

# Astrofísica Moderna

## Cosmologia

*Prof. Aion Viana e Prof. Vitor de Souza*

Referencias principais da aula:

“An introduction to modern astrophysics”, B.W.Carroll and D.A. Ostlie

“Astronomia e astrofísica”, K. de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva

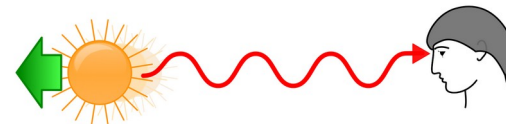
# Lei de Hubble

**Desvio para o vermelho (redshift):**  $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ ,

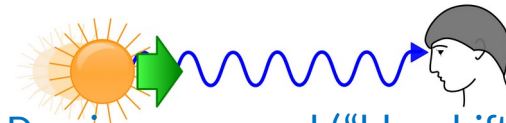
onde:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}}$$

Efeito Doppler para luz ou Doppler relativístico



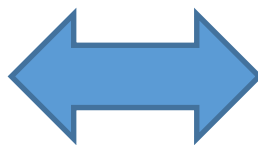
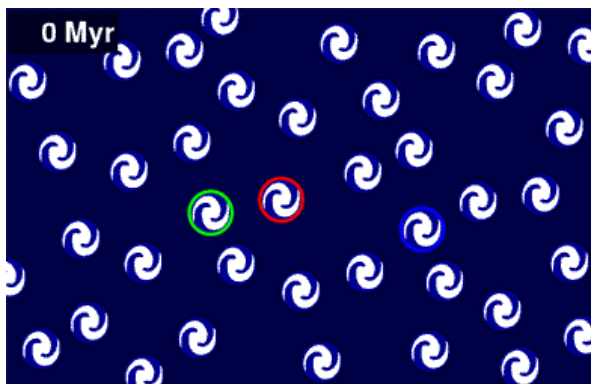
Desvio para o vermelho ("redshift")



Desvio para o azul ("blueshift")

**Redshift não-relativístico:**  $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$  (para  $z < 0.2$ )

**Redshift relativístico:**  $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{(1+v/c)}{(1-v/c)}} - 1$   $\longleftrightarrow$   $\frac{v}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$



Hubble descobriu que o Universo está em expansão

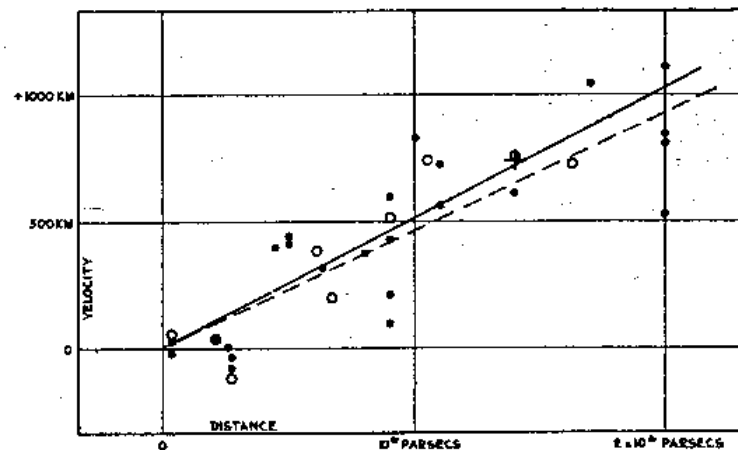


FIGURE 1

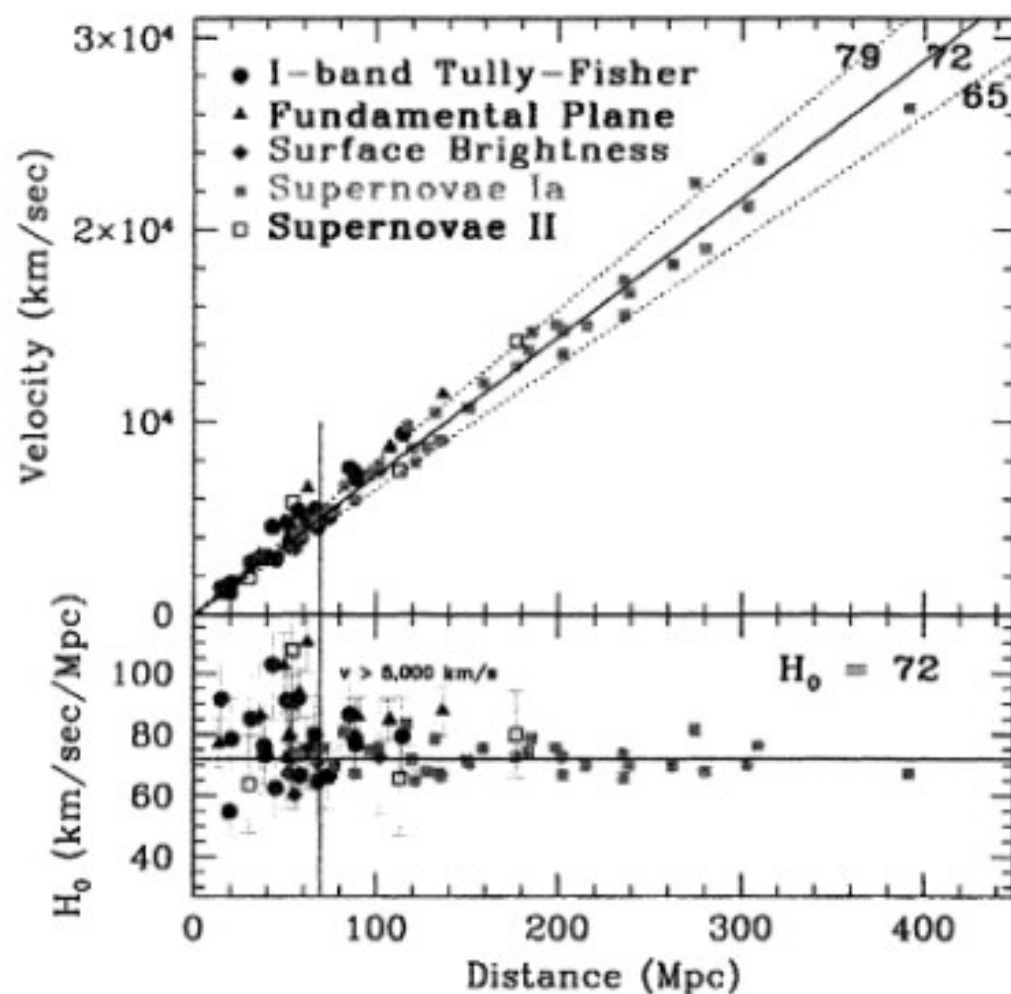
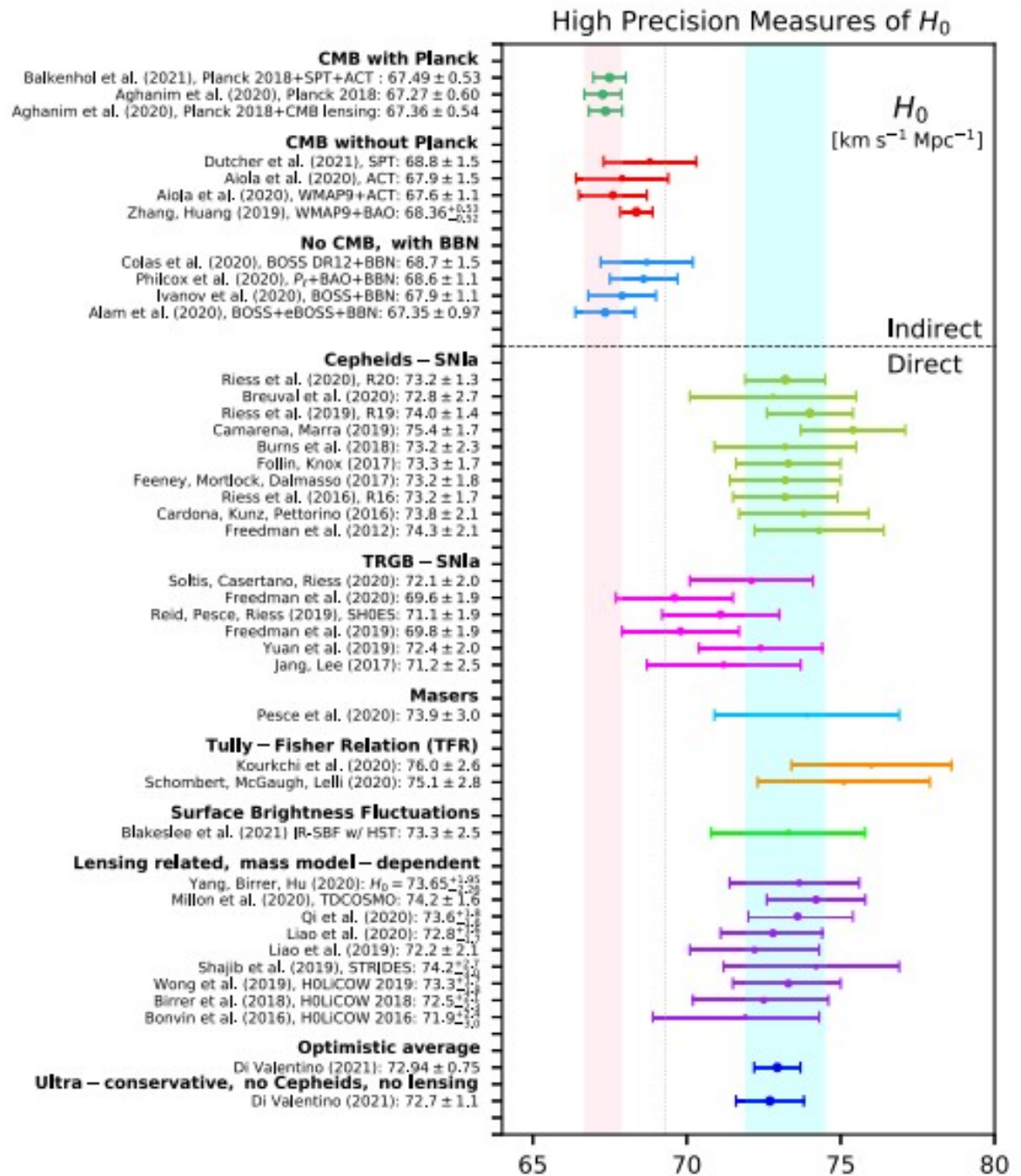


Figure 1.6. Hubble diagram from the Hubble Space Telescope Key Project (Freedman *et al.*, 2001) using five different measures of distance. Bottom panel shows  $H_0$  vs distance with the horizontal line equal to the best fit value of  $72 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

# In the realm of the Hubble tension: a review of solutions

Eleonora Di  
Valentino et al 2021  
Class. Quantum  
Grav. 38 153001



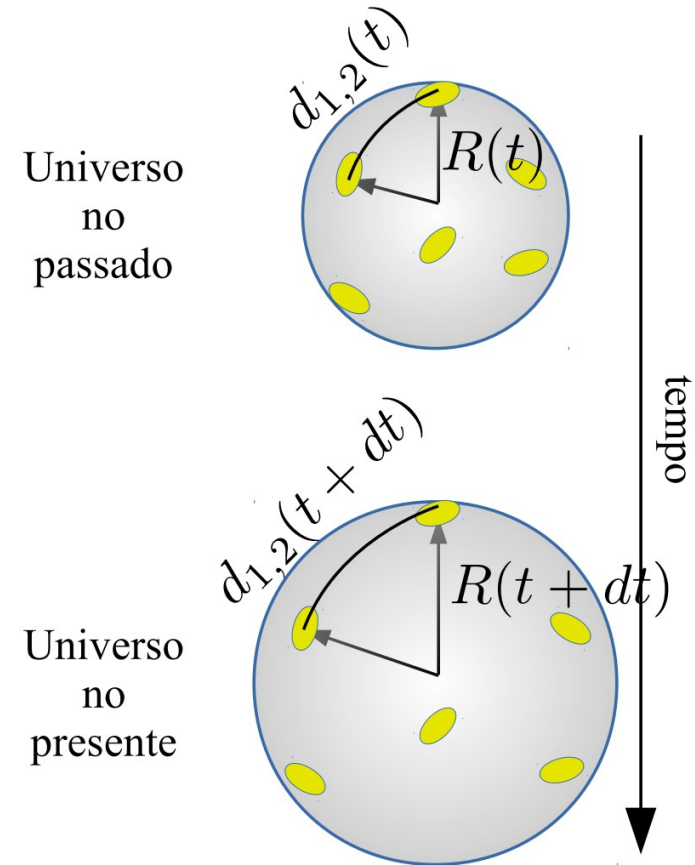
# Lei de Hubble e o tempo de Hubble

Supondo uma taxa de expansão constante  $H_0$

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

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

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



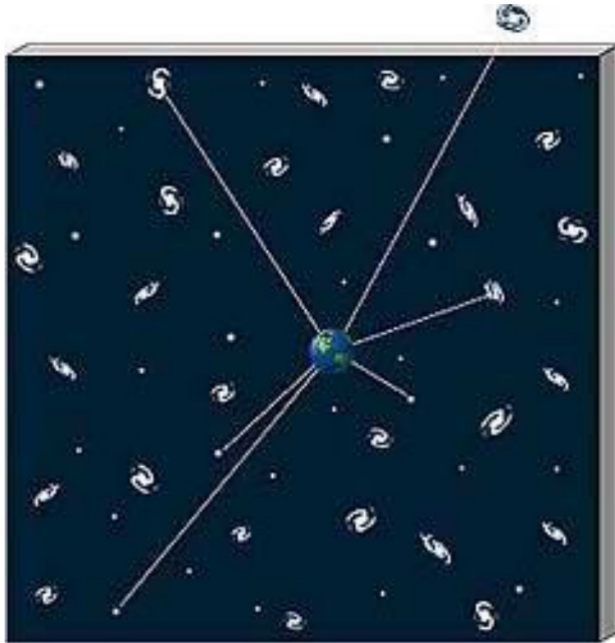
# Lei de Hubble e o raio de Hubble

Supondo uma taxa de expansão constante  $H_0$

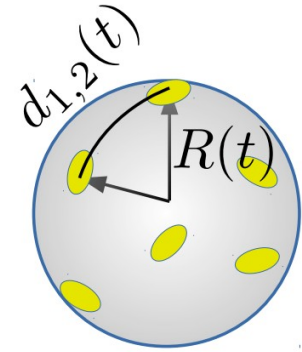
$$r_H = \frac{c}{H_0} \approx 13.8 \pm 0.8 \text{ bilhões de anos-luz}$$

Idade do Universo

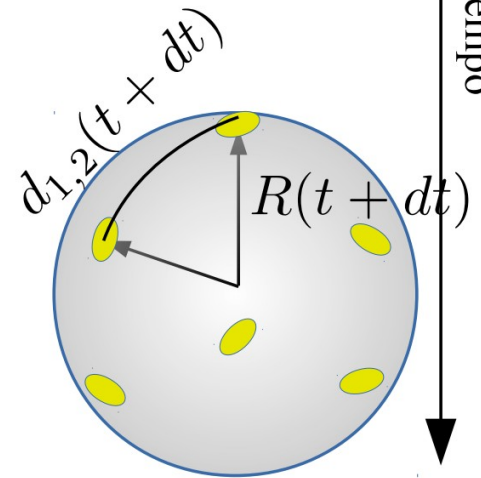
Vemos apenas uma parte finita do Universo:  
Explicação do Paradoxo de Olbers



Universo  
no  
passado



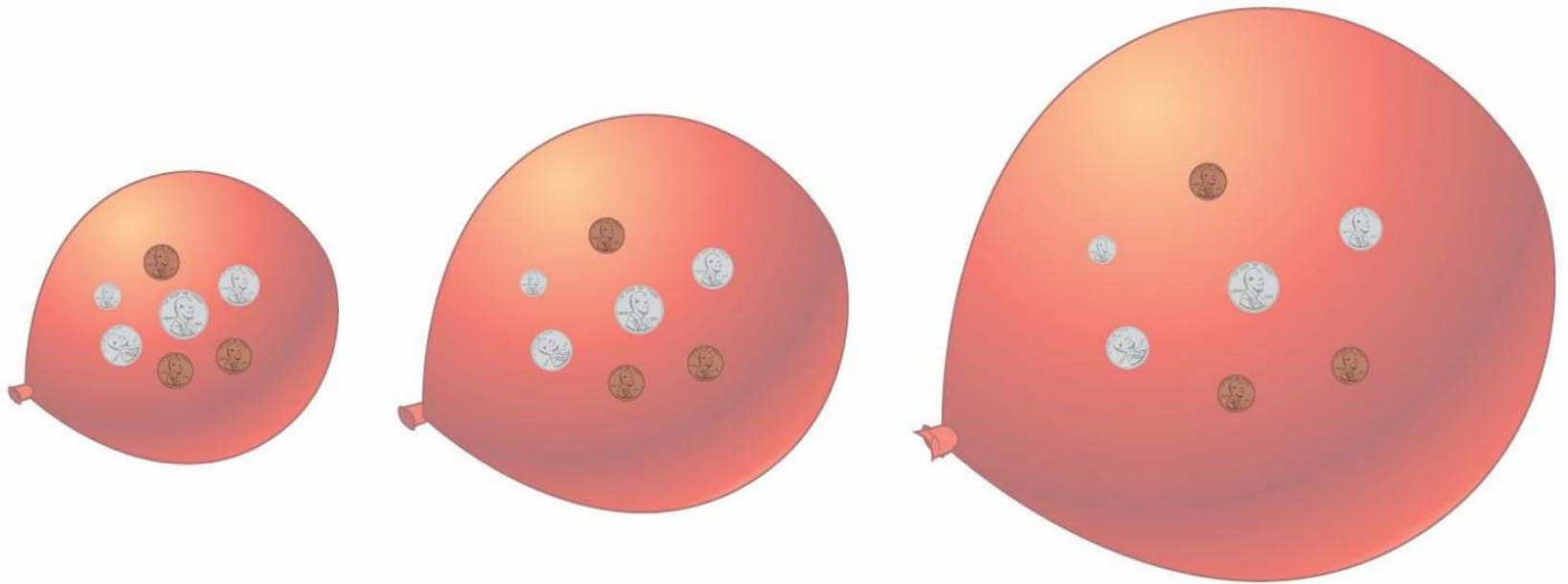
Universo  
no  
presente



tempo



# O Big Bang



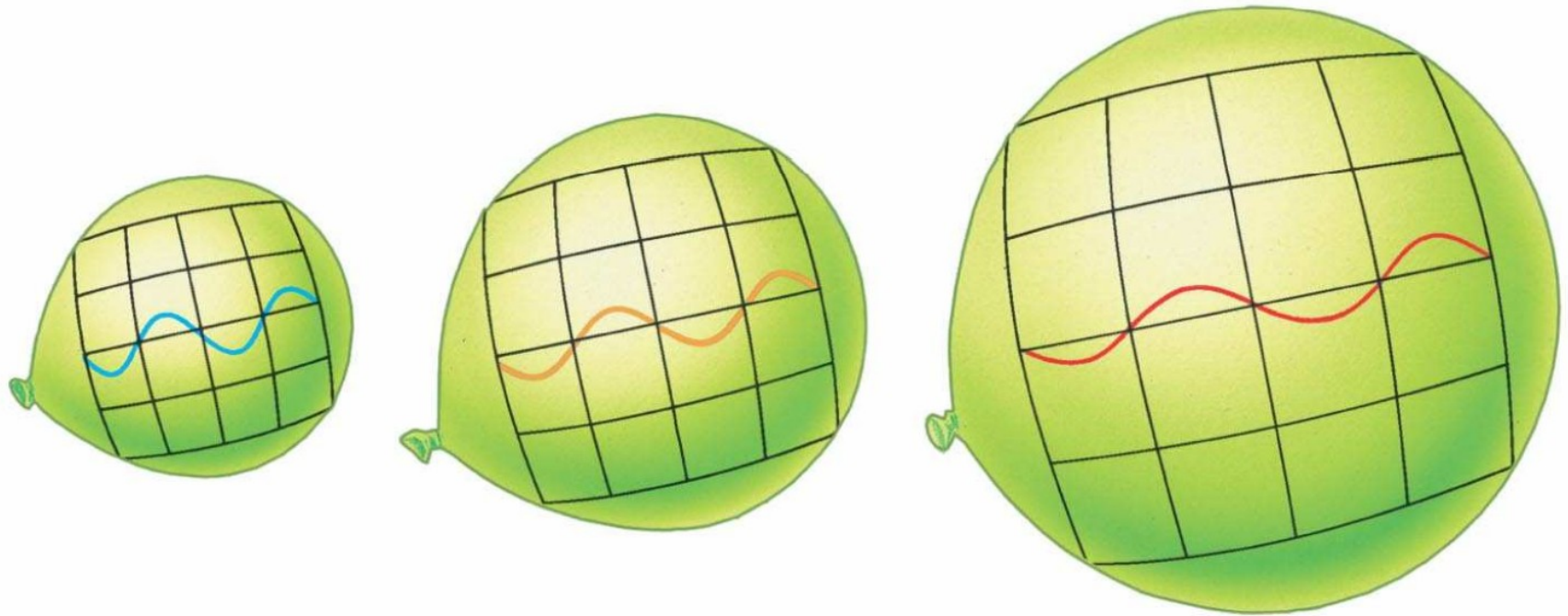
Analogia com moedas na superfície de um balão.

Todas as moedas vêm as demais se afastando.

Se o balão murchar totalmente, todas as moedas vão para o mesmo lugar.

Não há ponto privilegiado no balão.

# Redshift cosmológico



O comprimento de onda da luz muda devido a expansão do Universo.



# Destino do Universo: approach newtoniano

**Modelo simplificado: Universo de “poeira” sem pressão:**

Universo em expansão contendo somente “poeira” de densidade uniforme  $\rho(t)$  sem pressão (**Universo homogêneo e isotrópico**). Uma casca esférica de massa  $m$  e raio  $r(t)$  se expande com velocidade de recessão  $v(t) = dr(t)/dt$  em relação a uma origem arbitrária:

Energia total do sistema:

$$K(t) + U(t) = E.$$

Energia total é definida como:

$$E = -\frac{1}{2}mkc^2\varpi^2$$

onde  $k$  é uma constante de unidade (comprimento)<sup>-2</sup> e  $\varpi$  representa o raio da esfera hoje ( $t_0$ )  $\rightarrow \varpi = r(t_0)$ . Então,

$$\frac{1}{2}mv^2(t) - G\frac{M_r m}{r(t)} = -\frac{1}{2}mkc^2\varpi^2.$$

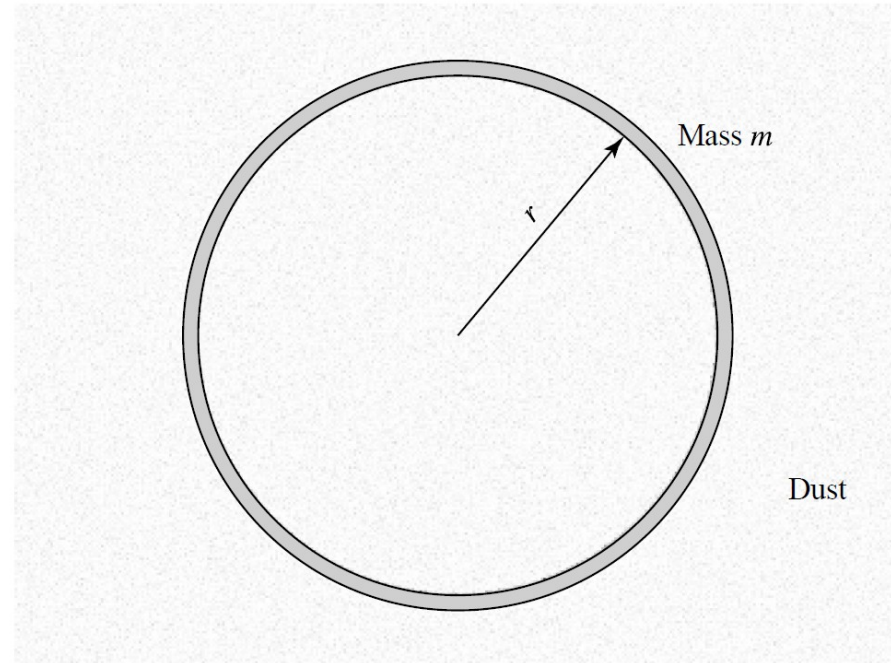


FIGURE 29.2 Spherical mass shell in a dust-filled universe.

# Destino do Universo: approach newtoniano

$$\frac{1}{2}mv^2(t) - G \frac{M_r m}{r(t)} = -\frac{1}{2}mkc^2\varpi^2.$$

Massa no interior da esfera:

$$M_r = \frac{4}{3}\pi r^3(t)\rho(t).$$

Note que apesar da densidade mudar,  $r^3(t)\rho(t)$  permanece constante. Então,

$$(29.2) \quad v^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho r^2 = -kc^2\varpi^2.$$

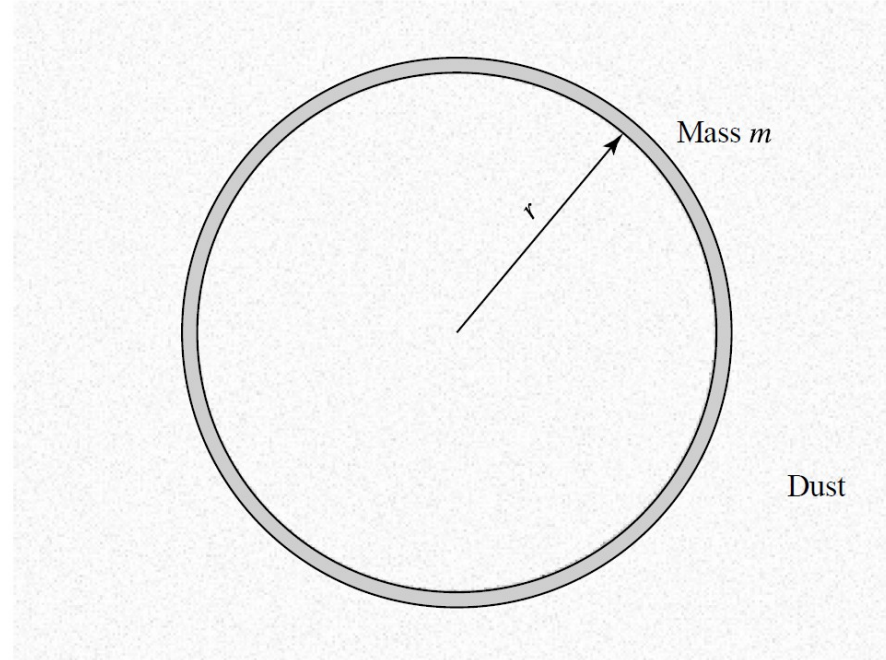


FIGURE 29.2 Spherical mass shell in a dust-filled universe.

- **Se  $k>0$** , a energia total da casca é negativa, o **universo** está **ligado**, ou fechado. Nesse caso a **expansão** irá parar algum dia e o universo irá **começar a se contrair**.
- **Se  $k<0$** , a energia total da casca é positiva, o **universo** está **não-ligado**, ou aberto. Nesse caso a **expansão continua para sempre**.
- **Se  $k=0$** , a energia total do Universo é zero, o **universo é plano**, nem aberto nem fechado. Nesse caso a **expansão continua freando, até parar quando  $t \rightarrow$  infinito**.

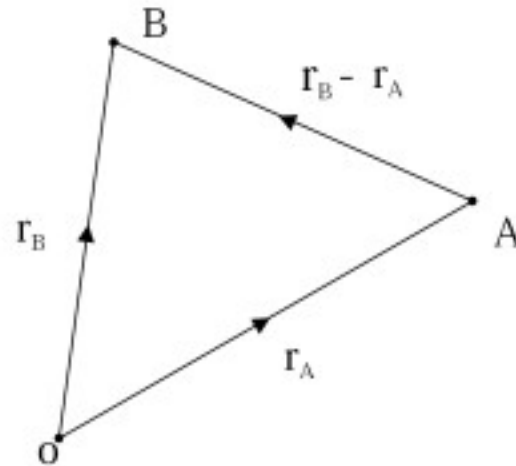


Figure 2.1: All observers see galaxies expanding with the same Hubble law.

$$\mathbf{v}_A = H_0 \cdot \mathbf{r}_A \quad (2.1)$$

and

$$\mathbf{v}_B = H_0 \cdot \mathbf{r}_B \quad (2.2)$$

where  $\mathbf{v}$  and  $\mathbf{r}$  are respectively the velocity and position vectors and the subscript 0 is used to indicate the present time.

By the rule of vector addition, the recession velocity of galaxy  $B$  as seen by an observer on galaxy  $A$  is

$$\mathbf{v}_{BA} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A = H_0 \mathbf{r}_B - H_0 \mathbf{r}_A = H_0 (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) \quad (2.3)$$

In a homogeneous universe every particle moving with the substratum has a purely radial velocity proportional to its distance from the observer. As eq. 2.3 can be written for *any* two particles, we can change to a more convenient coordinate system, known as **comoving** coordinates. These are coordinates that are carried along with the expansion, so that we can express the distance  $\mathbf{r}$  as a product of the comoving distance  $\mathbf{x}$  and a term  $a(t)$  which is a function of time only:

$$\mathbf{r}_{BA} = a(t) \cdot \mathbf{x}_{BA} \quad (2.4)$$

The original  $\mathbf{r}$  coordinate system, which does not expand, is usually known as physical coordinates.

The term  $a(t)$  is the scale factor of the universe, and it tells us how physical separations grow with time, since the coordinate distances  $\mathbf{x}$  are by definition fixed. Deriving an equation for the universal expansion thus reduces to determining a function which describes  $a(t)$ .

In Newtonian cosmology this is done by considering the forces acting on masses A, B, C, D on a sphere of radius  $r$  centred at O, as in Figure 2.2.

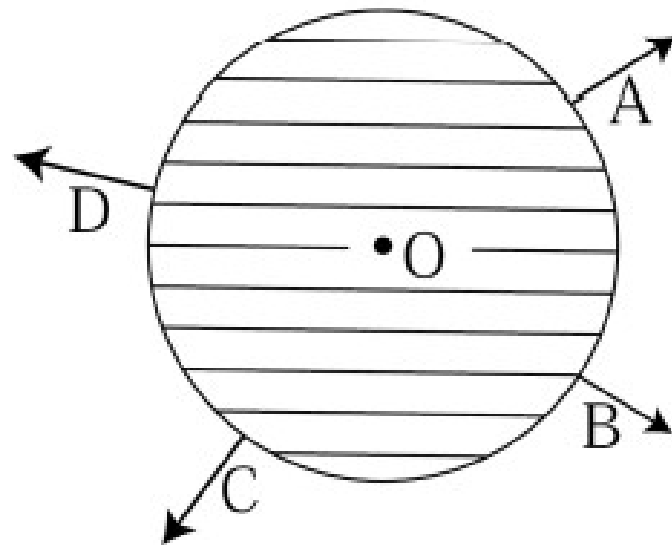


Figure 2.2: Birkhoff's theorem: the force acting on A, B, C, D—which are particles located on the surface of a sphere of radius  $r$ —is the gravitational attraction from the matter internal to  $r$  only, acting as a point mass at O.

Birkhoff's theorem states that the net gravitational effect of a uniform external medium on a spherical cavity is zero—in other words, the force acting on A, B, C, D is the gravitational attraction from the matter  $M$  internal to  $r$  only, which acts as a point mass at O. We can then write the total energy of a particle of mass  $m$  at A, B, C, D as the usual sum of kinetic and gravitational potential energy

$$U = T + V = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 - \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 - \frac{4\pi}{3}G\rho r^2 m \quad (2.5)$$

where the dot denotes differentiation with respect to time,  $\rho$  is the density of matter within the sphere of radius  $r$ , and  $G$  is Newton's gravitational constant.

Substituting (2.4) into (2.5) we have:

$$U = \frac{1}{2}m\dot{a}^2 x^2 - \frac{4\pi}{3}G\rho a^2 x^2 m \quad (2.6)$$

which can be re-arranged into the familiar form of the **Friedmann equation**

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} \quad (2.7)$$

where

$$kc^2 = -\frac{2U}{mx^2} \quad (2.8)$$

# Destino do Universo: approach newtoniano

Para qualquer casca esférica:

$$r(t) = R(t)\bar{\omega}. \quad (29.3)$$

onde  $r(t)$  é a distância coordenada,  $\bar{\omega}$  é a distância comovente e  $R(t)$  é um fator de escala (ex:  $R(t_0) = 1$ )

Relação entre  $R(t)$  e redshift  $z$ :

$$R = \frac{1}{1+z},$$

um redshift de 3 significa que o Universo tinha 1/4 do tamanho atual.

Como  $r^3(t)\rho(t)$  é sempre constante,

$$R^3(t)\rho(t) = R^3(t_0)\rho(t_0) = \rho_0,$$

E a densidade da “poeira” do Universo em função do redshift é

$$\rho(z) = \rho_0(1+z)^3,$$

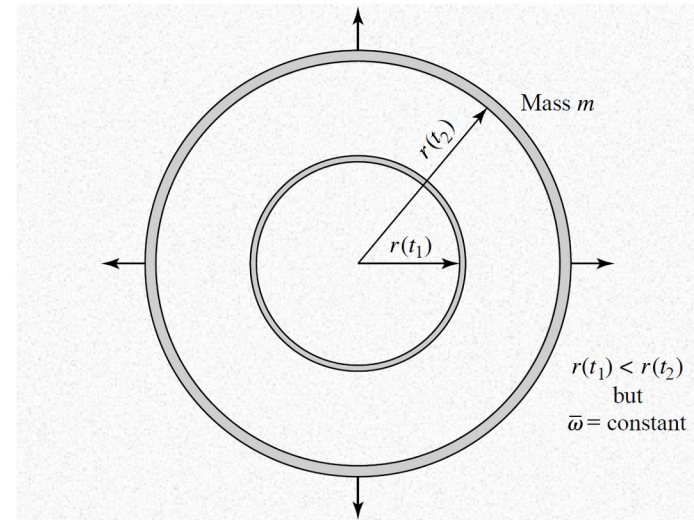


FIGURE 29.3 An expanding mass shell seen at two different times,  $t_1 < t_2$ . As the mass shell expands, its comoving coordinate,  $\bar{\omega}$ , is the same at times  $t_1$  and  $t_2$ , while  $r(t_1) < r(t_2)$ .

# Destino do Universo: approach newtoniano

## Evolução desse Universo:

A partir da Lei de Hubble

$$v(t) = H(t)r(t) = H(t)R(t)\varpi. \quad (29.7)$$

como  $v(t)$  é a derivada de  $r(t)$ ,

$$v(t) = \frac{dR(t)}{dt} \varpi. \quad \longrightarrow \quad H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}.$$



# Destino do Universo: approach newtoniano

## Evolução desse Universo:

A partir da Lei de Hubble

$$v(t) = H(t)r(t) = H(t)R(t)\varpi. \quad (29.7)$$

como  $v(t)$  é a derivada de  $r(t)$ ,

$$v(t) = \frac{dR(t)}{dt} \varpi. \quad \longrightarrow \quad H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}.$$

inserindo 29.2 e 29.7 em 29.3,

$$\left( H^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho \right) R^2 = -kc^2, \quad \longrightarrow \quad \left[ \left( \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho \right] R^2 = -kc^2.$$

# Destino do Universo: approach newtoniano

## Evolução desse Universo:

A partir da Lei de Hubble

$$v(t) = H(t)r(t) = H(t)R(t)\varpi. \quad (29.7)$$

como  $v(t)$  é a derivada de  $r(t)$ ,

$$v(t) = \frac{dR(t)}{dt} \varpi. \quad \longrightarrow \quad H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}.$$

inserindo 29.2 e 29.7 em 29.3,

$$\left( H^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho \right) R^2 = -kc^2, \quad \longrightarrow \quad \left[ \left( \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho \right] R^2 = -kc^2.$$

essas fórmulas valem para qualquer casca esférica. Delas podemos definir a densidade crítica (para que  $k=0$ ):

$$\rho_c(t) = \frac{3H^2(t)}{8\pi G}.$$

# Destino do Universo: approach newtoniano

## Evolução desse Universo:

A partir da Lei de Hubble

$$v(t) = H(t)r(t) = H(t)R(t)\varpi. \quad (29.7)$$

como  $v(t)$  é a derivada de  $r(t)$ ,

$$v(t) = \frac{dR(t)}{dt} \varpi. \quad \longrightarrow \quad H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}.$$

inserindo 29.2 e 29.7 em 29.3,

$$\left( H^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho \right) R^2 = -kc^2, \quad \longrightarrow \quad \left[ \left( \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho \right] R^2 = -kc^2.$$

essas fórmulas valem para qualquer casca esférica. Delas podemos definir a densidade crítica (para que  $k=0$ ):

$$10^{-26} \text{ kg/m}^3 = \dot{\iota}$$

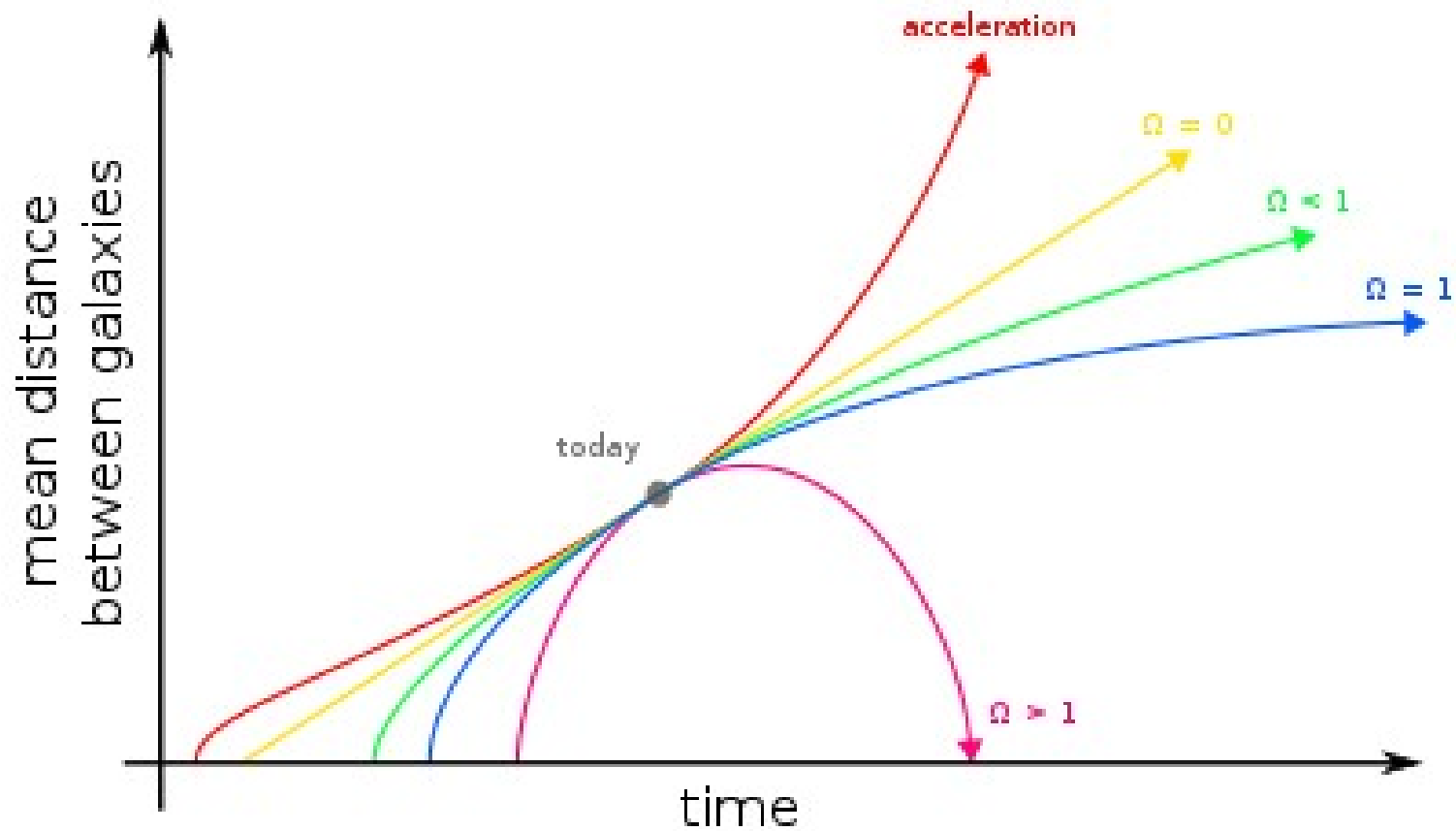
$$\rho_{c,0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

←  
hoje

$$\rho_c(t) = \frac{3H^2(t)}{8\pi G}.$$

# Destino do Universo

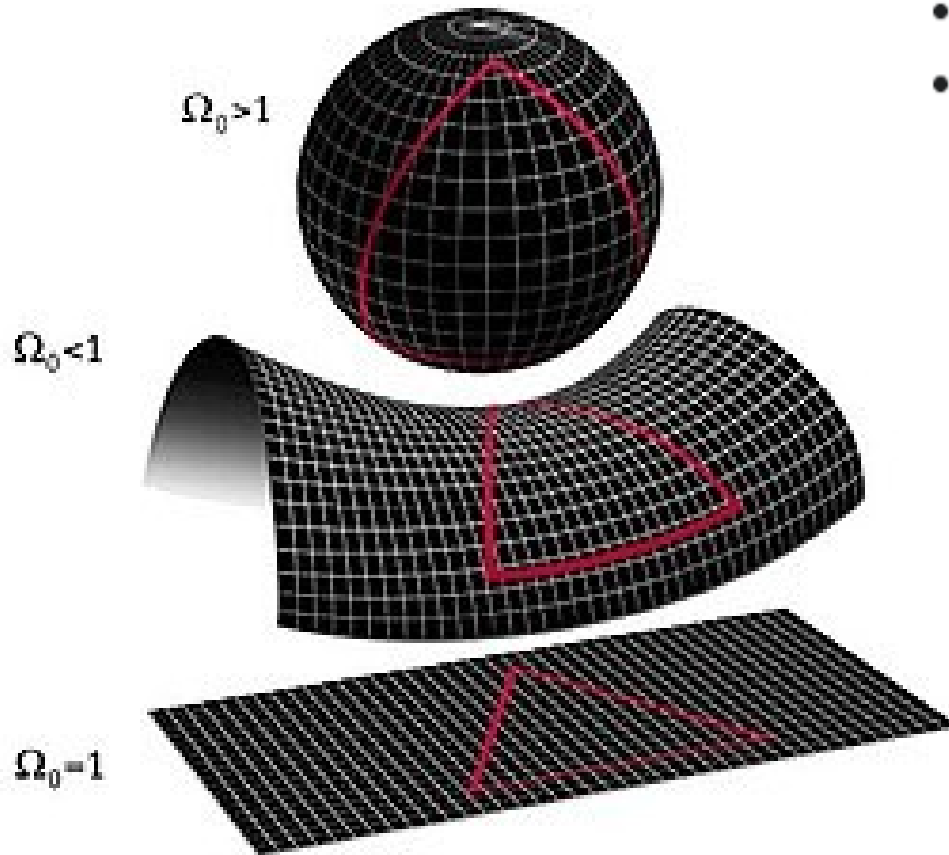
$$\Omega_x \equiv \frac{\rho_x(t = t_0)}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{8\pi G \rho_x(t = t_0)}{3H_0^2}$$



# Geometria do Espaço

- Universo em expansão só pode ser descrito pela Teoria da Relatividade Geral
- Na Mecânica Newtoniana o tempo e o espaço são absolutos e imutáveis
- Conceito de espaço-tempo permite a descrição de um Universo que expande
- Massa deforma o espaço-tempo causando uma curvatura

# Geometria do Espaço



- If  $\Omega = 1$ , the universe is flat.
- If  $\Omega > 1$ , there is positive curvature.
- If  $\Omega < 1$  there is negative curvature.

# Universo acelerado

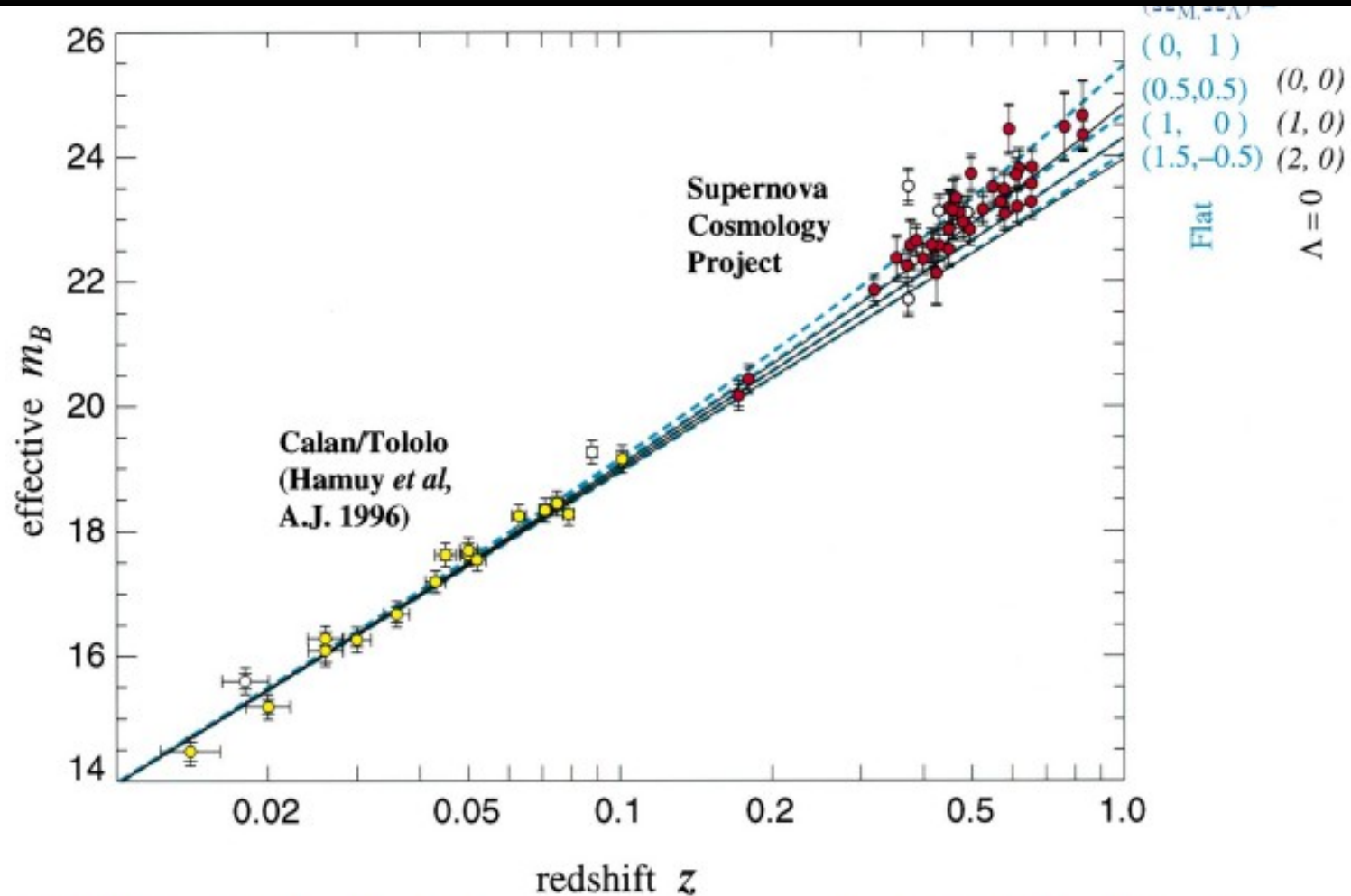


FIG. 1.—Hubble diagram for 42 high-redshift type Ia supernovae from the Supernova Cosmology Project and 18 low-redshift type Ia supernovae from the Calán/Tololo Supernova Survey after correcting both sets for the SN Ia light-curve width-luminosity relation. The inner error bars show the uncertainty due to measurement errors, while the outer error bars show the total uncertainty when the intrinsic luminosity dispersion, 0.17 mag, of light-curve-width-corrected type Ia supernovae is added in quadrature. The unfilled circles indicate supernovae not included in fit C. The horizontal error bars represent the assigned peculiar velocity uncertainty of  $300 \text{ km s}^{-1}$ . The solid curves are the theoretical  $m_B^{\text{eff}}(z)$  for a range of cosmological models with zero cosmological constant:  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0, 0)$  on top,  $(1, 0)$  in middle, and  $(2, 0)$  on bottom. The dashed curves are for a range of flat cosmological models:  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0, 1)$  on top,  $(0.5, 0.5)$  second from top,  $(1, 0)$  third from top, and  $(1.5, -0.5)$  on bottom.

# Universo acelerado

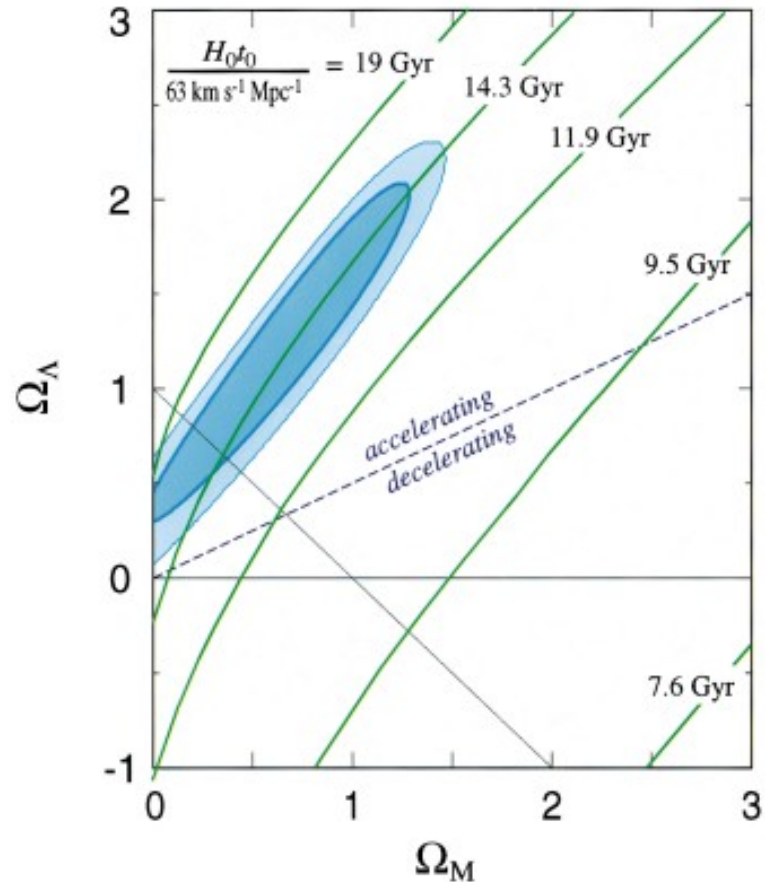
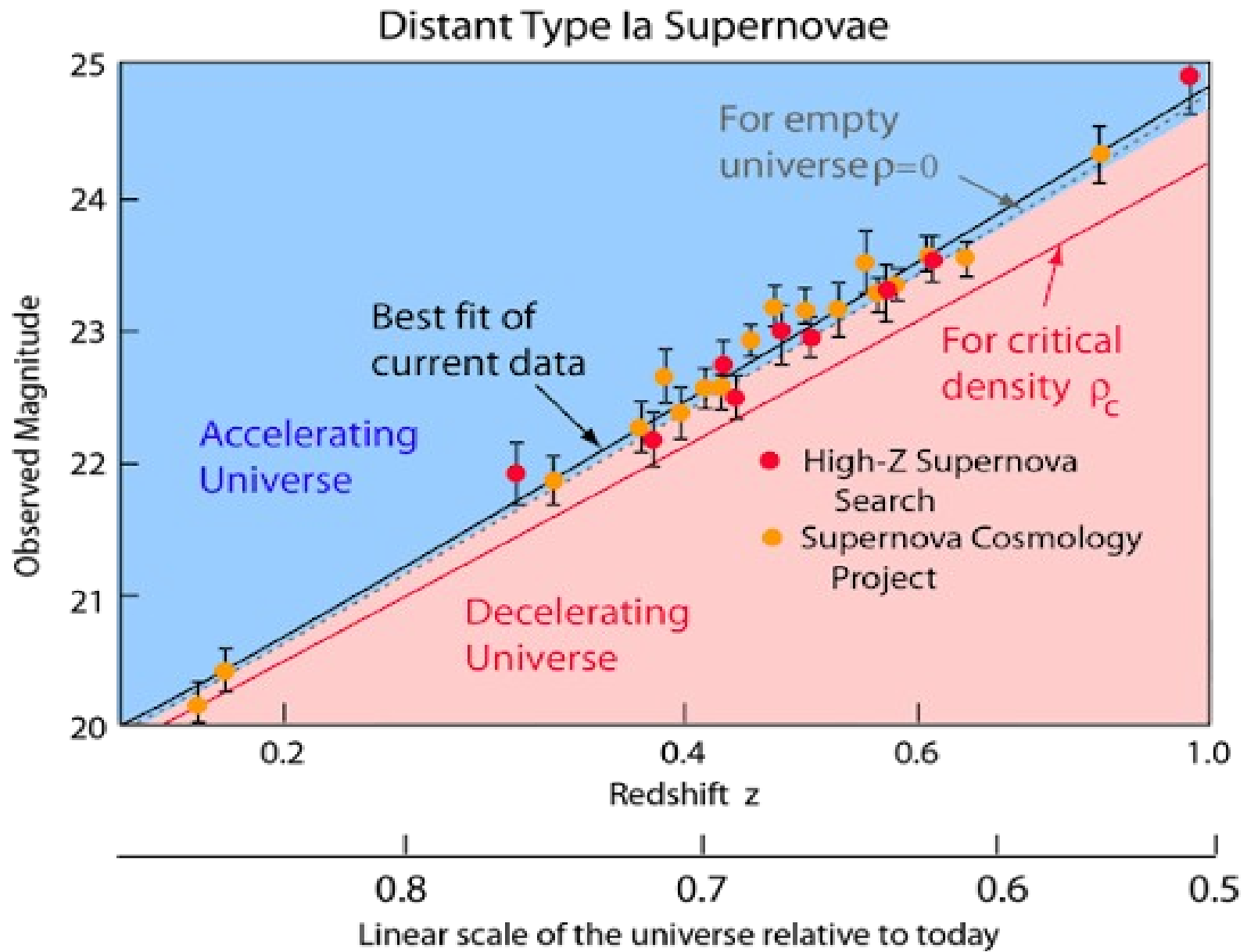


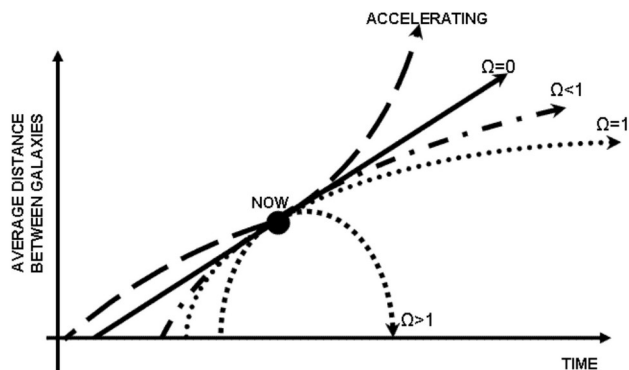
FIG. 9.—Isochrones of constant  $H_0 t_0$ , the age of the universe relative to the Hubble time,  $H_0^{-1}$ , with the best-fit 68% and 90% confidence regions in the  $\Omega_M$ - $\Omega_\Lambda$  plane for the primary analysis, fit C. The isochrones are labeled for the case of  $H_0 = 63 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , representing a typical value found from studies of SNe Ia (Hamuy et al. 1996; RPK96; Saha et al. 1997; Tripp 1998). If  $H_0$  were taken to be 10% larger (i.e., closer to the values in Freedman et al. 1998), the age labels would be 10% smaller. The diagonal line labeled accelerating/decelerating is drawn for  $q_0 \equiv \Omega_M/2 - \Omega_\Lambda = 0$  and divides the cosmological models with an accelerating or decelerating expansion at the present time.



# Universo acelerado



# Universo acelerado hoje



Alteração da Equação de Friedmann

Constante Cosmológica

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3},$$

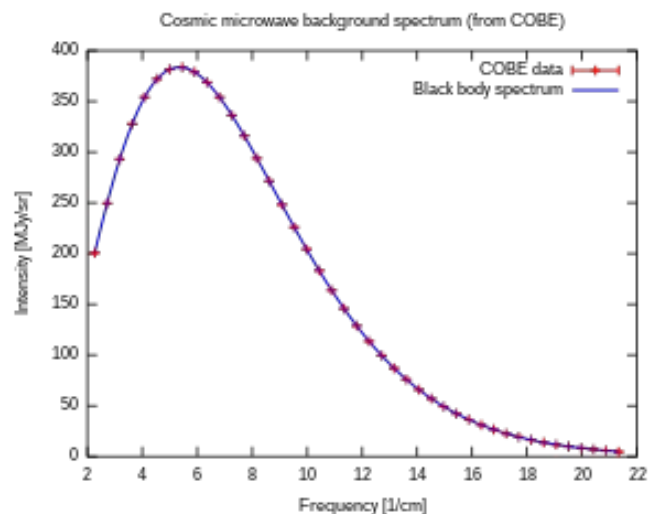
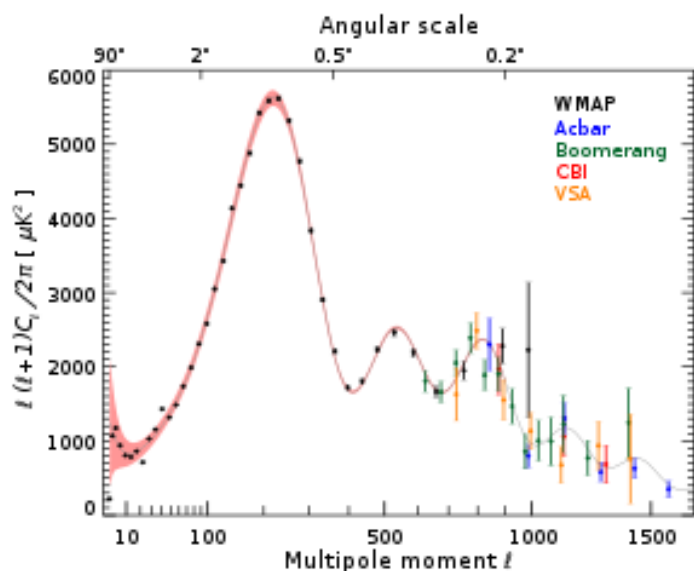
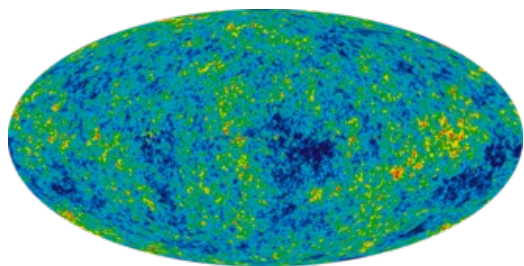
$$H(a) \equiv \frac{\dot{a}}{a} = H_0 \sqrt{(\Omega_c + \Omega_b) a^{-3} + \Omega_{\text{rad}} a^{-4} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda a^{-3(1+w)}}$$

Para curvatura zero  $\rightarrow \Omega_k = 0$  e  $w = -1$ :

$$H(a) = H_0 \sqrt{\Omega_m a^{-3} + \Omega_{\text{rad}} a^{-4} + \Omega_\Lambda}$$

Matéria
Radiação
Energia Escura  
bariônica+ escura

# Radiação Cosmica de Fundo



Hubble constant	$H_0$	$67.74 \pm 0.46 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
Baryon density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_b$	$0.0486 \pm 0.0010$ <sup>[e]</sup>
Dark matter density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_c$	$0.2589 \pm 0.0057$ <sup>[f]</sup>
Matter density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_m$	$0.3089 \pm 0.0062$
Dark energy density parameter <sup>[b]</sup>	$\Omega_\Lambda$	$0.6911 \pm 0.0062$
Critical density	$\rho_{\text{crit}}$	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ <sup>[g]</sup>

# Materia e Radiação

$\rho_U$ : nao conhecida ao certo

é > ou < que:  $\rho_o = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

**RCF**: > parte da radiação do Universo: na forma de RCF

Qual o principal constituinte do Universo:

materia ou **radiação**?

Calculemos densidade da radiação  $\rho_r$

# Materia e Radiação

Densidade da Radiação  $\rho_r$ :

Densidade de energia da radiação de CORPO NEGRO:

$$u = a T^4 \quad [\text{en./vol.}] \quad a = 7,564 \times 10^{-16} \text{ J/m}^3/\text{K}^4$$

Convertamos essa energia no equivalente em massa:

$$E = mc^2 \rightarrow m = E/c^2$$

$$m/\text{vol} = (E/\text{vol})/c^2 = u/c^2 = aT^4/c^2$$

$$m/\text{vol} = \rho_r = aT^4/c^2 = (7,564 \times 10^{-16}) (2,7)^4 / (3 \times 10^8)^2 =$$

$$\rho_r = 5 \times 10^{-31} \text{ kg/m}^3 \text{ (HOJE)}$$

# Materia e Radiação

Densidade da Radiação  $\rho_r$ :

$$\rho_r = 5 \times 10^{-31} \text{ kg/m}^3 \text{ (HOJE)}$$

Mas:  $\rho_{\text{materia}} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \text{ (HOJE)}$

$$\rightarrow \rho_{\text{materia}} \gg \rho_r \text{ (HOJE)}$$

→ Universo é dominado pela materia e nao pela radiação: **HOJE**

Sera que foi sempre assim?

# Materia e Radiação

Densidade da Radiação  $\rho_r$ :

$$\rho_r = 5 \times 10^{-31} \text{ kg/m}^3 \text{ (HOJE)}$$

Mas:  $\rho_{\text{materia}} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \text{ (HOJE)}$

$$\rightarrow \rho_{\text{materia}} \gg \rho_r \text{ (HOJE)}$$

→ Universo é dominado pela materia e nao pela radiação: **HOJE**

Sera que foi sempre assim?

# Materia e Radiação

$\rho_r$  e  $\rho_{\text{materia}}$  **diminuem**: à medida que Universo expande

## Radiação:

também tem **energia diminuída** por causa do redshift cosmológico:  $\Delta\lambda/\lambda_0 = z > 0$

→ Com a expansão:  $\lambda$  **aumenta** →  $E = kT = hc/\lambda$  **abaixa**

$\lambda \propto R$  (aumenta com tamanho  $R$  do Universo expandindo)

$$\rightarrow T \propto R^{-1} \rightarrow \rho_r = aT^4 \propto R^{-4}$$

**Mas:**  $\rho_{\text{materia}} = M/\text{vol} \propto R^{-3}$



# Materia e Radiação

$$\rho_r \propto R^{-4} \text{ e } \rho_{\text{materia}} \propto R^{-3}:$$

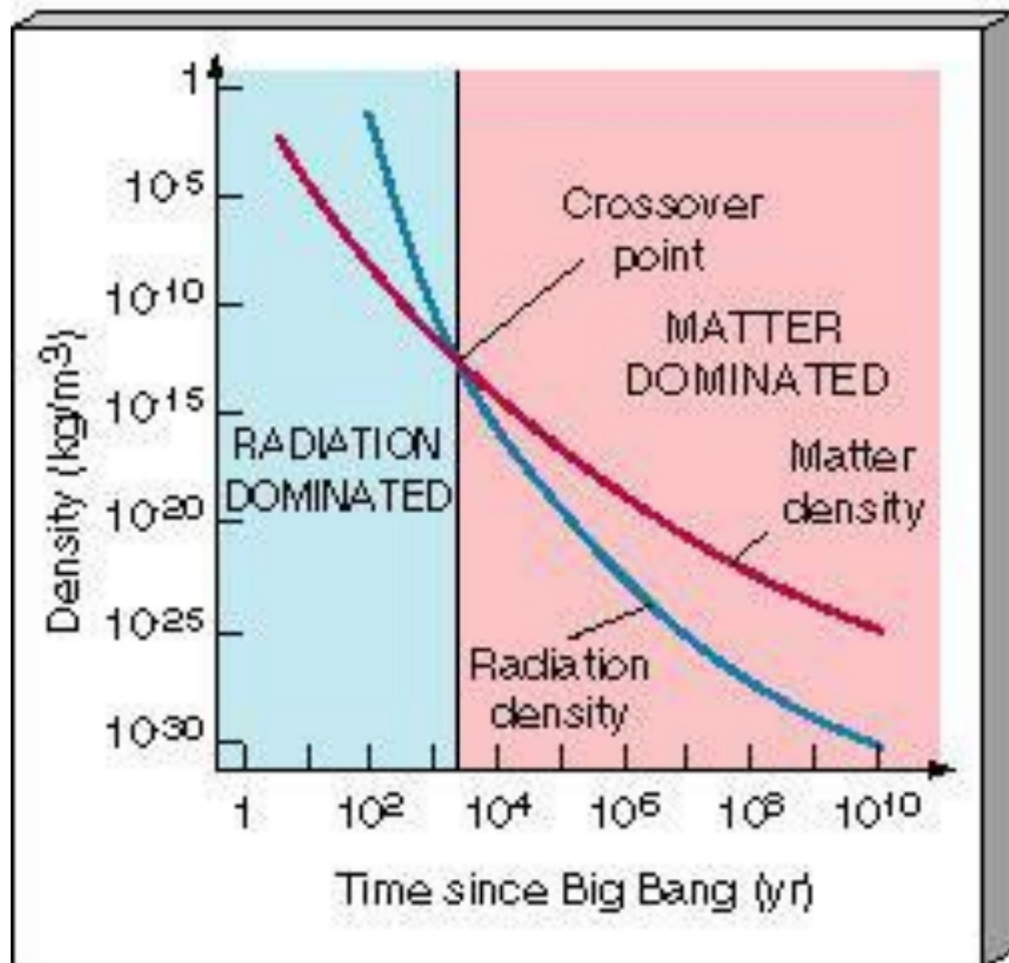
Densidade da radiação  
cai + rapido que  
densidade da materia

Houve epoca no passado:  
radiação dominava:

$$\rho_r > \rho_m$$

$T \sim 1000$  anos:  $\rho_r = \rho_m$

Depois materia passou a  
dominar:  $\rho_r < \rho_m$



# Formação de Nucleos e Atomos

Consideremos Universo Primordial (**antes de se formarem galaxias e estrelas**)

**No BB:** Universo muito **pequeno e denso**  
desde entao: **EXPANDINDO e ESFRIANDO**

**1ºs minutos:**

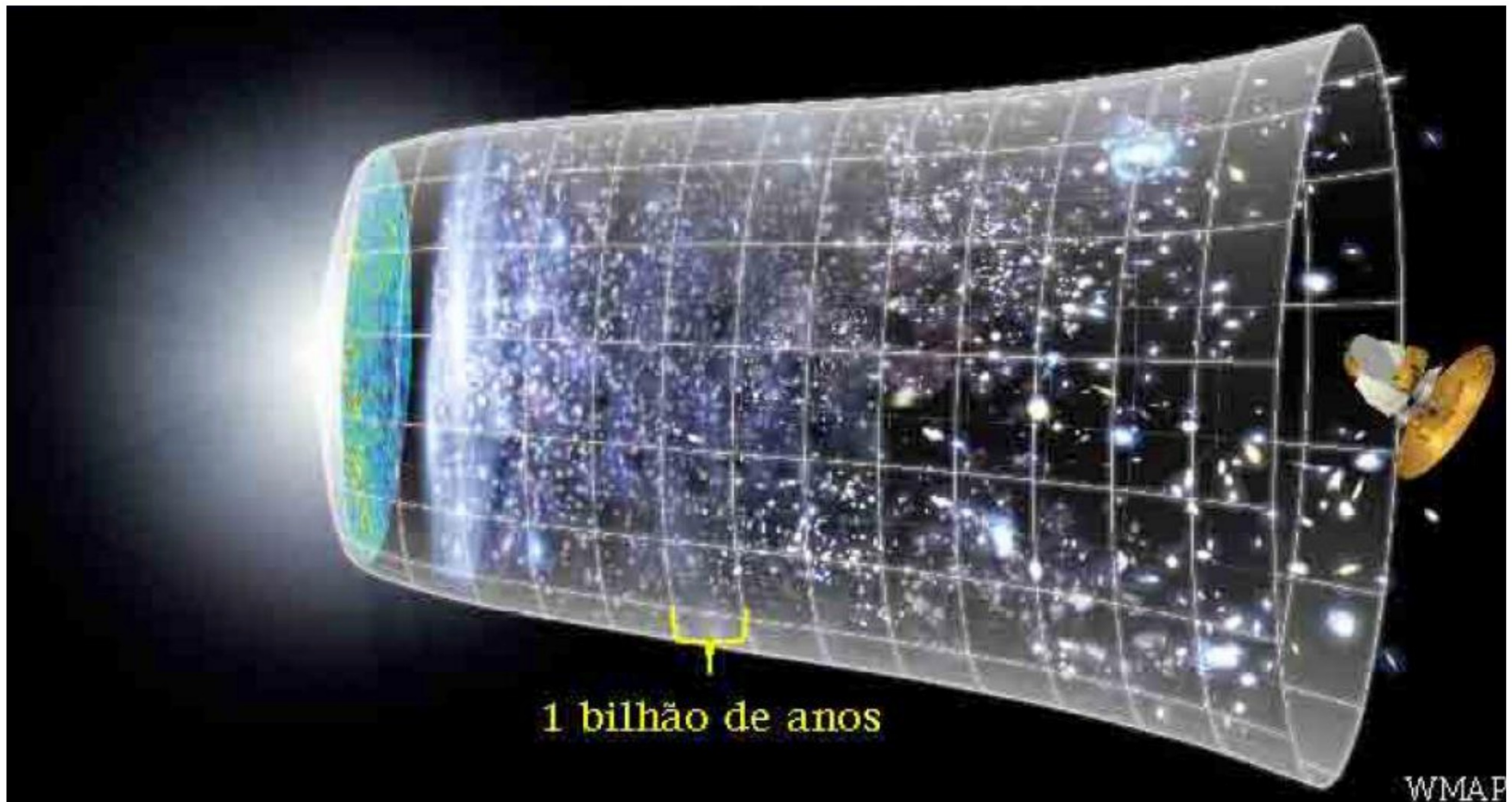
**T tao alta que:** ftons com energia suficiente para transformar-se em materia ( $E=mc^2$ ):



**particulas elementares:** formaram-se: **p, n, e, ME(?)**

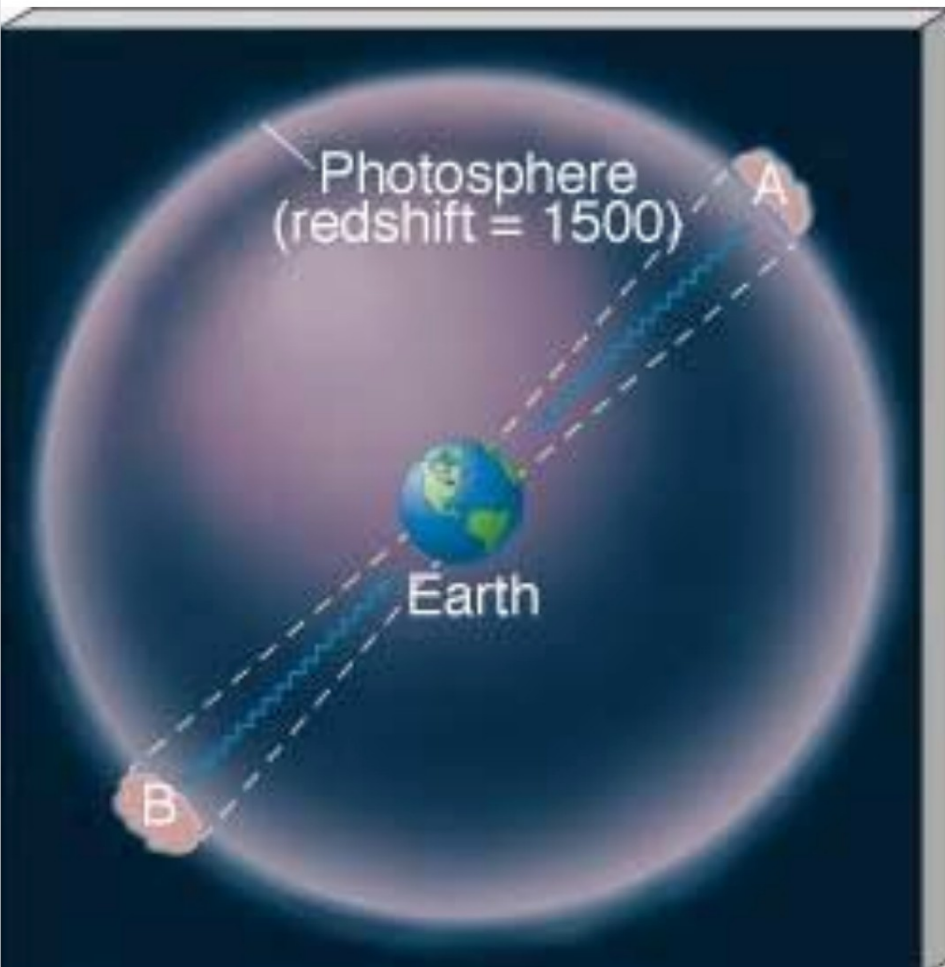
**Depois:** **materia esfria e aglomerando:** nucleos → atomos → estrelas → galaxias → estruturas em grande escala

# Historia do Universo



**Tudo que vemos ao nosso redor foi criado da radiação** à medida que Universo primordial expandindo e resfriando (depois do BB não houve criação de matéria nova)

# Problema do Horizonte



Imaginemos: **observando RCF de 2 regioes opostas do Universo A e B** (onde radiação interagiu com materia pela ultima vez)

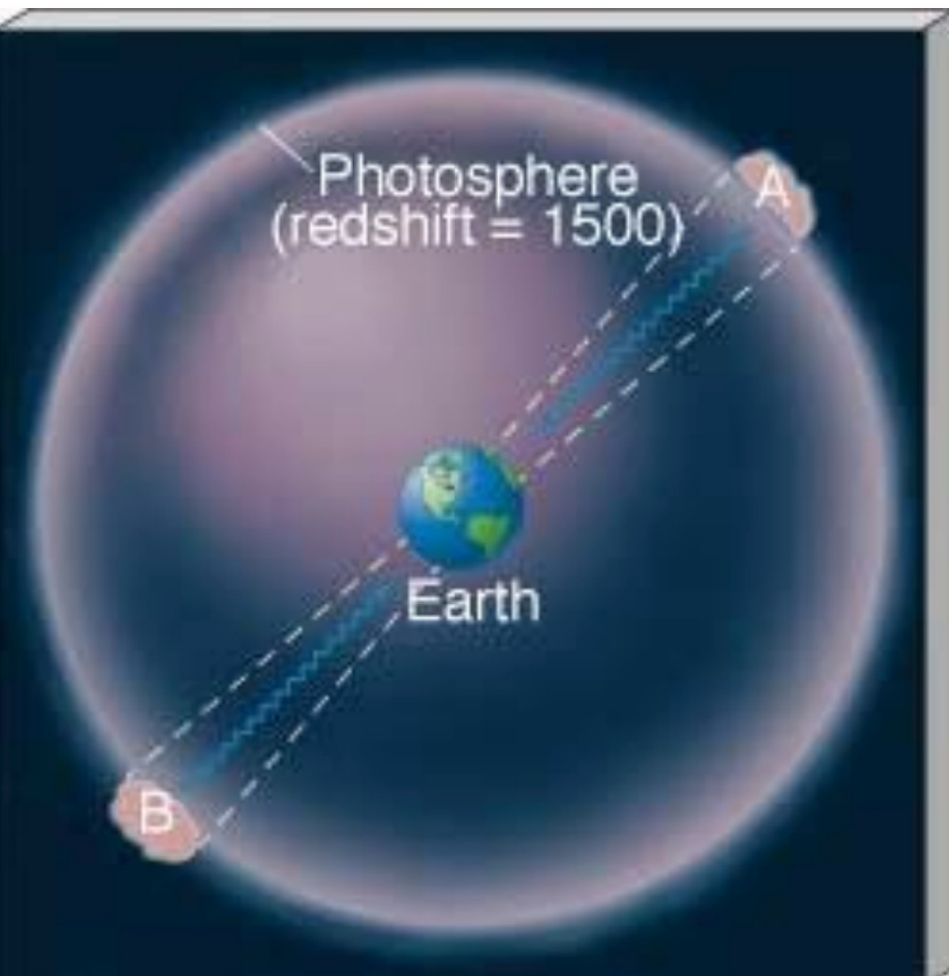
**RCF: é isotropica** – A e B tiveram densidade e T similares na epoca que radiação deixou A e B

Porem: **dentro da teoria do BB: nao ha razao porque essas 2 regioes devessem ser tao similares**



**Problema do Horizonte**

# Problema do Horizonte



**Explicando melhor:**

**Calor e informação não podem viajar com  $v > c$**

**A e B: separados por varios Mpc (8000 Mpc ~ 20 bilhões de anos-luz):**

**não houve tempo suficiente para informação viajar entre A e B: informação teria que ter viajado com  $v > c$  para que A e B soubessem um do outro**

**→ A esta fora do horizonte de eventos de B (e vice-versa)**

Como então A e B tem condições tão similares se não sabiam um do outro?

# Inflação

**Anos 70 e 80:**

físicos teóricos conseguiram unificação das **3 forças nao-gravitacionais** da natureza:

- eletromagnetismo
- interações fortes nucleares (que mantem p e n juntos no núcleo)
- fracas (atua nos decaimentos radiativos)



Uma **única super-força**: Teoria de Grande Unificação (GUTs):

**3 forças indistinguíveis entre si a E muito altas:**

$$E=kT \rightarrow T \geq 10^{28} \text{ K}$$

Para  **$T < 10^{28} \text{ K}$** : super força separa-se em 3

# Inflação

## Começo anos 80:

Cosmologistas descobriram: GUTs importantes se aplicadas ao Universo primordial

**$t = 10^{-34}$  s depois do BB:**

**$T < 10^{28}$  K**

Forças se reorganizaram: **mudança de fase** (similar a mudanças de fase da água):

por curto tempo: **Universo estado instavel de alta energia:**



**FALSO VACUO**



**Universo permaneceu nessa condição por curto tempo**

(similar a água quando resfriada a  $T < T_{\text{congelamento}}$  mas ainda não virou gelo)

## Tempo curto de transição de fase (falso vacuo):

Consequencias **dramaticas** para o Universo:

Espaço vazio: adquiriu enorme pressão:

$$P_{\text{vacuo}} > F_G/A$$

→ aceleração da expansão do Universo a taxa enorme  
(**exponencial**)

→ Aceleração: fez dobrar tamanho do Universo a cada  
 $10^{-34}$  s



Epoca da **INFLACAO**



# Inflação

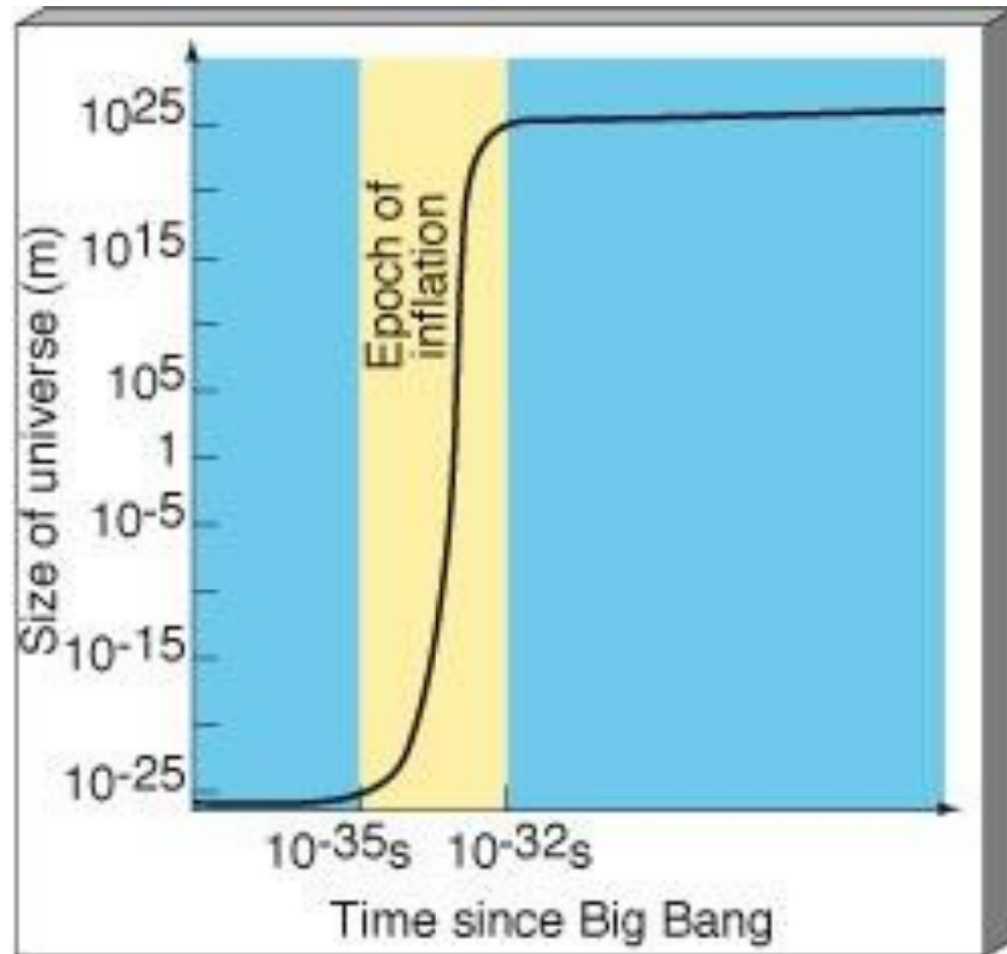
**Durante inflação:**

Universo **expandiu exponencialmente** em  $t$  pequeno ( **$10^{-32}$  s**)

**Depois: re-assumiu sua taxa de expansão anterior** mais lenta: desacelerando pela ação da gravidade

Mas agora o **tamanho do Universo:**

**$10^{50}$  vezes maior que antes da Inflação**



# Implicações da Inflação

**Inflação:** resolve problemas do **Horizonte e Planura**

## **Horizonte:**

**Inflação tomou regiões** do Universo que **havam tido tempo de se comunicarem** e estabelecerem propriedades físicas similares: e **colocou-as bem separadas entre si:** fora de comunicação

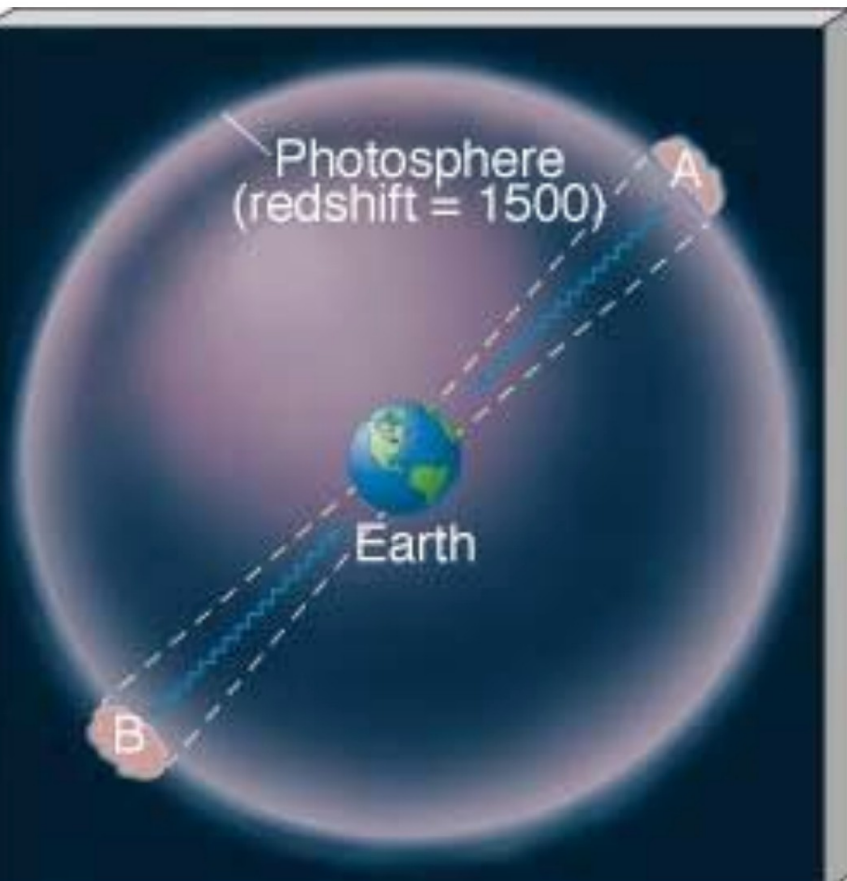
Embora **materia e radiação não possam viajar com  $v > c$ :**  
**Universo como um todo pôde durante a Inflação: Universo expandiu a taxa  $> c$  !**

Regiões que **antes da Inflação estiveram muito próximas:**  
**depois da inflação → muito afastadas** (sem aparente conexão causal)



**Regiões A e B: tem propriedades similares porque estiveram em contacto ANTES da Inflação**

# Resolvendo o Problema do Horizonte



**Regioes A e B:  
tem propriedades  
similares porque  
estiveram em contacto  
ANTES da Inflação**

# Implicações da Inflação

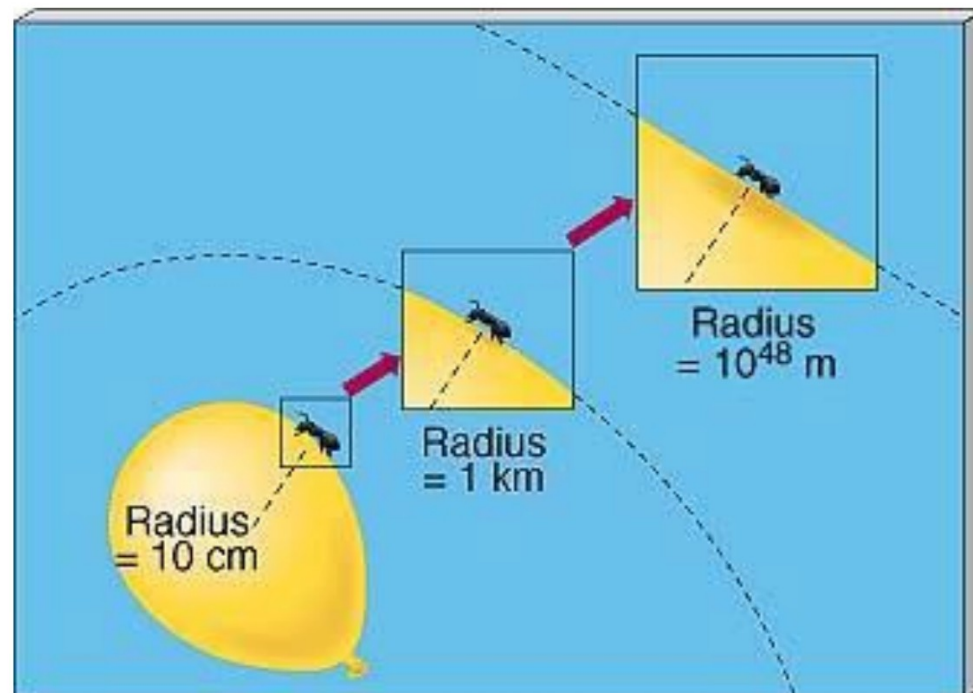
Inflação: também resolve problema da Planura

**Planura:**

Inflação esticou tanto  
Universo: plano

Qualquer **curvatura** que  
Universo poderia ter tido  
**ANTES da Inflação:**

destruída pela enorme  
expansão - fazendo **Universo  
plano**



Se PLANO  $\rightarrow \Omega_0=1$

# Implicações da Inflação

Se Universo PLANO:  $\Omega_o=1$

→ maior parte do universo na forma de ME e EE (já que  $\Omega_{o,ML} = 0,01$ )

Ideia da **Inflação controversa**: mas evidências observacionais:  $\Omega_o = 1$

$$\Omega_o = \Omega_{ML} + \Omega_{ME} + \Omega_{EE}$$

$$\Omega_{ML} \sim 1\%, \Omega_{ME} \sim 27\%, \Omega_{EE} \sim 70\%$$

**BICEPS 2**: alega ter medido ondas gravitacionais da Inflação (2014) - **PLANCK sustentara isso?**

# Princípio Cosmológico

- **HOMOGENEIDADE:**

um dos **princípios** que cosmologista adota para estudar **evolução dinâmica** do Universo como um todo em **grande escala**



Obs. sugerem ser **verdadeiro: mas não provado**

- **ISOTROPIA:**

**Universo: igual em qualquer direção**



outro **princípio** sugerido por obs. mas sem prova

**Qualquer amostra de “feixe profundo”**: nº similar de **galáxias** em qualquer direção do céu observada

# Amostra de galáxias Profunda-Estreita

- Feixe ate: **d= 2000 Mpc**
- Galaxias parecem distribuir-se em estruturas com maximo **D= 100-200 Mpc**
- Com **vazios** entre elas do **mesmo tamanho**

