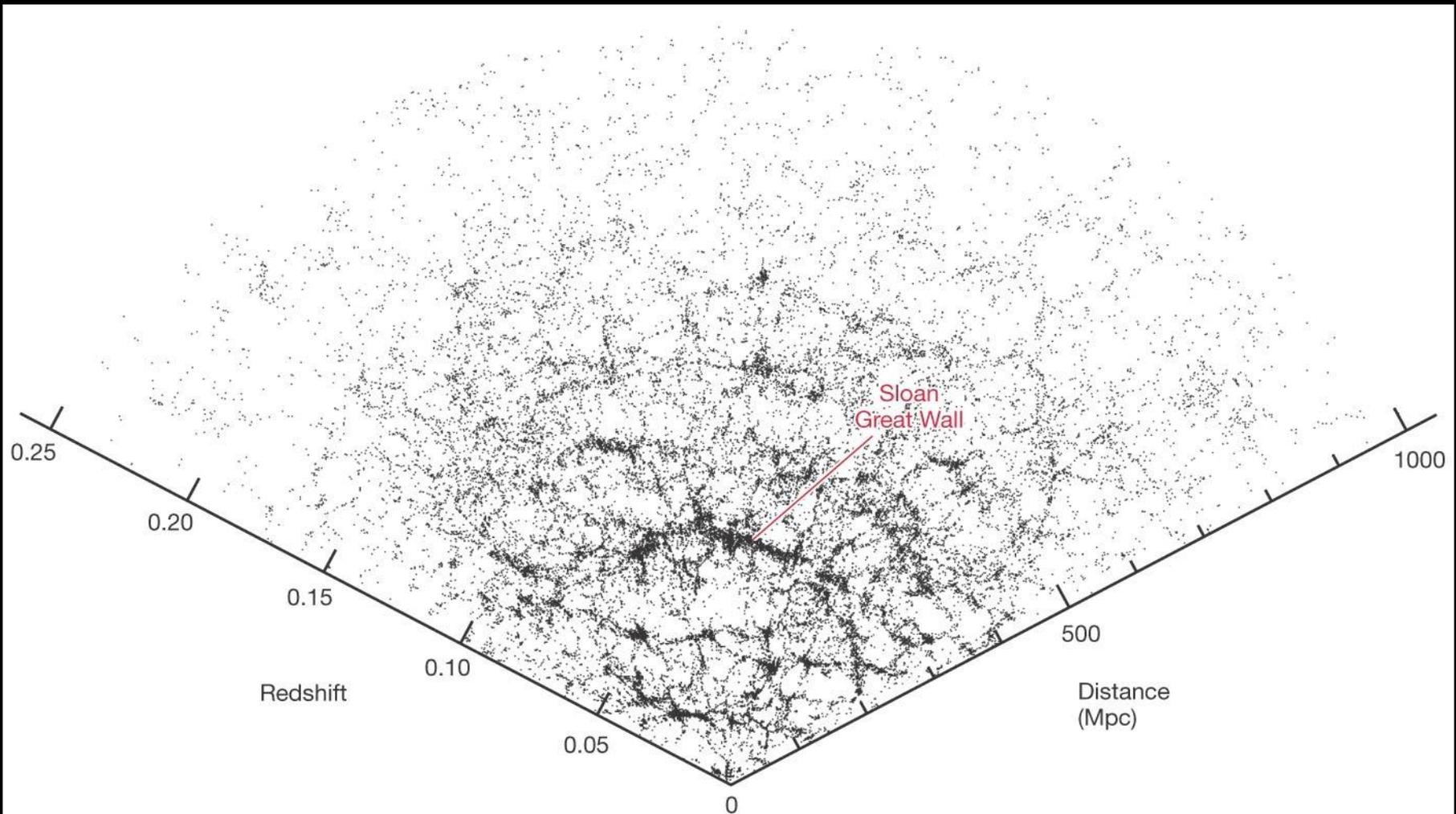


(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

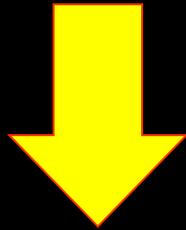
INTRODUÇÃO À COSMOLOGIA

O UNIVERSO EM GRANDE ESCALA

O mapa mostra a maior estrutura conhecida no universo: o Sloan Great Wall. Nenhuma estrutura maior do que 300 Mpc é observada.

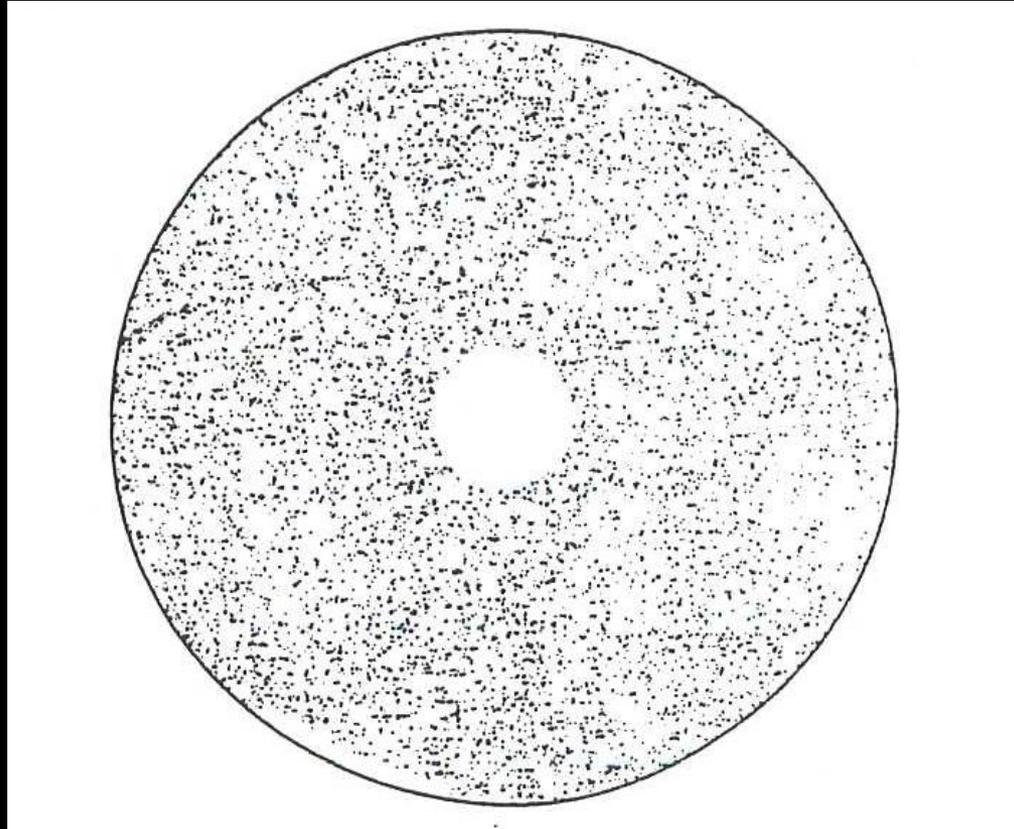


- **Esta distribuição de matéria observada termina em algum lugar???**
- **Há alguma escala em que o Universo pode ser observado sem estruturas ?**



deve-se obter estas respostas para se construir os modelos cosmológicos, pois eles necessariamente pressupõem o conhecimento da distribuição de matéria no universo

Mapa com ~31000 rádio-fontes mais brilhantes no hemisfério N



A maior parte das fontes neste mapa são quasares e galáxias à distâncias $d \sim c/H_0$ (comprimento de Hubble) ~ 4 Gpc

Em escalas comparáveis ao comprimento de Hubble a distribuição de galáxias parece ser homogênea

O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

- Em escalas suficientemente grandes o Universo é **HOMOGÊNEO** e **ISOTRÓPICO**

Homogêneo:

o mesmo em qualquer posição no universo

Isotrópico:

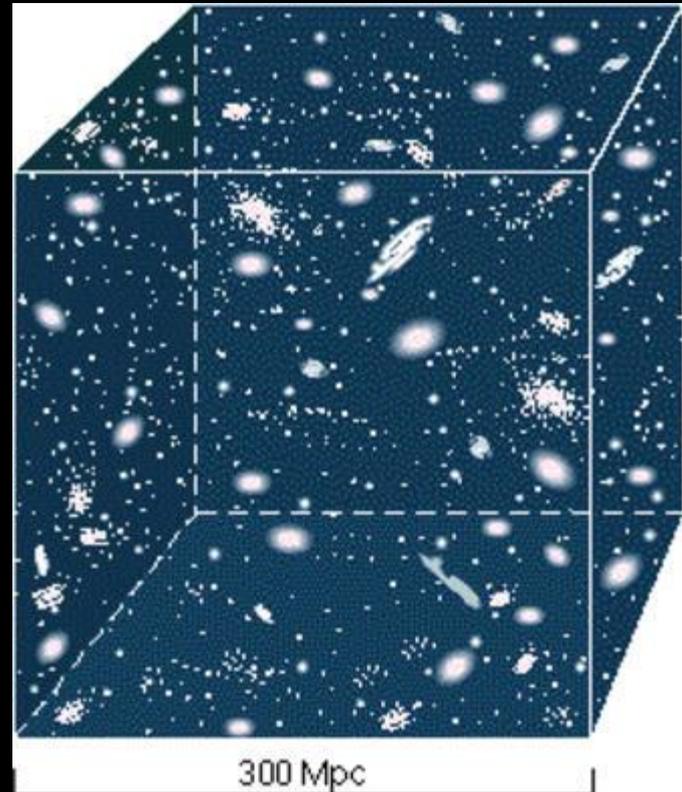
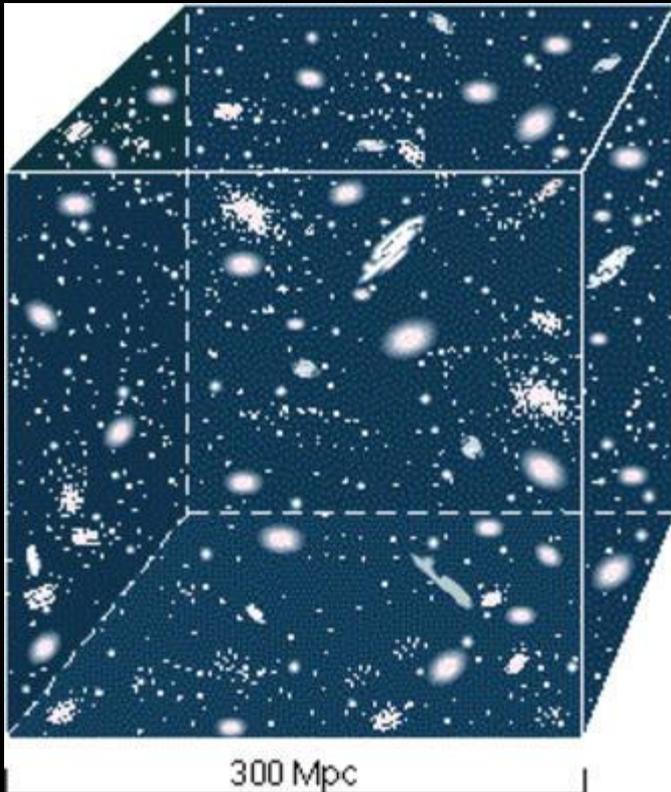
o mesmo em qualquer direção no universo

O Universo parece ser homogêneo :

qualquer cubo de 300 Mpc parece ser igual a qualquer outro cubo em outra posição no universo

O Universo parece ser isotrópico:

em quaisquer direções tem as mesmas estruturas



A LEI DE HUBBLE E O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

Mesmo deduzida do nosso referencial, a lei de Hubble não viola o princípio cosmológico.

Cada observador em cada diferente galáxia vê as outras movendo-se segundo a lei de Hubble com a mesma constante de proporcionalidade H_0 .



O QUE SIGNIFICA REALMENTE O BIG-BANG ?

Visão errada: uma grande explosão que ejetou matéria formando as galáxias que observamos hoje.



Este raciocínio implica que haveria necessariamente um centro e uma borda no universo.

Não são as galáxias que se movem, de acordo com a lei de Hubble, dentro de um espaço vazio e sim o próprio espaço que está se expandindo !

Em $t=0$ o universo era a própria singularidade matemática ($R=0$)

EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

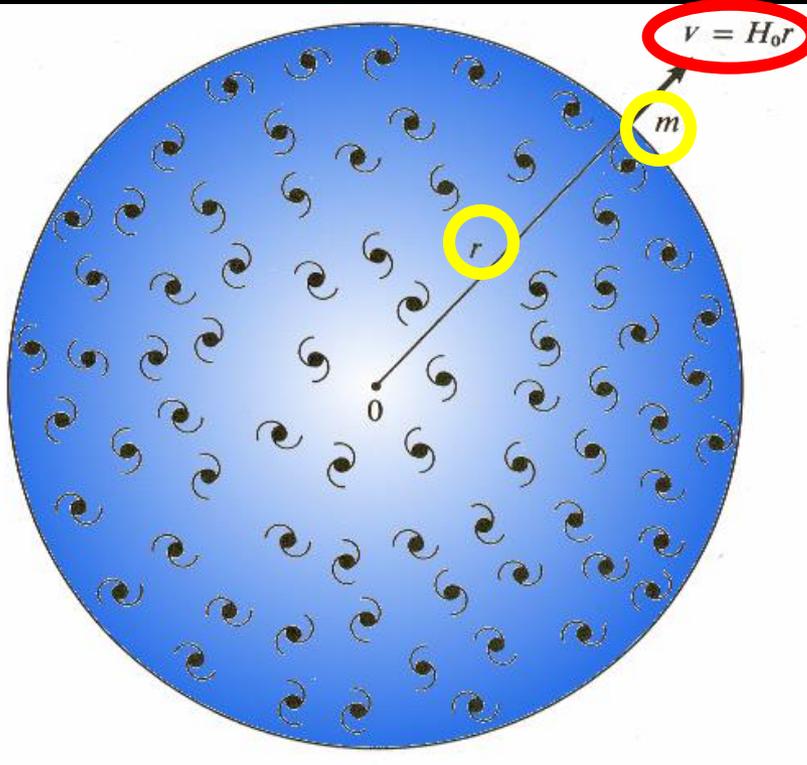
Assumindo que as forças relevantes em grandes escalas são as de expansão e gravitacional, há duas possibilidades para a evolução do universo:

1. Pode se expandir eternamente
2. Em algum momento a expansão pára e o universo começará a se contrair (colapso do Universo).

Qual destes dois caminhos será seguido dependerá da DENSIDADE DE MATÉRIA do Universo

UM MODELO SIMPLES PARA A EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

Seja uma esfera de universo com uma distribuição homogênea de galáxias



Considerando uma galáxia de massa m movendo-se a uma velocidade v dada pela lei de Hubble $v = H_0 r$, a uma distância r do centro de uma distribuição de massa M contida neste raio.

Somente a distribuição de massa interior ao raio r afetará a dinâmica dos objetos na casca esférica desta região (lei de Birkhoff).

A energia total do sistema é a energia cinética de expansão e a energia gravitacional:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{r} = \text{constante}$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{constante}$$

- **$E > 0 \Rightarrow$ expansão eterna (universo não ligado)**
- **$E < 0 \Rightarrow$ contração (universo ligado)**
- **$E = 0 \Rightarrow$ limite (universo marginalmente ligado)**

- Usando a lei de Hubble para a velocidade da galáxia localizada na superfície da esfera :

$$v = H_0 \times r \quad (\text{I})$$

- Usando a densidade da distribuição de massa na esfera de raio r :

$$M = \rho_c \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (\text{II})$$

Substituindo na fórmula da energia para o caso do universo marginalmente ligado:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{r} = 0$$

$$\frac{1}{2} H_0^2 m r^2 - \frac{4G\pi}{3} \rho_c m r^2 = 0$$

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (\text{III})$$



densidade crítica

Da hipótese do universo marginalmente ligado sai a definição de **DENSIDADE CRÍTICA ρ_c**

DENSIDADE CRÍTICA (ρ_c):

Se $\rho < \rho_c \Rightarrow$ universo em expansão perpétua

Se $\rho > \rho_c \Rightarrow$ universo vai colapsar

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

Usando $H_0 = 71$ km/s/Mpc



$$\rho_c = 9,5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

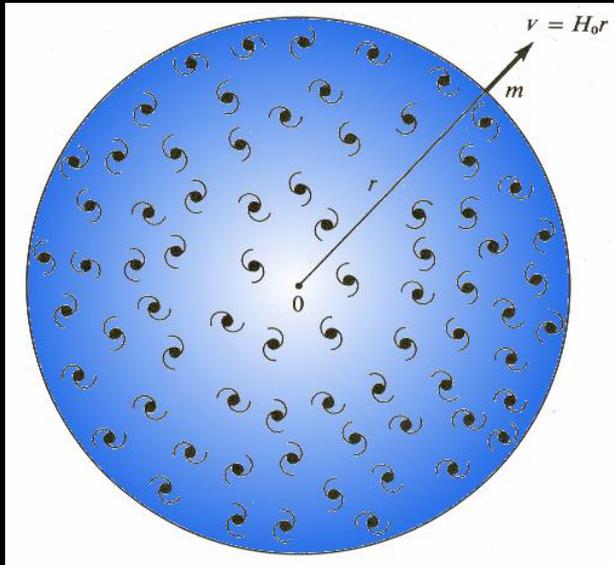


Somente ~ 5 átomos de H por metro cúbico!!!!

**Somente 10% da massa da Galáxia
(incluindo matéria escura) por Mpc cúbico!!**

A EQUAÇÃO DE EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

Considerando:



$$M(r) = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$$

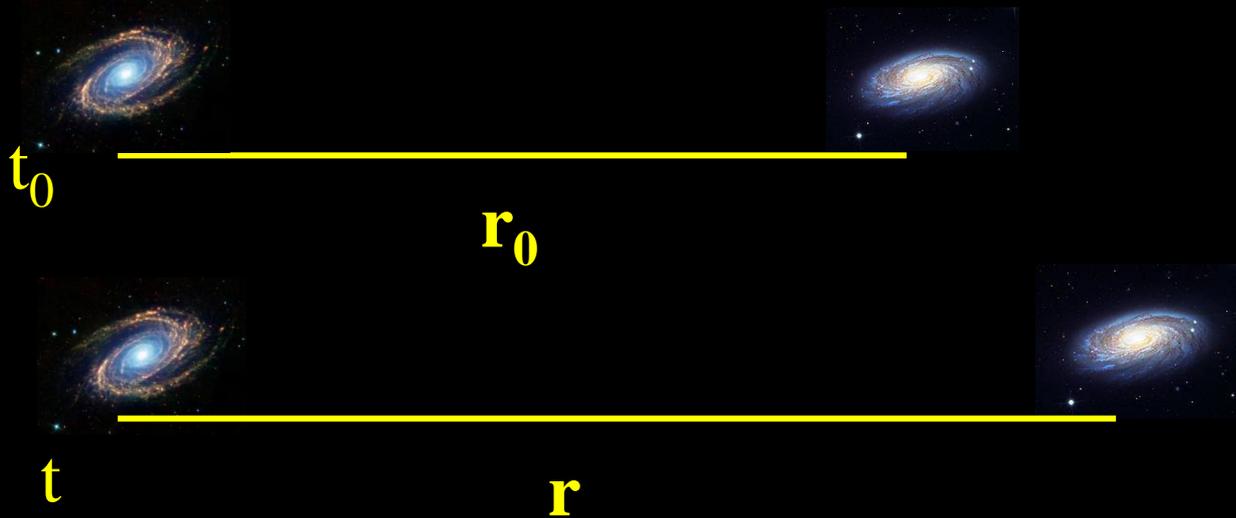
A esfera exerce uma força de atração gravitacional sobre uma galáxia de massa m:

$$F = m \frac{d^2 r}{dt^2} = - \frac{GmM(r)}{r^2} = - \frac{4\pi}{3} Gm \rho r$$

$$\ddot{r} = - \frac{4\pi G \rho r}{3} \quad (1)$$

Definindo a distância entre dois pontos no espaço:

Num certo t_0 arbitrário, duas galáxias estão separadas por uma distância r_0 , e num outro t estão separadas por uma distância r :



Pelo princípio cosmológico, os únicos movimentos permitidos são de expansão ou contração isotrópica do Universo.

Podemos então escrever:

$$r = \frac{R(t)}{R_0} r_0 \quad R_0 = R(t_0)$$

FATOR DE ESCALA $R(t)$ mede as variações nas escalas produzidas pela expansão ou contração do Universo

FATOR DE ESCALA

⇒ a distância entre dois pontos varia no tempo

⇒ variação do tamanho do universo

$$\ddot{r} = -\frac{4\pi G\rho r}{3} \quad (1) \quad r = \frac{R(t)}{R_0} r_0 \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) para ficar uma equação generalizada em função do fator de escala:

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G\rho R}{3}$$

Dinâmica da expansão depende apenas da densidade!

Podemos considerar ρ_0 e R_0 os valores medidos hoje

$$\text{Como: } \rho = \rho_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3$$

$$\text{Então: } \ddot{R} = - \frac{4\pi G \rho_0 R_0^3}{3R^2}$$

Integrando e obtendo :

EQUAÇÃO DE EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

$$\dot{R}^2 = - \frac{4\pi G \rho_0 R_0^3}{3R} + K \quad (3)$$

Constante de integração

Supondo que o universo seja descrito pela equação (3) com $K=0$:

$$\dot{R}^2 = -\frac{4\pi G\rho_0 R_0^3}{3R} + K$$

$$\frac{dR}{dt} = \left(\frac{8\pi G\rho_0 R_0^3}{3} \right)^{1/2} R^{-1/2}$$

$$\int_{R_A}^R \sqrt{R} dR = \left(\frac{8\pi G\rho_0 R_0^3}{3} \right)^{1/2} \int_{t_A}^t dt \longrightarrow \frac{2}{3} (R^{3/2} - R_A^{3/2}) = \sqrt{\frac{8\pi G\rho_0 R_0^3}{3}} (t - t_A)$$

Usando como condição inicial o Big-Bang $t_A=0$, $R(t_A)=0$:

$$R(t) = (6\pi G\rho_0 R_0^3)^{1/3} t^{2/3}$$

Ou seja, $R \propto t^{2/3} \Rightarrow$ expansão perpétua!

Nesta formulação a taxa de expansão varia com o tempo, então usando a lei de Hubble:

$$\dot{R} = H(t) \times R$$

$$H(t) = \frac{\dot{R}}{R} = \frac{2}{3t}$$

A taxa de expansão desacelera \Rightarrow expansão perpétua de um universo marginalmente ligado!

$$t_0 = \frac{2}{3} H_0^{-1}$$

idade atual do universo menor do que a estimativa de idade para uma expansão constante

**Para $H_0 = 71$ km/s/Mpc
 $t_0 = 9$ bilhões de anos**

Definindo o parâmetro de densidade Ω_o

$$\Omega_o = \frac{\rho}{\rho_c}$$

Calculando a densidade de matéria para o universo marginalmente ligado:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 = \rho_0 \left(\frac{R_0}{(6\pi G \rho_0 R_0^3)^{1/3} t^{2/3}} \right)^3 = \frac{1}{6\pi G t^2}$$

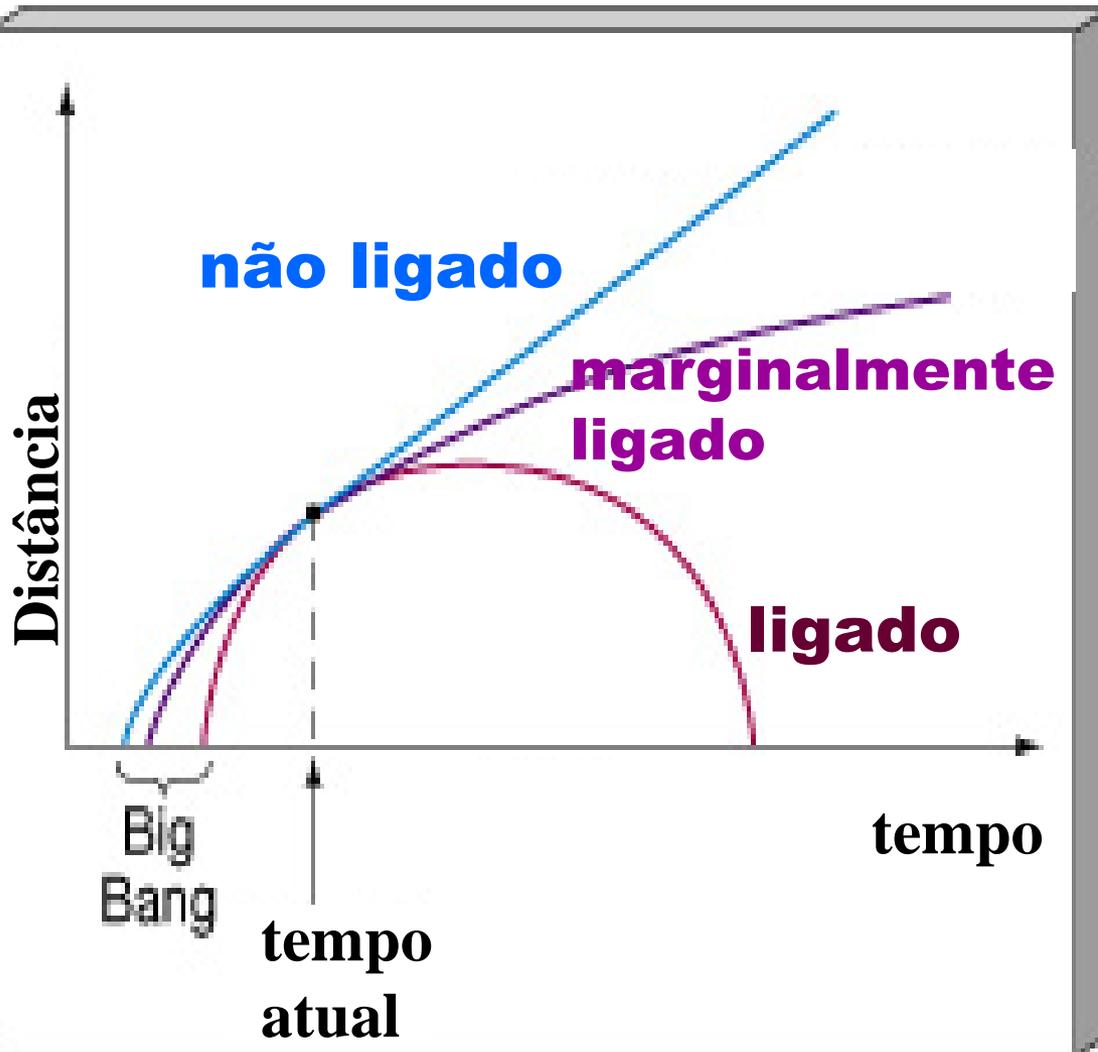
Então:

$$\Omega_o = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{1}{6\pi G t^2} \times \frac{8\pi G}{3H^2} = 1$$

Universo marginalmente ligado implica num universo com $\rho = \rho_c$

Universo crítico : $\Omega_o = 1$

• **Universo de densidade limite: a expansão não pára nunca, mas tende a desacelerar no infinito (universo marginalmente ligado)**



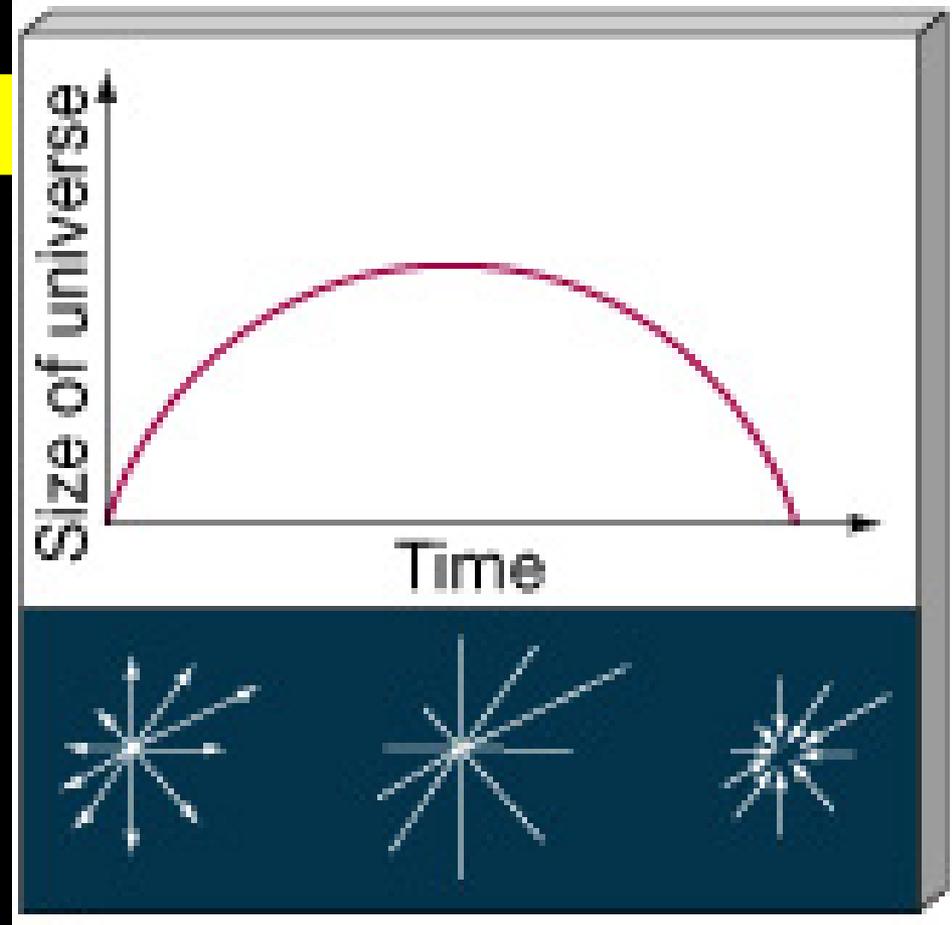
• **Universo de baixa densidade: não contém massa o suficiente para deter a expansão (universo não ligado)**

• **Universo de alta densidade: contém massa o suficiente para parar a expansão e causar um colapso (universo ligado).**

EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

$$\rho > \rho_c$$

O universo de densidade alta :



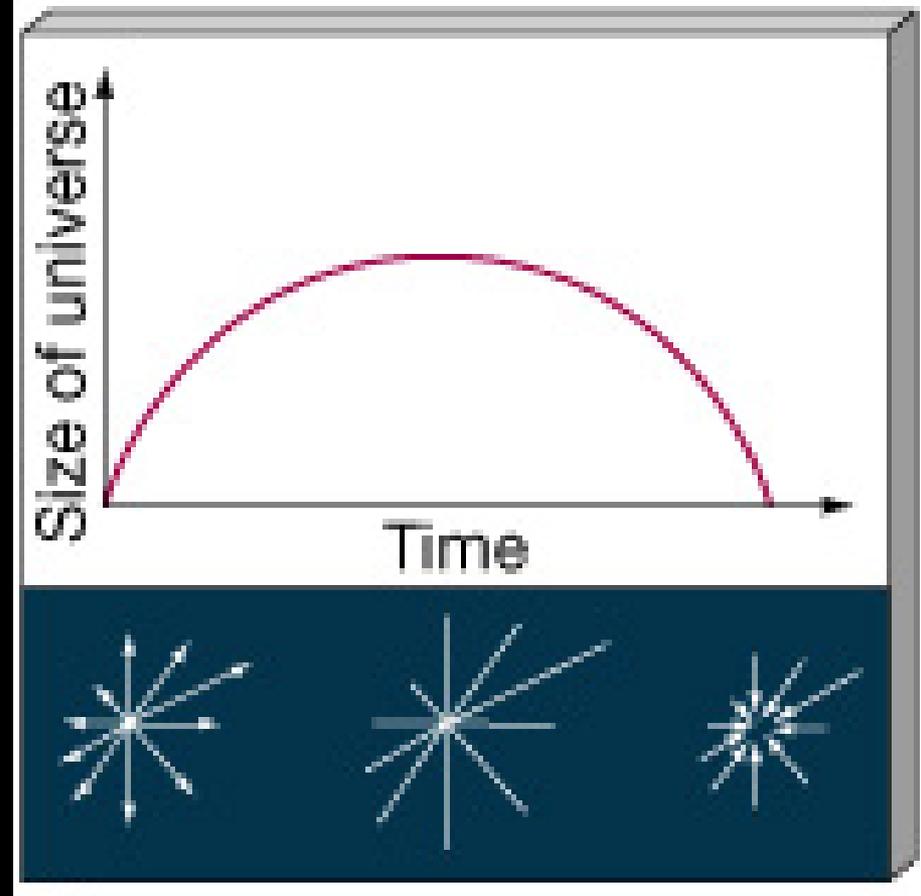
Se a expansão parar num dado momento e o universo começar a se contrair

⇒ a radiação observada das galáxias mais próximas começará a apresentar *blueshift*.

⇒ as mais distantes ainda apresentarão *redshift*, pois a luz observada corresponde ao passado destas galáxias.

$$\rho > \rho_c$$

O universo de densidade alta:



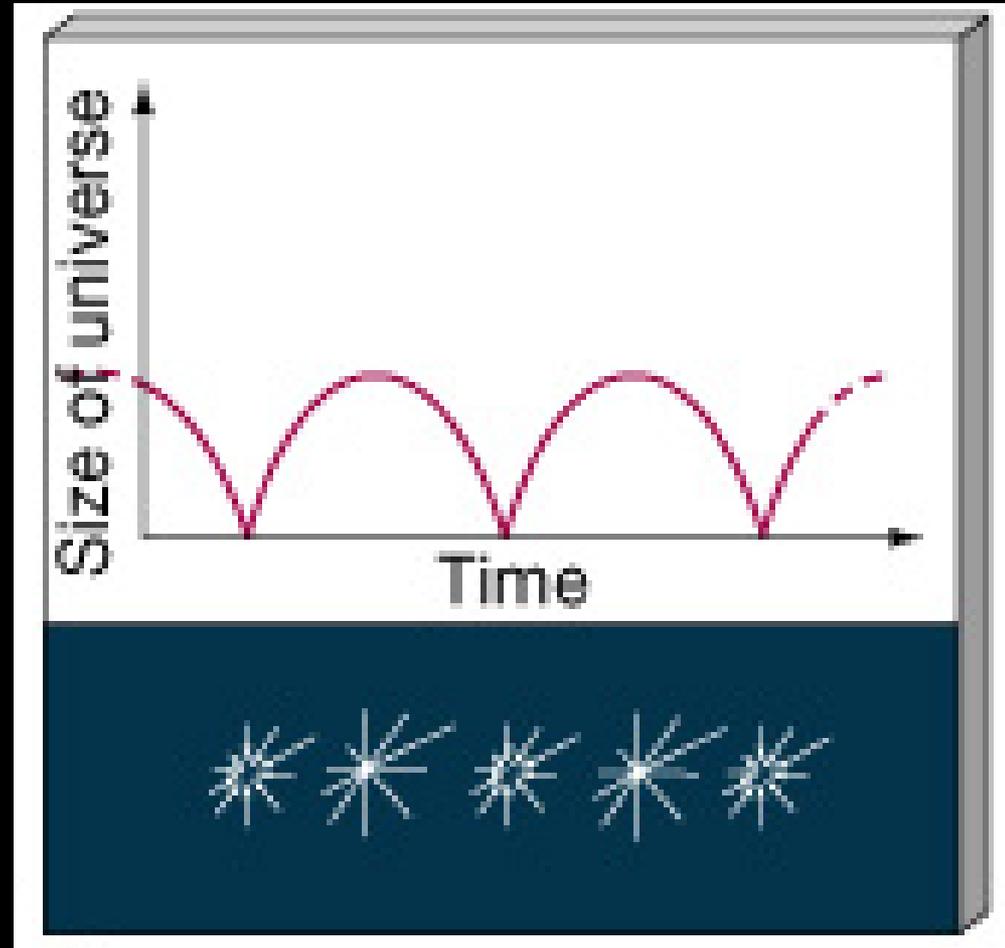
Colisões entre galáxias (e depois de um certo tempo colisões de estrelas) começarão a se tornar mais frequentes e a temperatura do universo aumentará.

**Universo retornará a um ponto (singularidade):
BIG CRUNCH “Morte quente”**

$$\rho > \rho_c$$

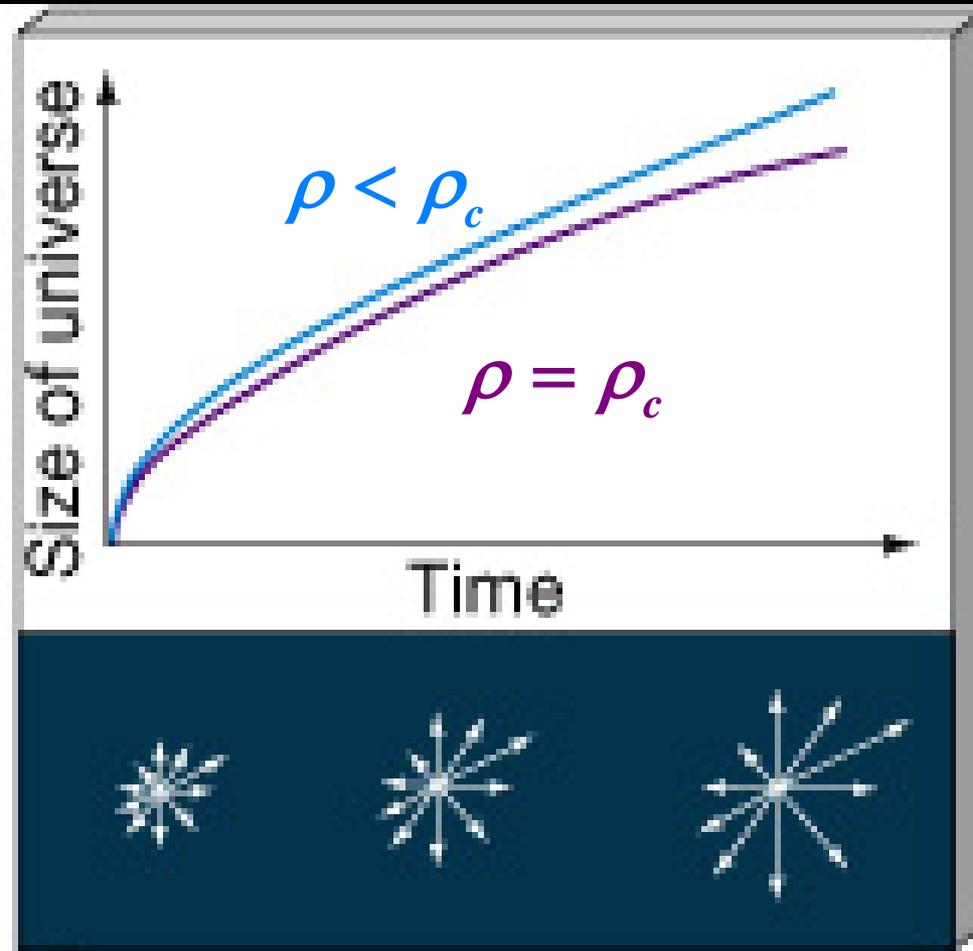
O universo de densidade alta

Outra possibilidade:
universo com ciclos de
expansão e contração



$$\rho \leq \rho_c$$

Universo de densidade baixa



Com a densidade $\leq \rho_c$: o universo se expandirá para sempre.

Num dado momento um observador aqui da Terra não verá mais galáxias além do grupo local (que está ligado gravitacionalmente).

As estrelas, e portanto as galáxias, evoluirão \Rightarrow o universo começará a diminuir de temperatura = “morte fria”

EVIDÊNCIAS OBSERVACIONAIS PARA AS POSSIBILIDADES DE EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

1) MEDIDA DA DENSIDADE DO UNIVERSO

Densidade crítica que separa os dois futuros:

$$\rho_c = 9,5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

Parâmetro de densidade:

$$\Omega_o = \frac{\rho}{\rho_c}$$

Medida da densidade de matéria luminosa:

Cálculo da massa total de galáxias num dado volume do espaço :

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V}$$

Densidade de matéria luminosa calculada:

$$\bar{\rho} = 10^{-28} \text{ kg / m}^3$$

Logo:

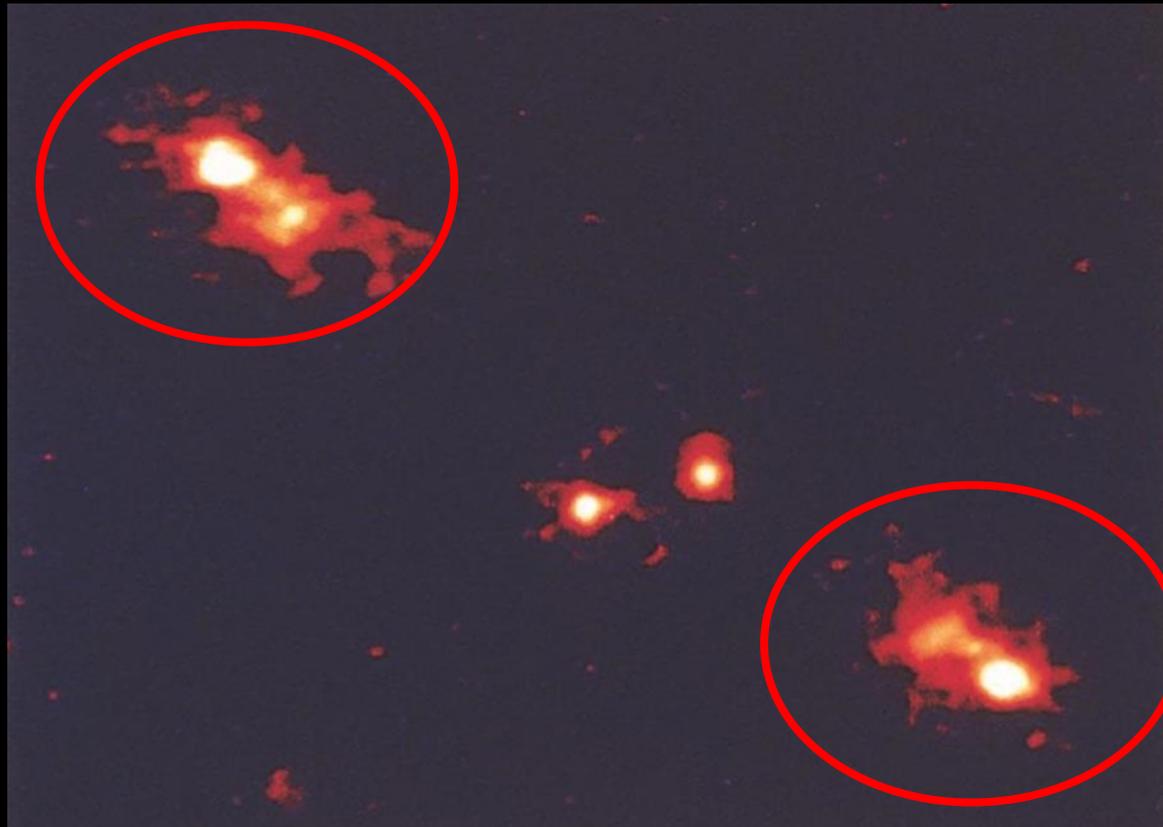
$$\Omega_o = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{10^{-28}}{9,5 \times 10^{-27}} = 0,01$$

$\Omega_o < 1$: universo deverá expandir eternamente!

Mas... e a matéria escura ??

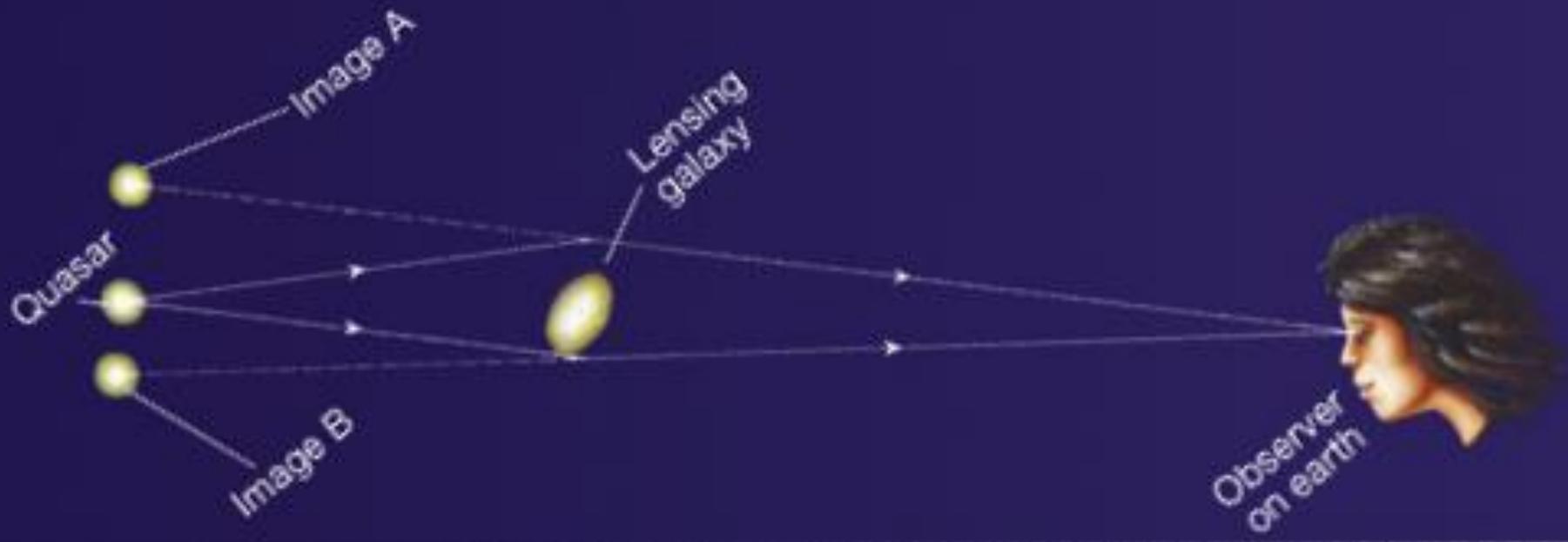
Observação de matéria escura em maiores escalas

Descoberta em 1979 : aparente quasar binário: mesmo redshift e espectro idêntico (??!!)



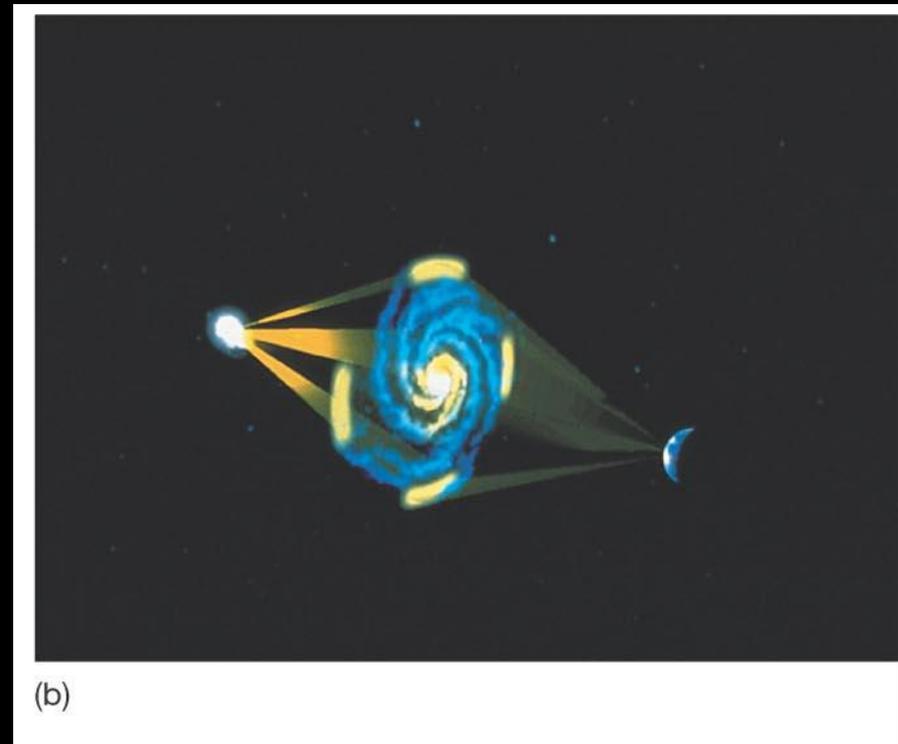
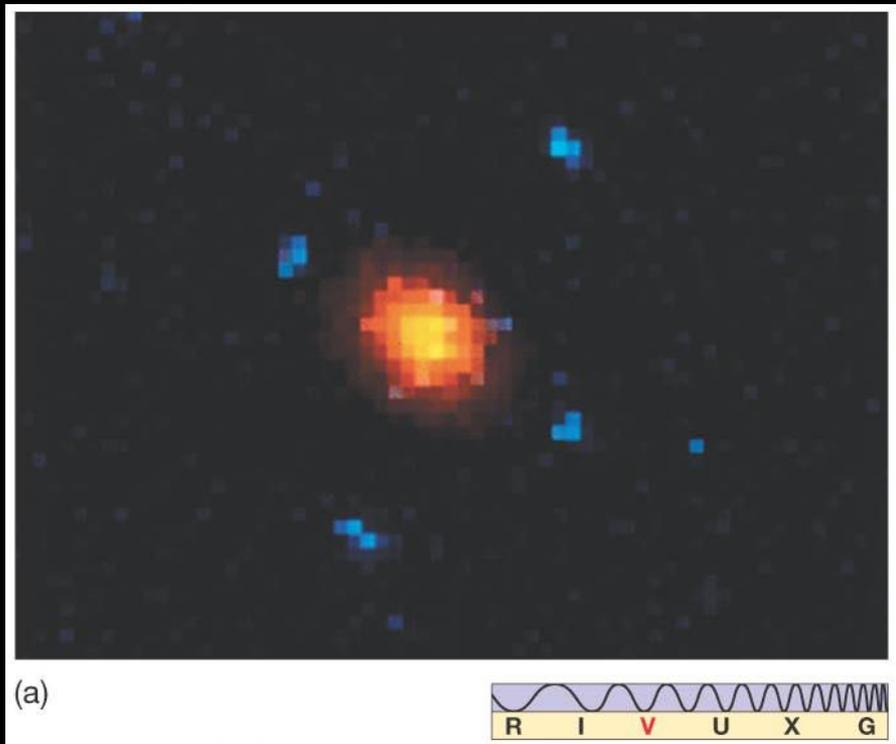
Quasar AC114 (2 bilhões de pc)
DUAS IMAGENS DO MESMO QUASAR

Origem da imagem dupla: LENTES GRAVITACIONAIS



**A deflexão da luz é causada por um objeto bem maior na linha de visada
separação de objetos ~ segundos de arco**

Múltiplas imagens



Estimativa da massa de objetos desde galáxias até aglomerados de galáxias

DISTRIBUIÇÃO DA MATÉRIA ESCURA

MAPEANDO A MATÉRIA ESCURA

**Galáxias distantes irregulares e elíticas anãs são objetos mais comuns do que quasares
⇒ melhor cobertura do céu**

Estudo de lentes de quasares e galáxias mais distantes por aglomerados de galáxias mais próximos: distribuição de matéria escura em grandes escalas



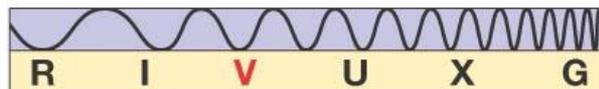
**Na frente : aglomerado de galáxias A2218 (~bilhões de pc)
Atrás: galáxias mais fracas cujas imagens estão distorcidas pela
presença do aglomerado.**

**O GRAU DE CURVATURA DOS “ARCOS” MEDE A MASSA DO AGLOMERADO
QUE DEFLETE E DISTORCE A LUZ (INCLUI A MATÉRIA ESCURA)**

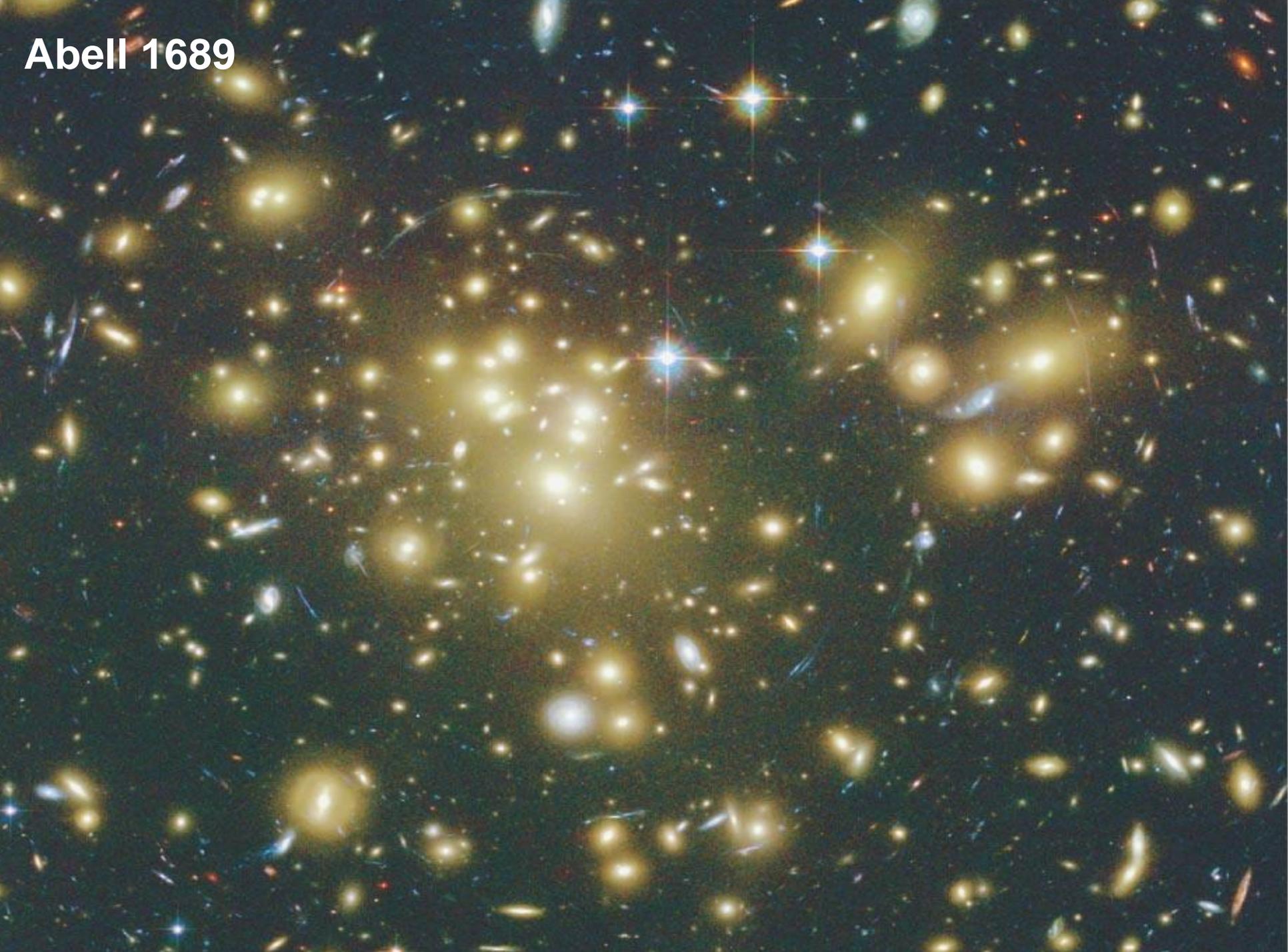


**Aglomerado de galáxia
0024+1654 (1.5 bilhões de pc)
distorcendo a imagem de uma
galáxia espiral (arcos em azul)**

(b)



Abell 1689



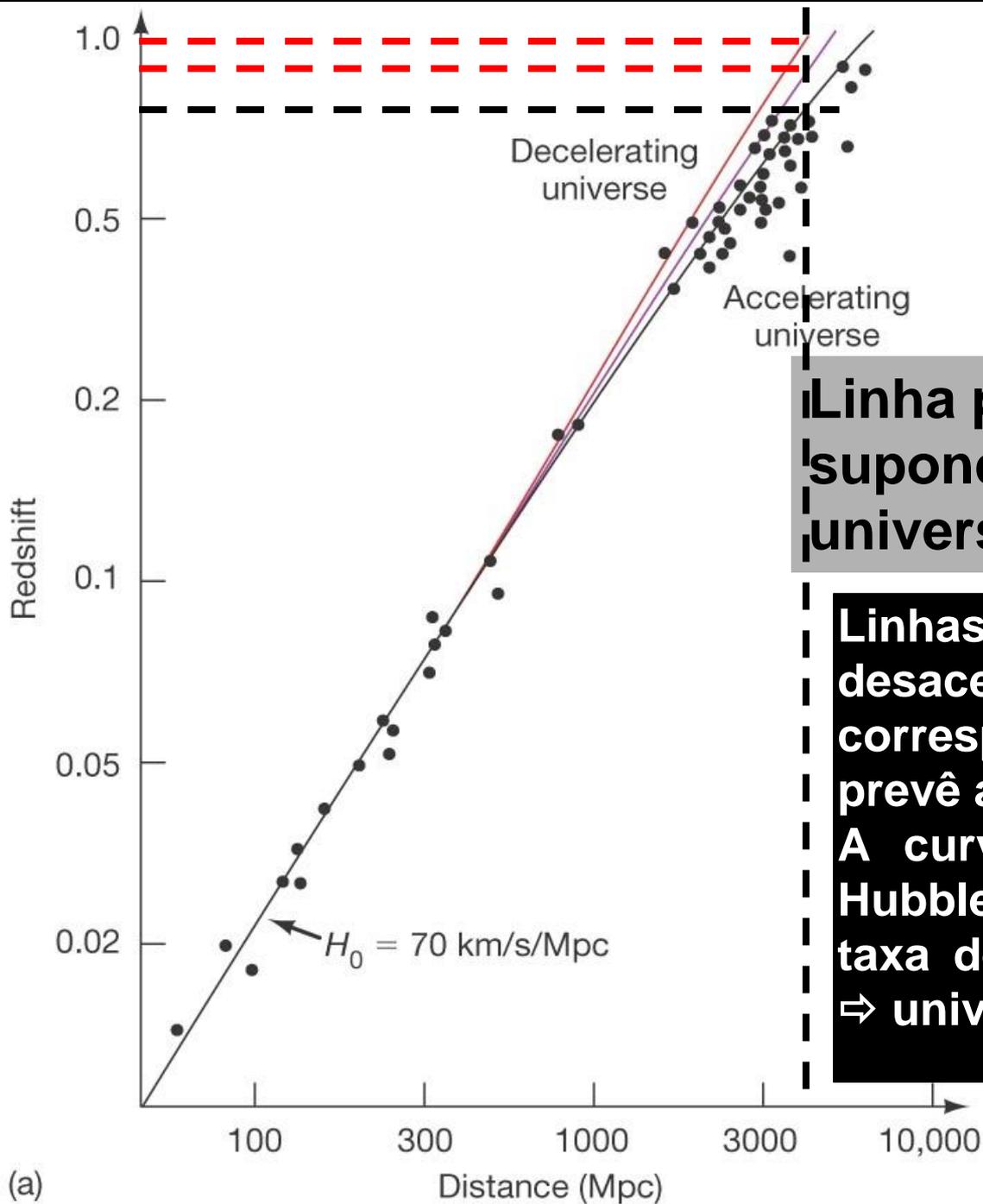
Incluindo matéria escura :

$$\Omega_o = \frac{\rho}{\rho_c} = 0,2 - 0,3$$

**Universo ainda em
expansão perpétua!**

**Outro modo de observar a evolução do universo:
estimativas de redshifts e distâncias pelas SNIa
(distâncias determinadas independentemente da lei de Hubble).**

• se o universo está desacelerando \Rightarrow taxa de expansão diminui : objetos mais distantes, isto é objetos que emitiram sua luz há mais tempo, vão estar se afastando mais rápido do que a lei de Hubble prediz se considerarmos a taxa de expansão constante.



Pontos = redshifts e distâncias de galáxias determinados pelas SNIa

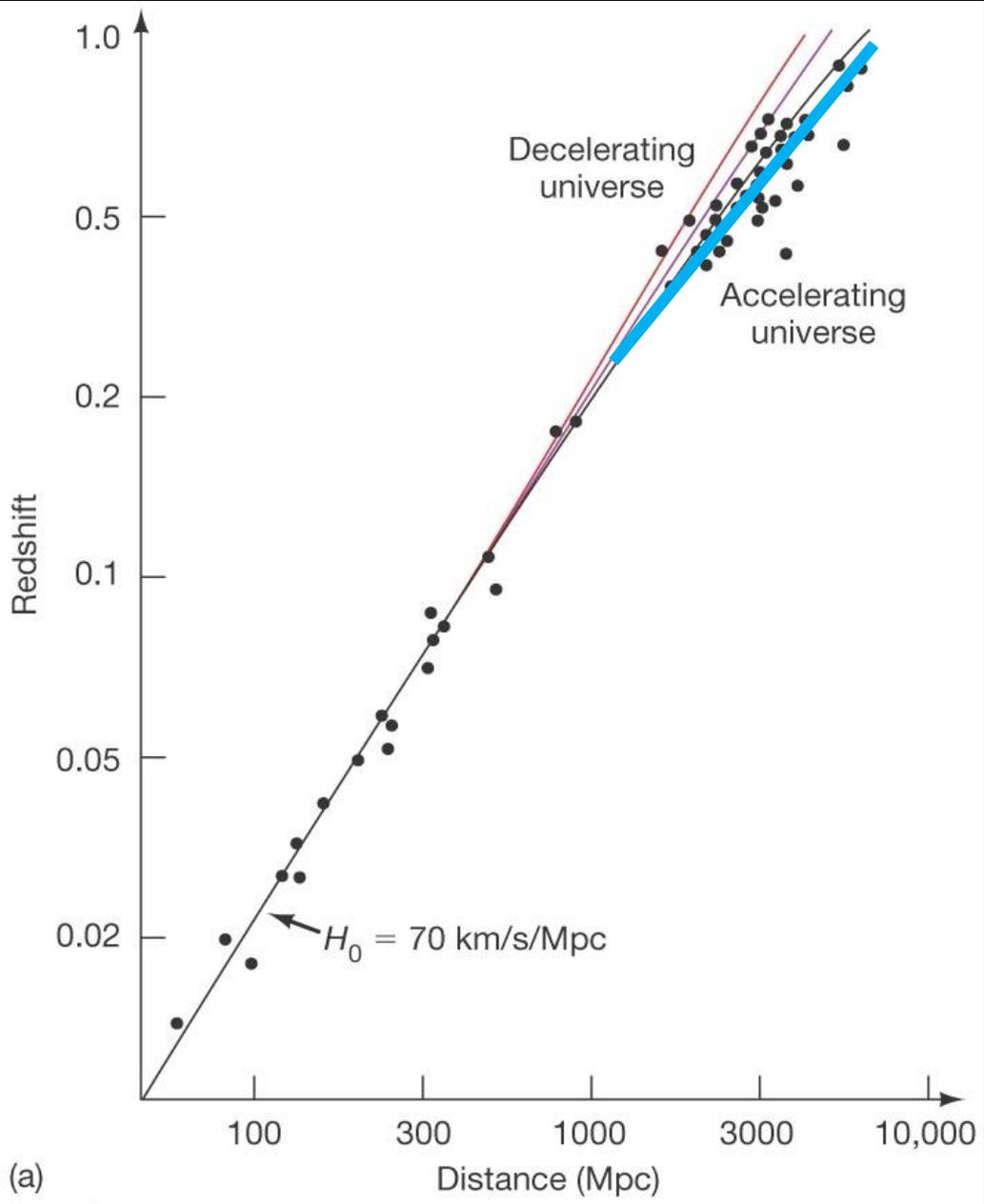
Linha preta: lei de Hubble supondo que a expansão universal é constante no tempo

Linhas vermelhas: se o universo desacelera: distâncias maiores correspondem um z maior do que prevê a lei de Hubble.

A curva mais afastada da lei de Hubble corresponde a uma maior taxa de desaceleração do Universo ⇒ universo mais denso.

(a)

Então... PARECE QUE O UNIVERSO ESTÁ ACELERANDO!!!



Galáxias a distâncias maiores parecem estar se afastando mais lentamente do que a lei de Hubble prediz!

Supondo que estes dados estejam corretos, o que estaria acelerando o universo ?

Esta aceleração foi prevista pelo modelo cosmológico relativístico através da chamada constante cosmológica Λ

Não se conhece a interpretação física para Λ ...

Energia escura : um campo desconhecido (nem matéria, nem radiação) que cria uma força repulsiva e seu efeito seria observado somente em grandes escalas...