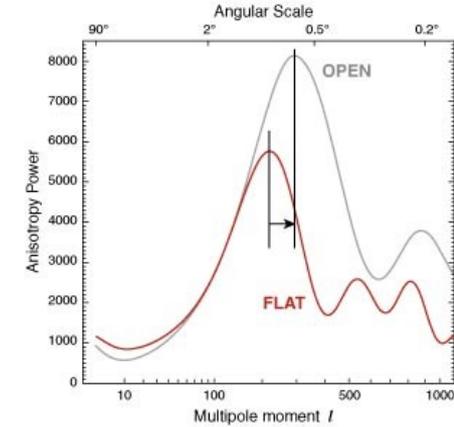
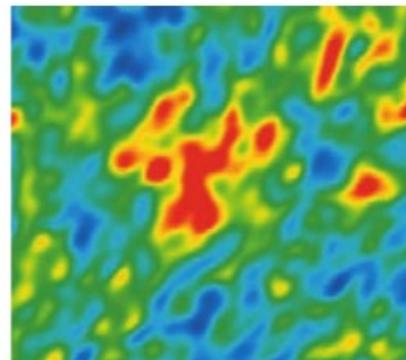
c Parallel light beams diverge



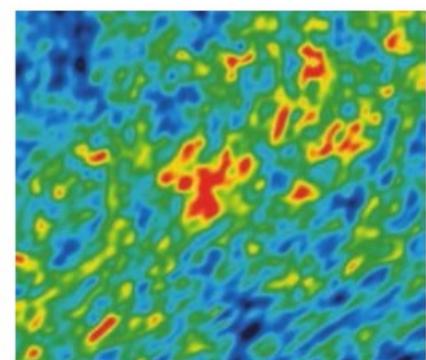
If the universe is closed,  
light rays from opposite  
sides of a hot spot bend  
toward each other ...



If the universe is flat,  
light rays from opposite  
sides of a hot spot do not  
bend at all ...



If the universe is open,  
light rays from opposite  
sides of a hot spot bend  
away from each other ...

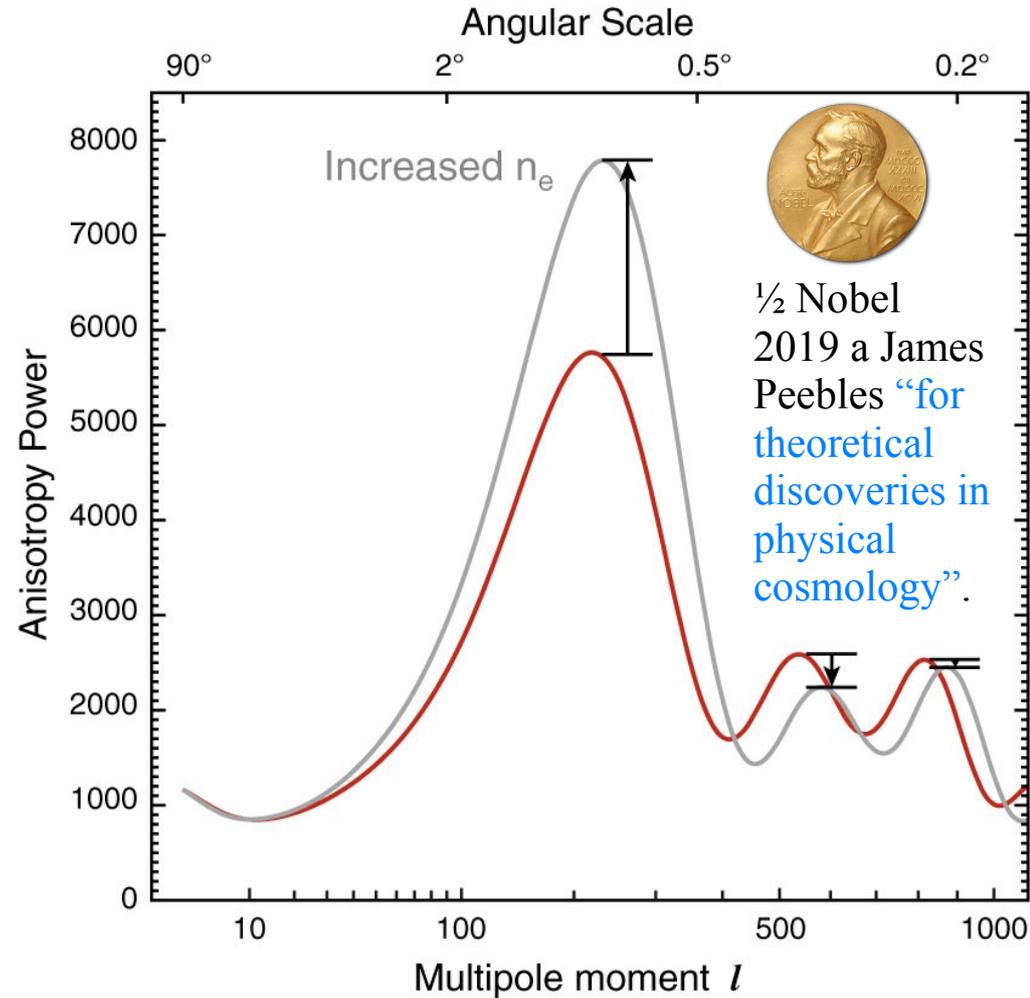


# CMBR e parâmetros cosmológicos

Quanto maior a densidade matéria usual (elétrons e prótons) em relação à radiação, mais fortemente respondem os modos harmônicos ímpares ( $1^\circ$ ,  $3^\circ$ , etc) à gravidade da matéria escura. Medindo a altura relativa dos picos pares e ímpares, podemos determinar a densidade relativa entre matéria, matéria escura e radiação.

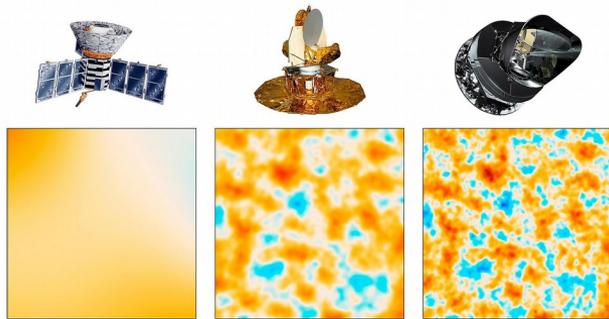
Aumentado a densidade relativa de matéria em relação à radiação, a velocidade do som diminui (porque precisa-se vencer um poço gravitacional maior) e, conseqüentemente, a distância relativa entre os picos muda porque o comprimento do harmônico fundamental diminui.

Em suma, a análise harmônica da CMBR nos fornece informações sobre as propriedades do universo jovem.



# Radiação cósmica de fundo

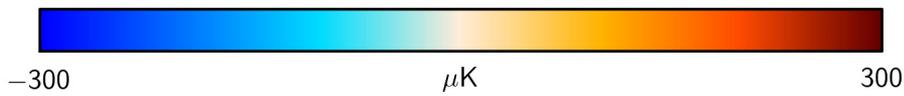
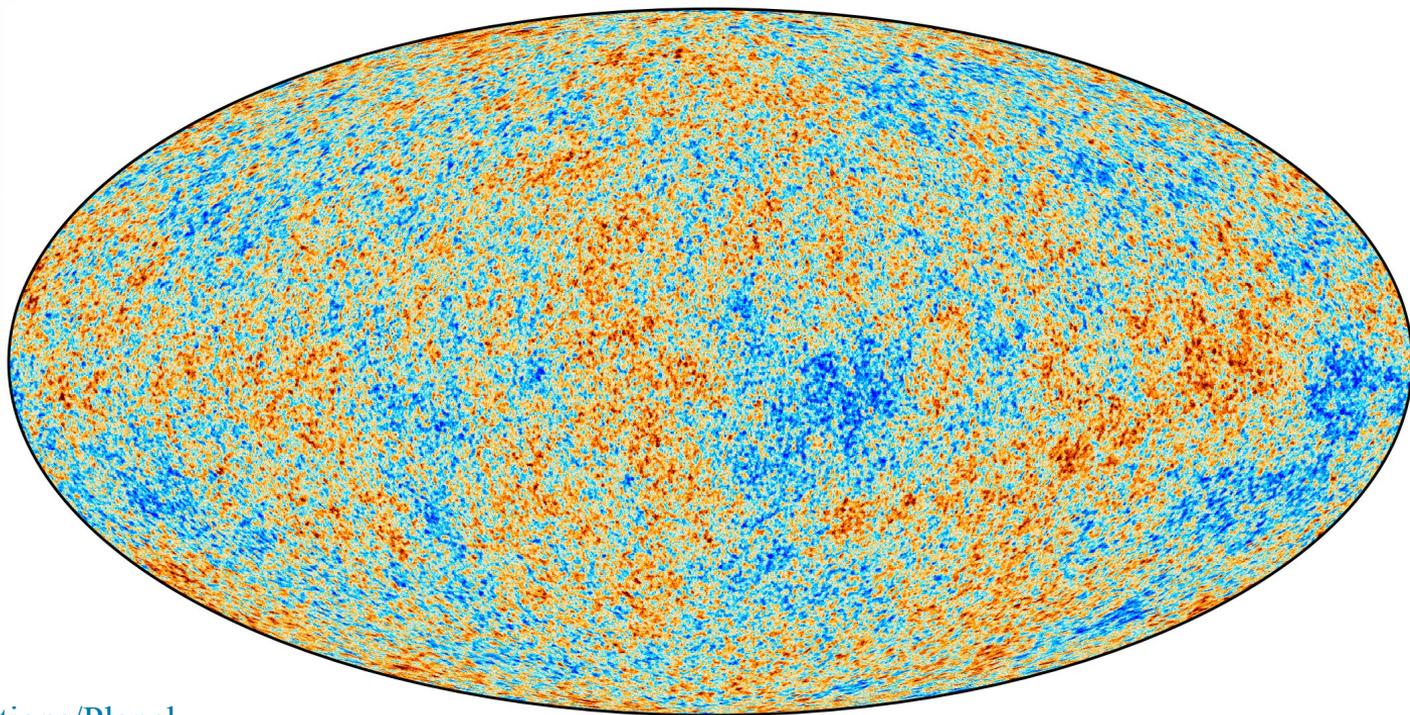
Satélite Planck: coleta de dados de 2009 – 2013. Últimos resultados publicados em 2018.  
Resolução angular:  $(5 - 10)'$ . Resolução em temperatura  $\Delta T/T \sim 10^{-6}$



COBE

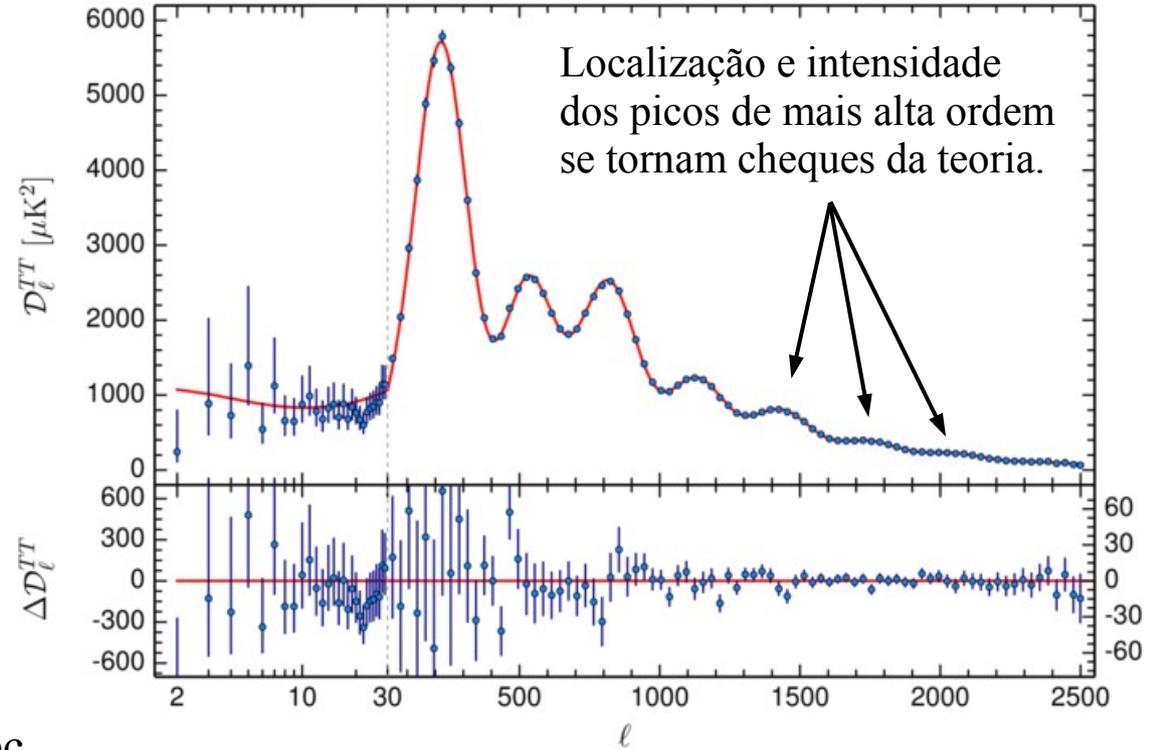
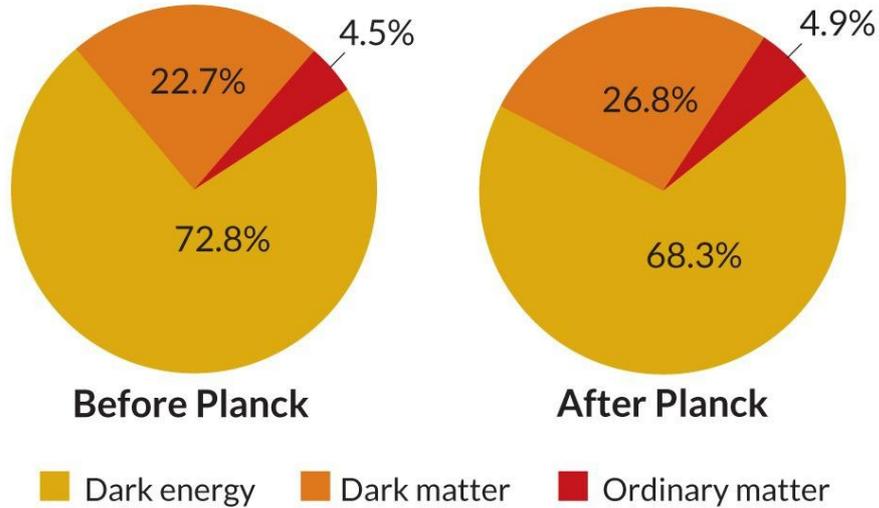
WMAP

Planck



[https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Operations/Planck](https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Planck)  
<https://www.youtube.com/watch?v=PgLjdIB19Hc>  
<https://www.youtube.com/watch?v=IeySvmt5ELk>

# Radiação cósmica de fundo



Constante de Hubble:  $67.66 \pm 0.77$  (km/s)/Mpc

Idade:  $13.798 \pm 0.037$  bilhões de anos

Modelo cosmológico:  $\Lambda$ CDM

# O destino do universo

Universo inicial com alta concentração de matéria → fortes campos gravitacionais → necessidade de Relatividade Geral (não é objetivo deste curso, mas RG é a base da cosmologia moderna).

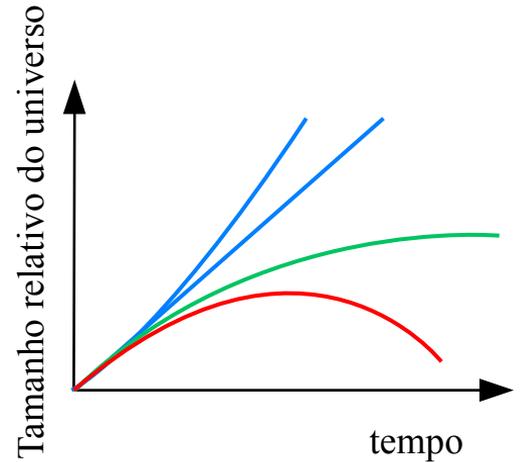
Possibilidades: **expansão para sempre**, **expansão para assintoticamente**, ou **para e se contrai**.

**Densidade crítica:**

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad v = H_0 r \quad r = \text{distância até uma galáxia}$$

$$v = v_{\text{esc}} \Rightarrow \rho_{\text{crit}} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 9.5 \times 10^{-27} \text{kg/m}^3 \\ \approx 6 \text{ prótons / m}^3$$

$$\rho_{\text{matéria luminosa observada}} \approx 10^{-28} \text{kg/m}^3$$



Entretanto, devemos também considerar a densidade de matéria escura e outras formas de energia.

# O problema da planicidade

Densidade crítica:  $\rho_{\text{crit}} = \frac{3H^2}{8\pi G}$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}m \left[ (Hr)^2 - \frac{8\pi Gr^2 \rho}{3} \right]$$

Densidade adimensional:  $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{crit}}}$

Como  $\Omega$  varia com a expansão?

$$\Rightarrow H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{2E}{mr^2} \quad (\text{Equação de Friedman para } k = \Lambda = 0.)$$

$$\Rightarrow \Omega = \begin{cases} r_0/r, & E \neq 0 \\ 1, & E = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow H^2 \propto \begin{cases} r^{-2}, & E \neq 0 \\ \rho \propto r^{-3}, & E = 0 \end{cases}$$

Ou seja, se  $\Omega = 0,5$  agora, após o universo se expandir de um fator de 2,  $\Omega \rightarrow 0,25$ . Desde a recombinação,  $r \rightarrow 1000r$ . Logo, para ser compatível com os valor observado de  $\Omega$  próximo de 1, na época de recombinação  $|\Omega - 1| < 1/1000$ . E mais próximo de 1 nas épocas anteriores. Ou seja, a energia total  $E$  tem que ser incrivelmente próxima da 0 (universo plano).

A teoria de inflação resolve esse problema porque implica em  $\Omega \equiv 1$ . Após a expansão, qualquer geometria antes da inflação se torna plana logo após.

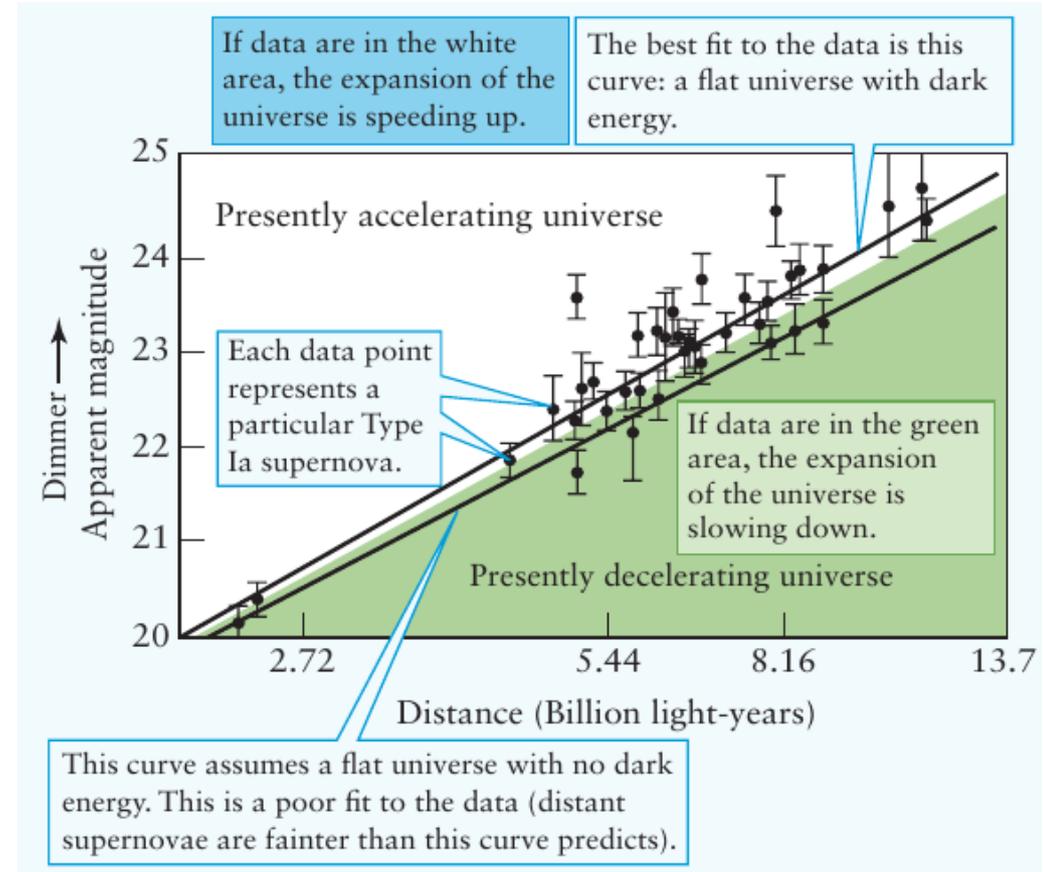
# Universo em expansão acelerada

Dados de supernovas Ia distantes indicam que a constante de Hubble não é constante.

Quanto mais distante, mais tênue é o brilho da supernova em comparação com o esperado pela lei de Hubble, ou seja, a supernova está mais distante do que prediz a lei de Hubble.

Em suma, descobriu-se que a expansão do universo está acelerando.

(Nobel de 2011 para Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess “for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae”.)



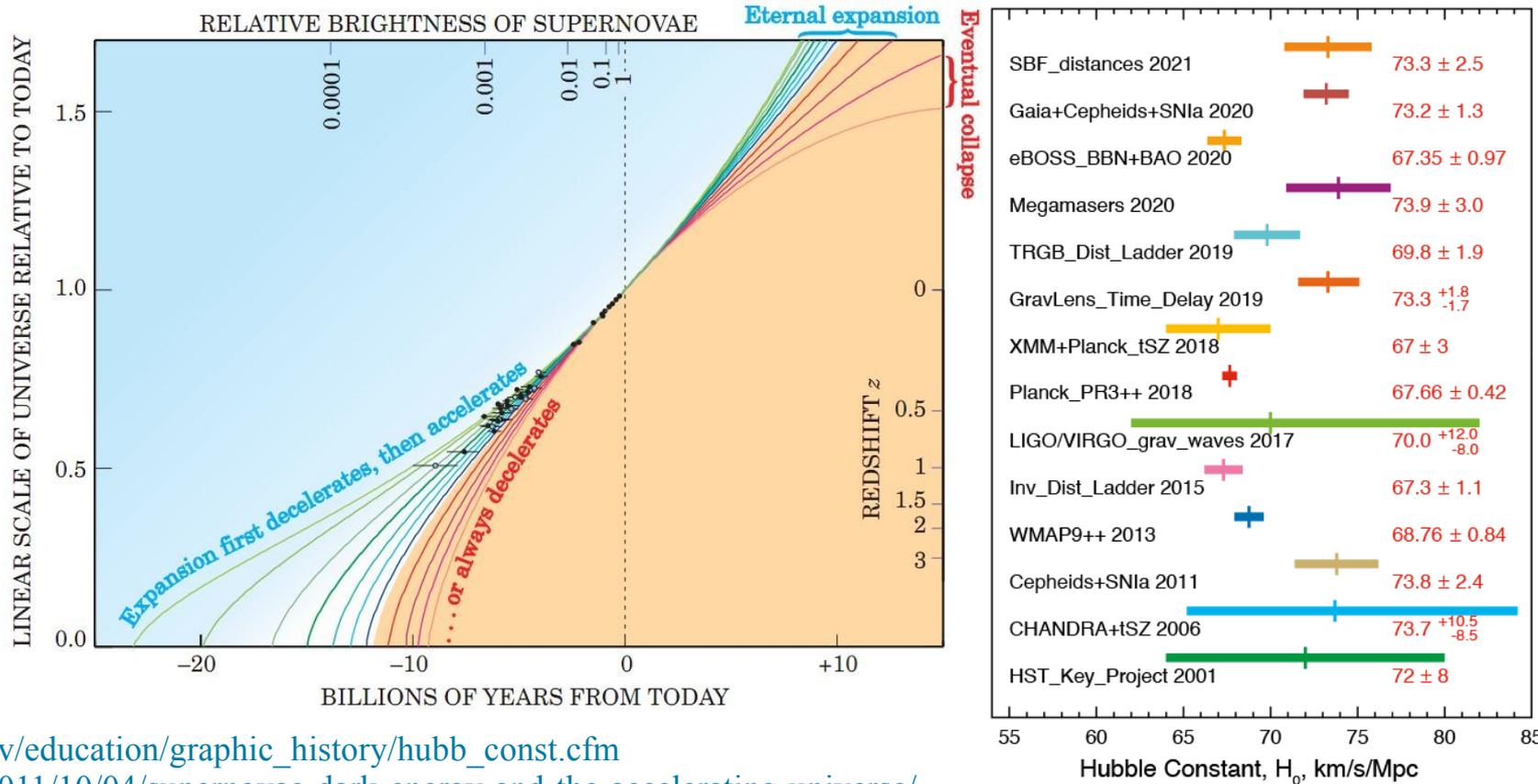
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423413>

<https://doi.org/10.1073/pnas.1424299112>

# Universo em expansão acelerada

O que está provendo a energia para uma expansão acelerada? Energia escura.  
Sua natureza é ainda mais misteriosa do que a matéria escura.

Recentemente, medidas não totalmente compatíveis da constante de Hubble tem sido reportadas. A razão para isso é tópico de intensa pesquisa.



[https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic\\_history/hubb\\_const.cfm](https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/hubb_const.cfm)

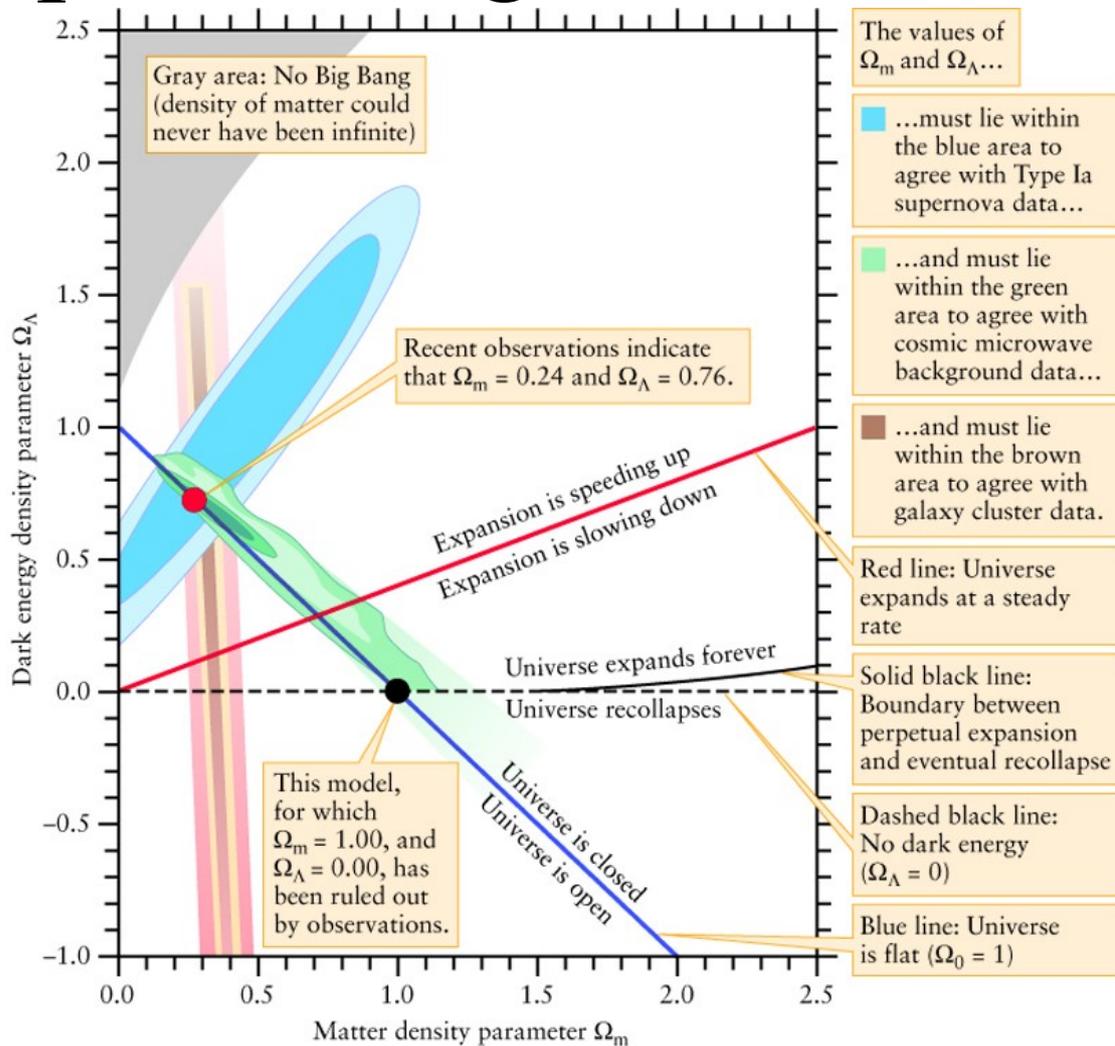
<https://physicsforme.com/2011/10/04/supernovae-dark-energy-and-the-accelerating-universe/>

# Resumo sobre a expansão e geometria

Os modelos de Big Bang têm dois parâmetros que determinam a geometria e expansão do universo: a densidade de matéria (incluindo escura)  $\Omega_m$  e energia escura  $\Omega_\Lambda$  (parametrizada pela constante cosmológica).

Cada ponto do diagrama ao lado corresponde aos modelos de Big Bang com valores diferentes para esses parâmetros. O nosso objetivo é determinar qual desses modelos descreve o nosso universo. A curva azul corresponde à geometria plana e a vermelha a um universo em expansão constante.

Atualmente, os dados observacionais indicam que nosso universo é praticamente plano e em expansão acelerada.



# Lei de Hubble e o paradoxo de Olbers

Apenas a expansão do universo é uma possível solução para o paradoxo de Olbers (da noite escura)?  
Não!

Mostra-se que a expansão do universo, apesar de deslocar os fótons para o vermelho, reduz a intensidade luminosa apenas pela metade.

[Wesson & Valle & Stabell, Astrophysical Journal 317, 601 \(1987\)](#)

Imagine que a constante de Hubble fosse muito menor do que a atual. O universo observável seria muito maior a ponto de que todas as estrelas observáveis pudessem cobrir todo o céu (vide lista de exercícios).

Outra maneira de pensar é num universo cuja expansão nem sempre foi a mesma. Imagine que o universo começou a se expandir apenas recentemente. Então a noite seria clara e a atual expansão apenas diminuiria a intensidade do brilho.

(A solução é o universo ser finito no tempo. Evidentemente, a expansão tem sua influência no brilho do céu.)