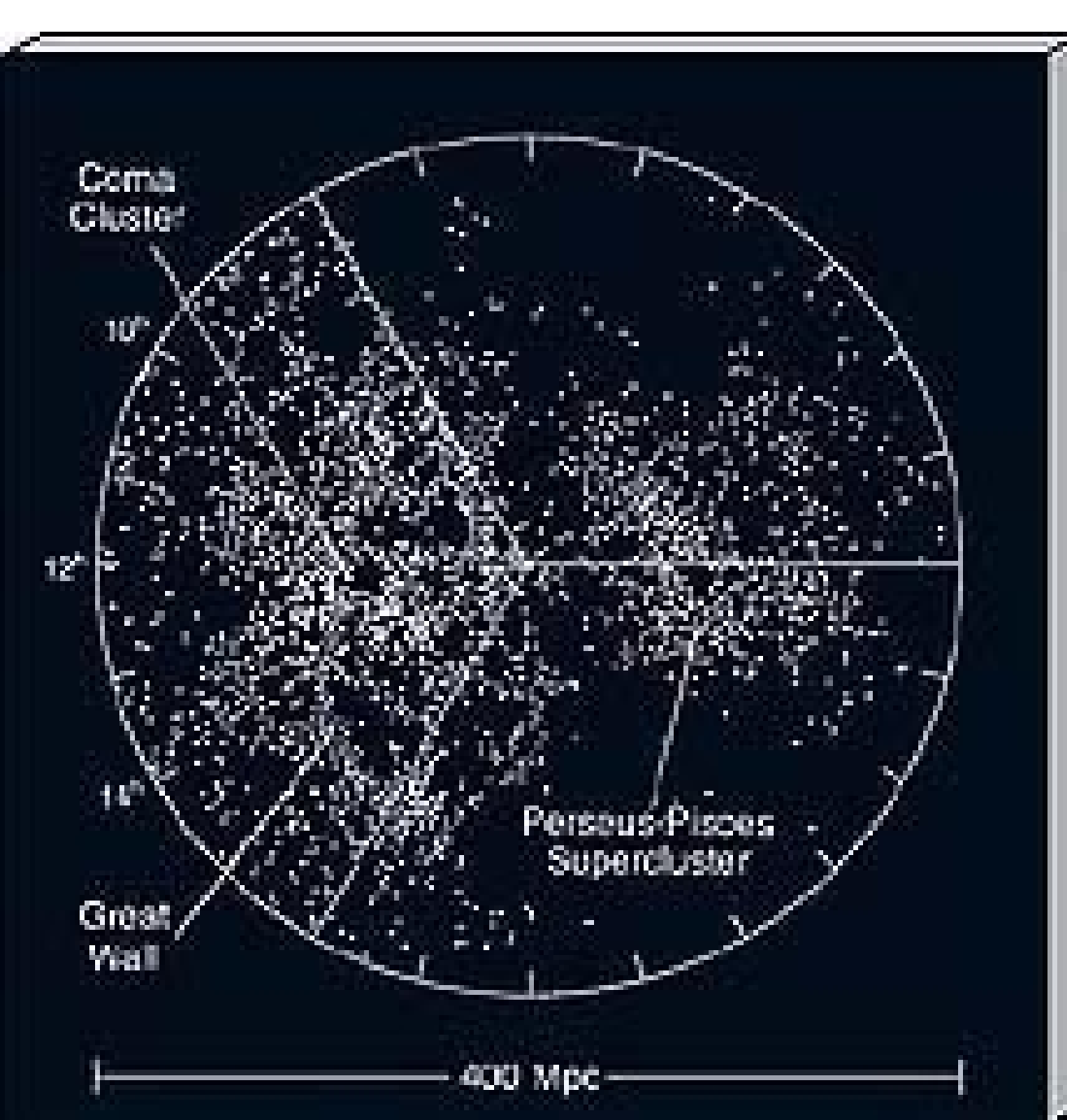


# **Cosmologia (cap. 15)**

**FIS004**

**Gustavo A. Guerrero E.**

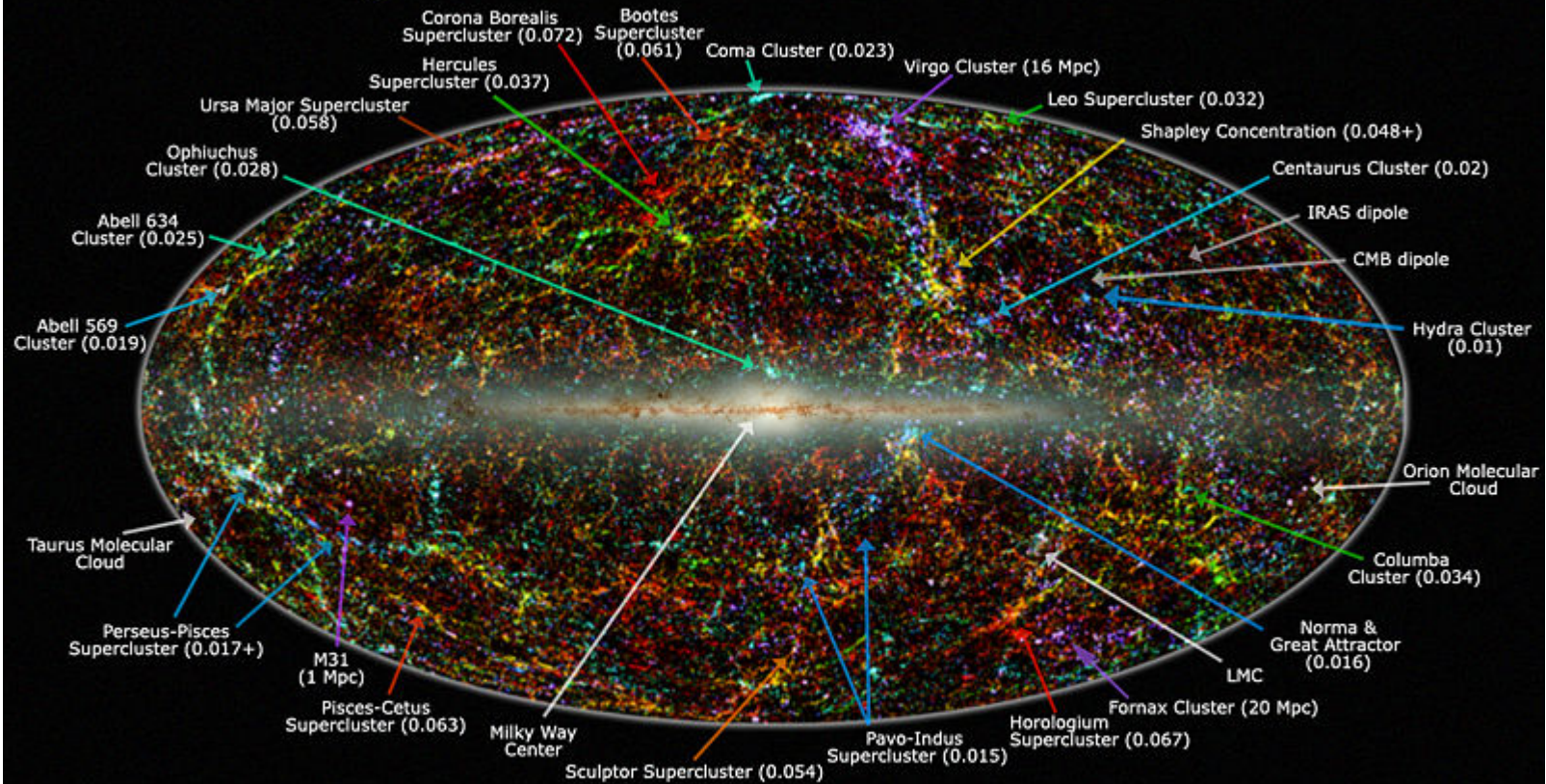
- **Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Caps. 25 e 26)**
- **Agradecimentos: E. M. de Gouveia Dal Pino**



4500 galaxias

Regioes escuras:  
devido a  
obscurecimento  
por nossa galaxia

# Large Scale Structure in the Local Universe



**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift). Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

**Catalogo 2MASS: IV proximo:**

**+ 1,5 milhoes de galaxias:  $0,01 < z < 0,1$**

**(40 Mpc  $< d < 400$  Mpc)**

# Maiores Estruturas do Universo

**Aglomeracao tem um final?**

Parece que sim

**Amostras grandes de gals.** (como vimos no Cap. 14):

estruturas com tamanhos ate 200 Mpc

esses estudos ainda: **LOCAIS** (cobrem pequena % dos QSOs mais distantes)

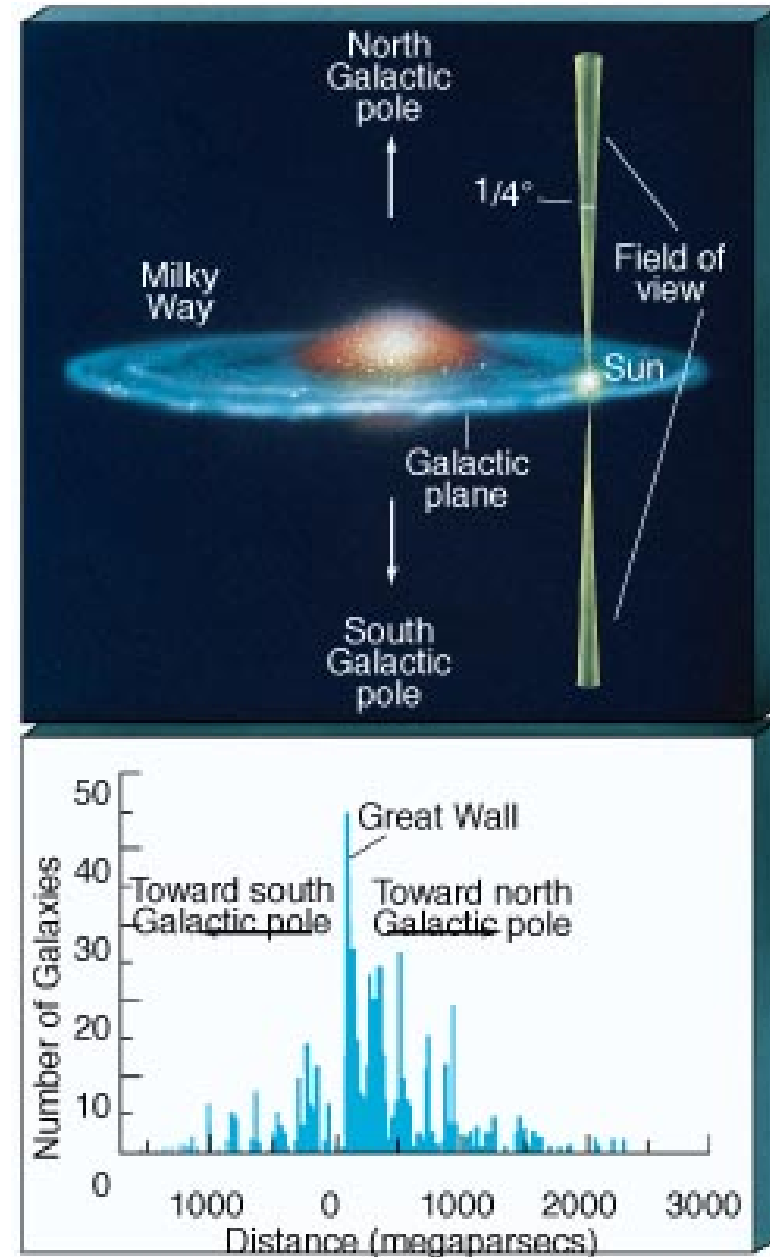
**Solucao:**

Estudar campo **pequeno mas PROFUNDO:**

ate **d= 2000 Mpc** ( $z>1$ )

# Amostra de galaxias 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**



# Maiores Estruturas do Universo

- Acredita-se que: **Universo** nao mais aglomerando em escalas **> 200 Mpc**
- **Acima de escalas 200 Mpc:** universo **HOMOGENEO**
- **Cubo de 300 Mpc:** tomado **qualquer lugar** no Universo – encontramos ~ **100.000 galaxias** (excluindo-se galaxias fracas anãs e Irrs.)



# Princípio Cosmológico

- **HOMOGENEIDADE:**

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



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

- **ISOTROPIA:**

Universo: igual em qualquer direcao



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

Qualquer amostra de “feixe profundo”: similar n. de **galaxias** em qualquer direcao do ceu observada

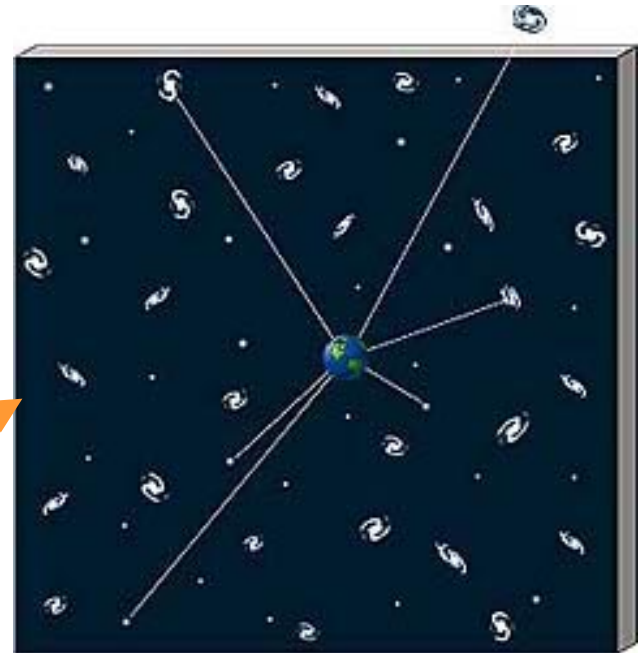
# Princípio Cosmológico (PC)

- **Implicacoes importantes:**
  - **Universo nao deve ter extremidades (violaria homogeneidade)**
  - **Nao possui centro (violaria isotropia = igualdade em todas as direções)**



# Expansao Cosmica

- **Paradoxo de Olbers:** Por que o ceu é escuro a noite?
  - **Pelo PC:** Universo Homogeneo e Isotropico
  - Suponhamos que seja tambem: **infinito em extensao espacial e nao mude com o tempo** (como se acreditava ate 1º metade do sec. 20)
  - Em media Universo seria uniformemente povoado por galaxias repletas de estrelas
  - Quando olhamos o ceu a noite: deveriamos sempre ver uma estrela em qualquer linha de visada: **ceu deveria ser todo ele brilhante como o sol**



# Expansao Cosmica

- Paradoxo de Olbers (final do sec. 19):

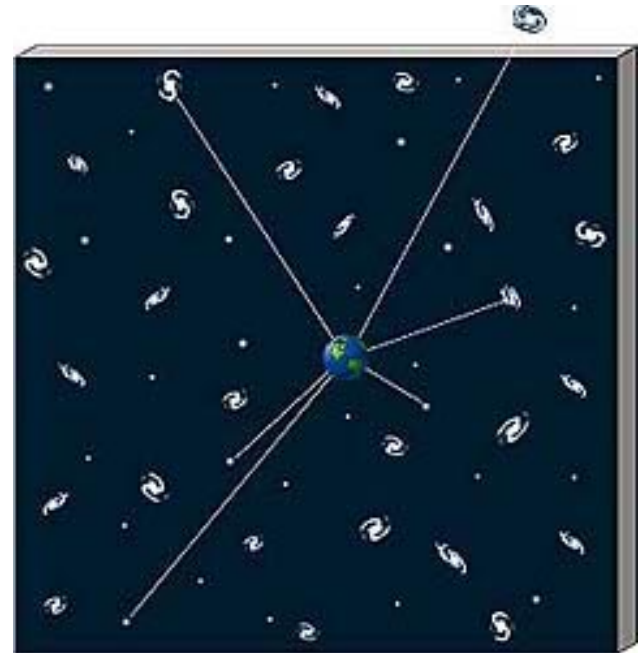
Por que entao o **ceu é escuro**?

Resposta:

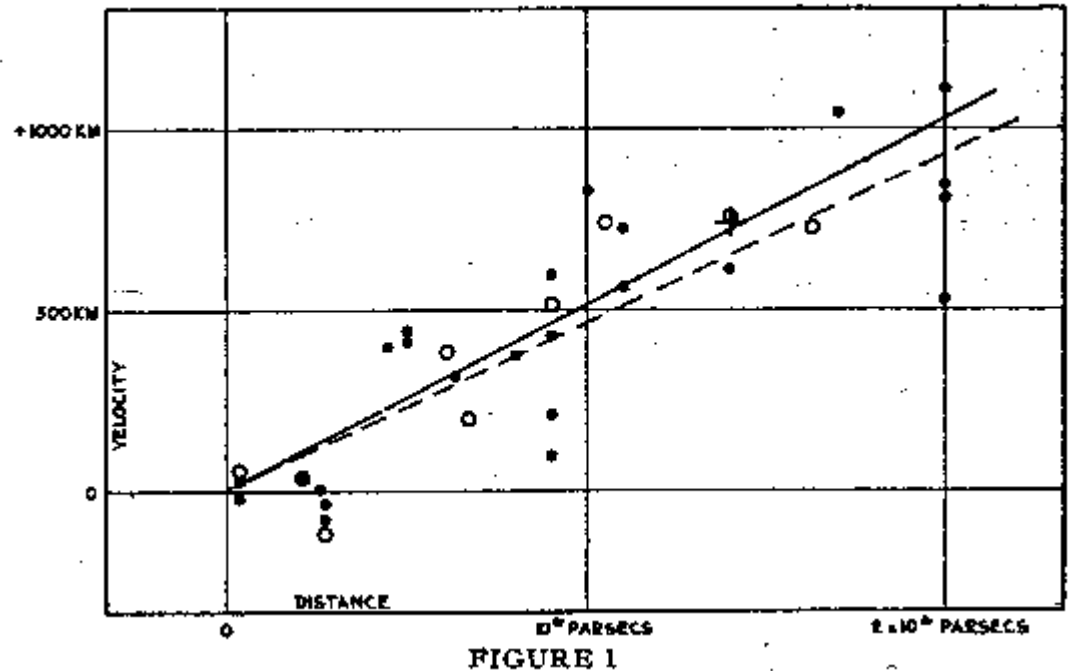
Se Universo realmente **Homogeneo e Isotropico**

→ Entao **nao deve ser infinito e/ou nao é estatico**

→ **evolui com o tempo**



# Lei de Hubble



Todas as galaxias estão se afastando

Supondo que **v de recessão** das galaxias mantiveram-se as mesmas desde início do Universo:

**Quanto tempo levaria 1 gal. para chegar à posição atual?**

# Lei de Hubble

Quanto tempo levaria 1 gal. para chegar à posição atual?

Lei de Hubble:

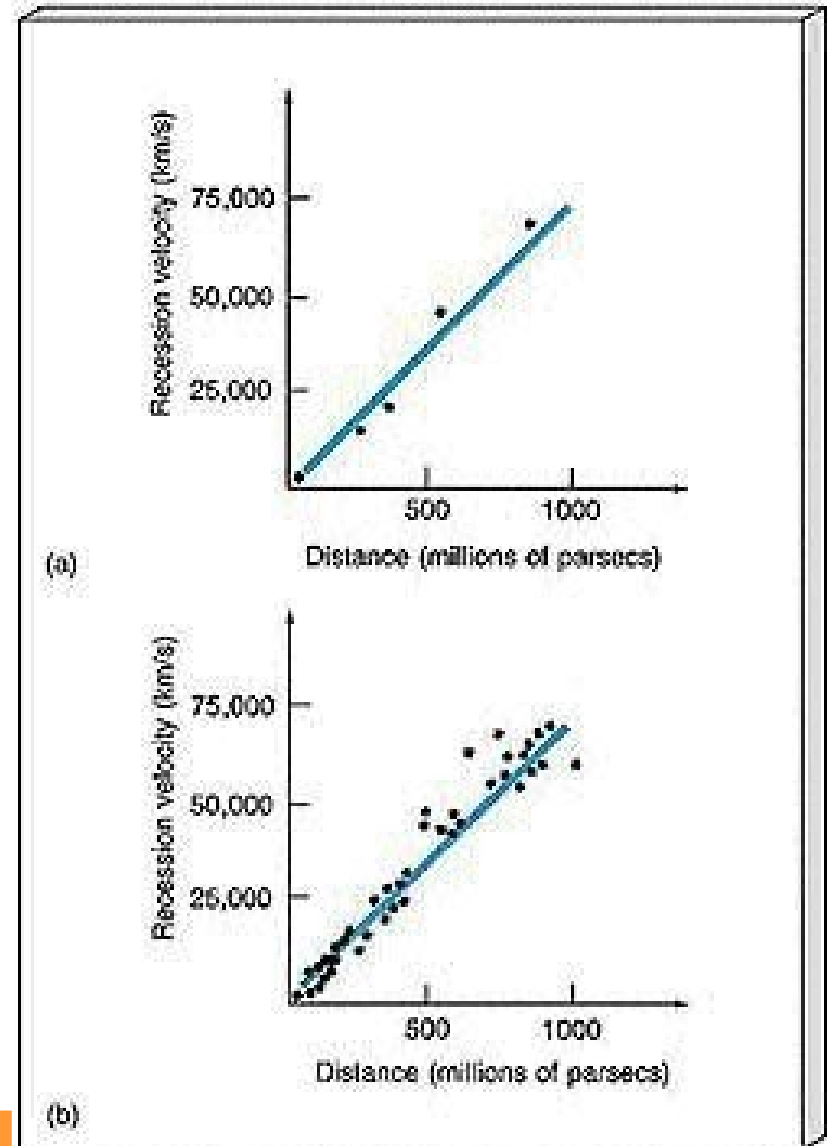
$$v = H_0 d$$

$$t = d/v = d/H_0 d = 1/H_0 =$$

$$t = 1/75 \text{ km/s/Mpc}$$

$$t = 13 \text{ bilhões de anos}$$

Como o  $t$ : não depende da distância da gal.:  
gals. 2 x mais distantes: tem  $v$  2 x maior –  
portanto levaram igual tempo para chegar  
até a distância onde estão



# Lei de Hubble e o Big Bang

Lei de Hubble nos diz que:

~ **13 bilhões de anos**: todas as galáxias estavam juntas em 1 mesmo ponto de partida!

**IDADE DO UNIVERSO: finita!**

**Acredita-se que matéria e radiação (TUDO)**: confinado em 1 ponto a 13 bi. de anos



A partir daí: **esse ponto explodiu**: fazendo matéria **expandir para todos os lados a grandes v**: posição e v atuais das galáxias decorrentes desse grande impulso inicial:

→ **BIG BANG**

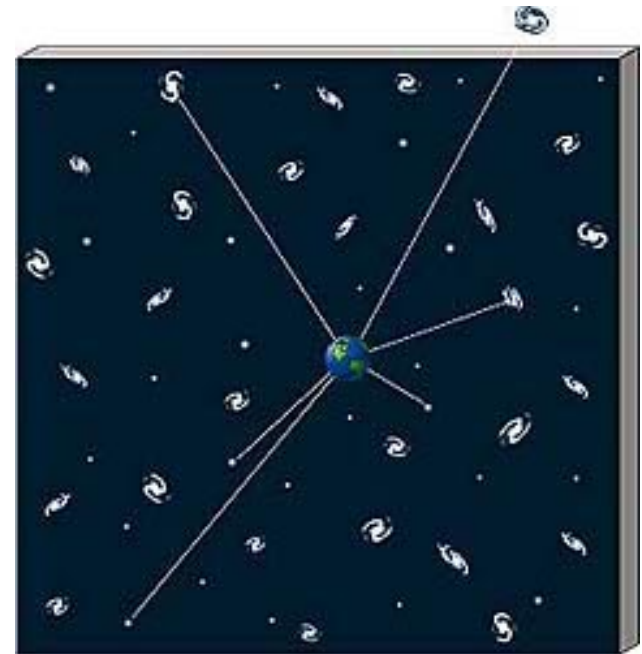
# Lei de Hubble e Big Bang

- Explica porque **ceu é escuro à noite (paradoxo de Olbers)**

Por causa da **evolucao do Universo:**

Vemos apenas 1 parte finita do Universo: **regiao dentro de 13 bilhoes de anos-luz**

O que esta alem disso é desconhecido **pois sua luz nao nos alcançou ainda**



# O Big Bang (BB)

- Sabemos que BB ocorreu, mas onde?
- **Pelo PC:** Universo = em todos lugares
- Mas Lei de Hubble:  
**todas as galaxias criaram-se em 1 ponto em dado momento no passado**

**Este ponto nao seria entao diferente do resto do Universo violando a suposicao de homogeneidade do PC?**

Resposta: NAO

# O Big Bang (BB)

- **Para entender por que NAO ha 1 centro no Universo**  
→ Mudemos nossa percepcao
- Se supomos: BB foi 1 explosao que varreu materia pelo espaco e formou as galaxias que vemos: **deveria haver 1 centro e 1 borda :**  
→ **PC nao seria valido**
- Unico modo de ter **LEI de Hubble e PC satisfeitos:**

**O BB envolveu o UNIVERSO INTEIRO nao so a materia e radiacao dentro dele – mas o UNIVERSO propriamente!**

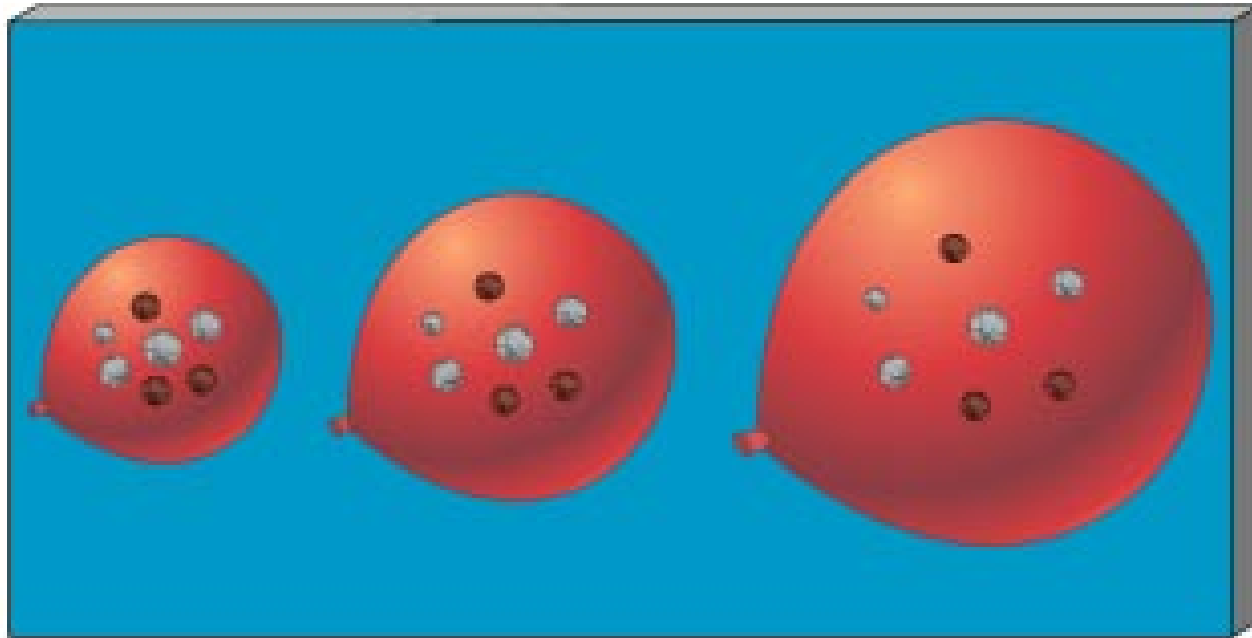
**Galaxias nao se expandiram dentro dele: mas UNIVERSO EM SI EXPANDIU E ESTA EXPANDINDO**

**Galaxias:** afastam-se porque o **TECIDO do ESPACO** esta expandindo

Temos de fato: **EXPANSAO DO ESPACO = BALAO**



# O Big Bang (BB)



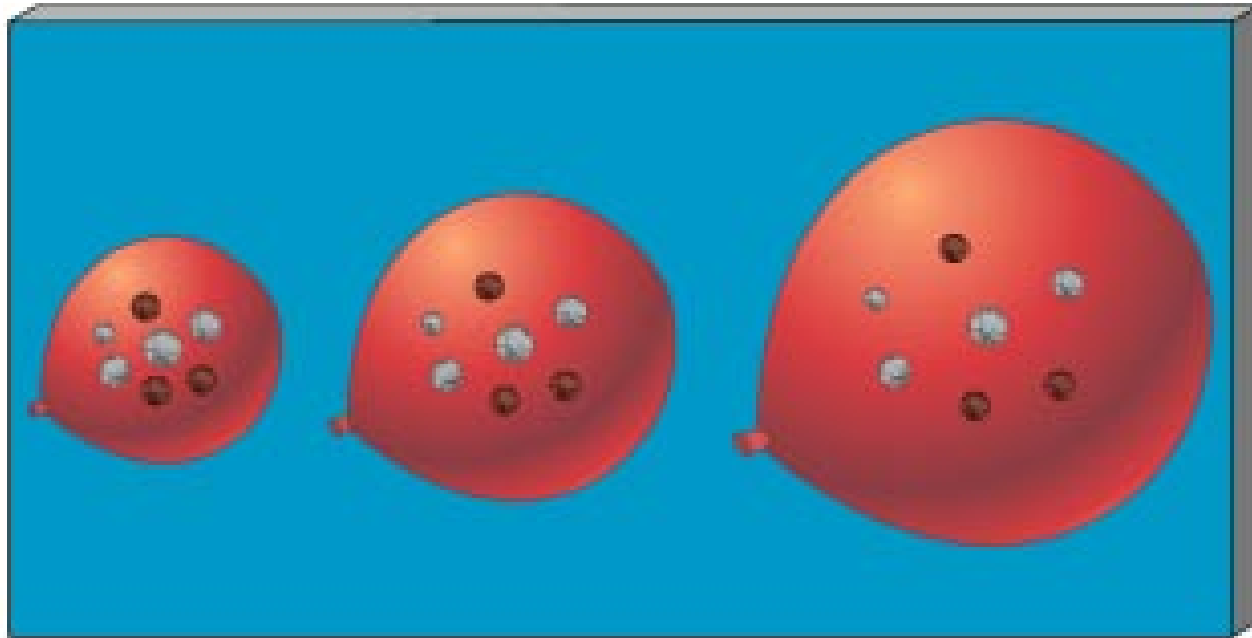
**BB: analogia com balao com moedas sobre superficie (galaxias):**

Todos pontos do balao: iguais

À medida que balao infla: eu sentada numa moeda veria as demais afastando-se → moedas + distantes: afastam-se + rapido (lei de Hubble)

**Moedas nao crescem, nao se inflam junto com balao:** igual a galaxias, estrelas, seres humanos: nao se expandem com Universo

# O Big Bang (BB)

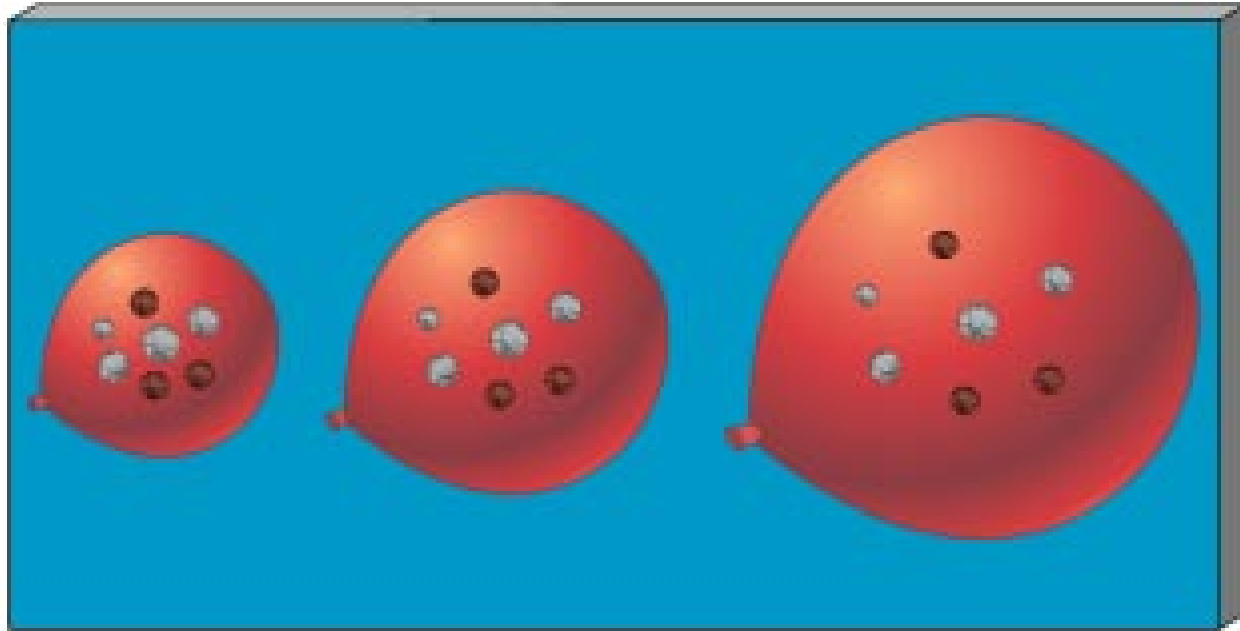


## Nao importa onde estejamos:

as outras galaxias estarao se afastando: isto é a **base para o PC** e nao ha posicao que possa ser identificada como a posicao onde o Universo comecou

**Em qualquer lugar:** todos veem 1 expansao geral descrita pela **Lei de Hubble**

# O Big Bang (BB)



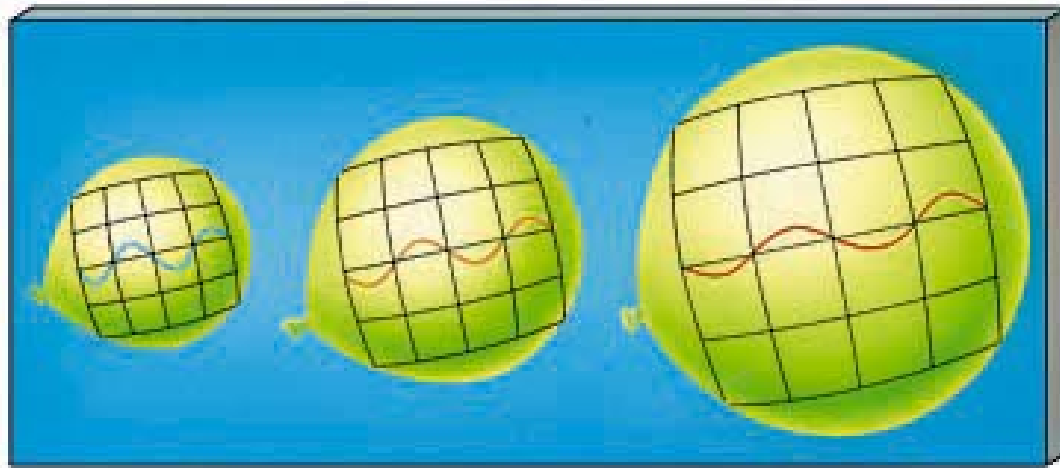
**Se balao se esvaziasse de 1 so vez:**

todas moedas chegariam ao mesmo lugar ao mesmo tempo (**quando balao atinge tamanho zero**)

**Nao ha nenhum ponto do balao:** que se poderia dizer ser o lugar onde isso ocorreu

**Balao inteiro evoluiu de 1 ponto:** tal como BB compreendeu Universo inteiro e expandiu a partir desse ponto

# O Deslocamento para o vermelho (redshift) cosmologico



**Redshift cosmologico de 1 foton:**

Mede quanto Universo expandiu desde momento em que foton foi emitido

A medida que Universo expande: **fotons sao esticados em comprimento de onda ( $\lambda$  cresce !)**

# Destino do Universo

**Universo atual expandindo:**

**continuará para sempre?**

**Se não: o que acontecerá?**

**Para responder:**

**Consideremos seguinte problema mais familiar**

# Destino do Universo

## Densidade Crítica:

Seja 1 foguete lançado da superfície do planeta:  
Qual será seu movimento?

### 3 possibilidades dependendo de sua $v$ inicial:

a) se  $v$  grande o bastante:  $v > v_{esc} = (2GM/R)^{1/2}$

foguete escapará e não voltará à superfície

$v$  diminuirá devido à gravidade do planeta: mas não será zero nunca

→ órbita não-ligada

# Destino do Universo

## Densidade Critica:

Seja 1 foguete lançado da superfície do planeta:  
Qual sera seu movimento?

**3 possibilidades dependendo de sua  $v$  inicial:**

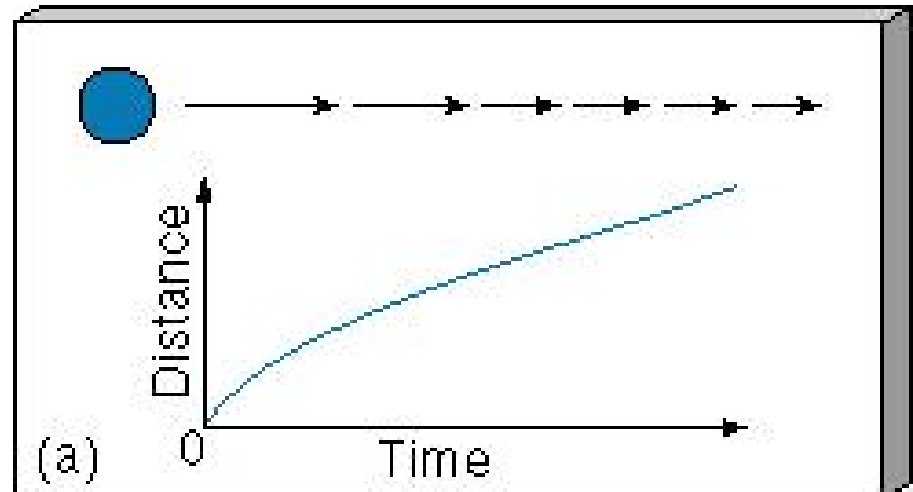
**b) se  $v < v_{esc} = (2GM/R)^{1/2}$**

**foguete atingira 1 distancia maxima e caira de volta à superfície**

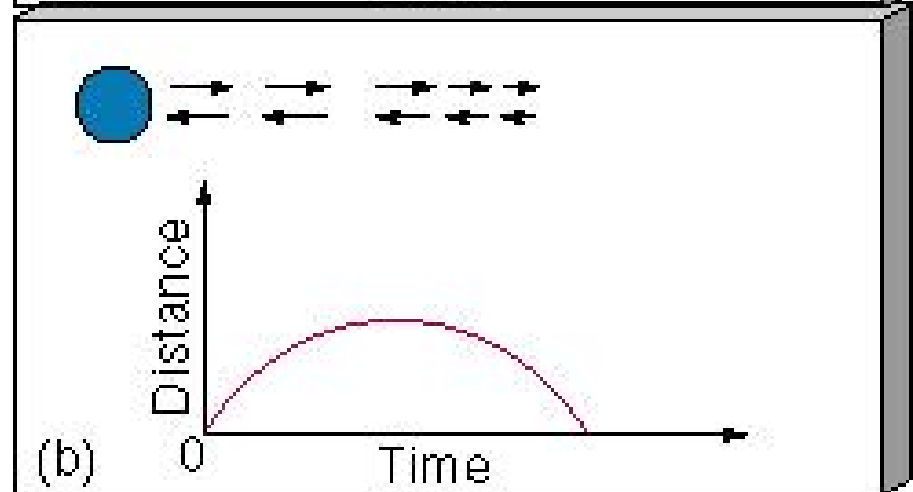
**→ orbita ligada**

# Foguete

- (a)  $v > v_{esc}$   
orbital **nao ligada**



- (b)  $v < v_{esc}$   
orbital **ligada**





# Destino do Universo

## Densidade Critica:

Argumento semelhante com Universo: **Sejam 2 galaxias:**

dependendo de sua **v recessao:**

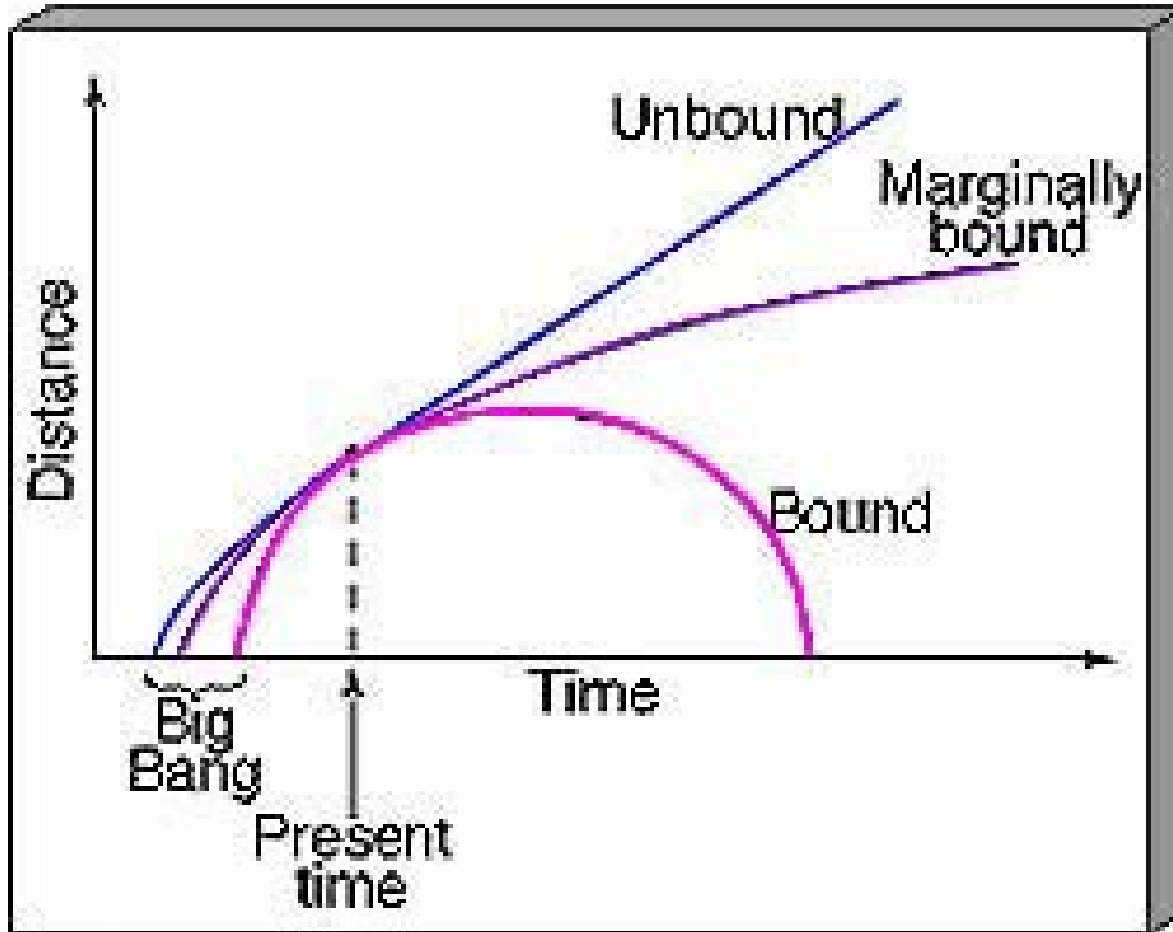
a)  **$v > v_{esc}$** : **d** crescerá indefinidamente

b)  **$v < v_{esc}$** : **d** crescerá até certo ponto e depois diminuirá

c)  **$v = v_{esc}$** : marginalmente ligado:

→ **Universo expandirá indefinidamente mas com v cada vez < (a e c)**

# Destino do Universo



# Destino do Universo

- Em todas situações: **gravidade tenderá a desacelerar Universo** com o tempo
- Quanto  $> M_{\text{universo}} \rightarrow > F_G$  contra expansão  
 $M_{\text{universo}} = \frac{4}{3} \pi \rho R^3$
- Se  $v = v_{\text{esc}}$  :  
→ densidade do Universo crítica =  $\rho_0$
- Se Universo com  $\rho$  alto:  $\rho > \rho_0$ 
  - $M_{\text{universo}}$ : suficiente para deter expansão e causar recolapso  
**(LIGADO)**
- Se  $\rho < \rho_0$ :
  - $M_{\text{universo}}$ : não suficiente para deter expansão: continuará indefinidamente  
**(NAO-LIGADO)**
- Se  $\rho = \rho_0$ : **MARGINALMENTE LIGADO**

# Destino do Universo

- Se  $v=v_{esc} \rightarrow \rho = \rho_o$
- para  $H_o = 75 \text{ km/s/Mpc}$   
 $\rho_o = 3H_o^2/8\pi G = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
- Bem baixa:  $n_o = \rho_o/m_H \sim 6 \text{ part./m}^3$   
(densidade de poeira do guarda-roupa)  
  
 $\rightarrow n_o = 1 \text{ gal.}_{VL}/\text{Mpc}^3$

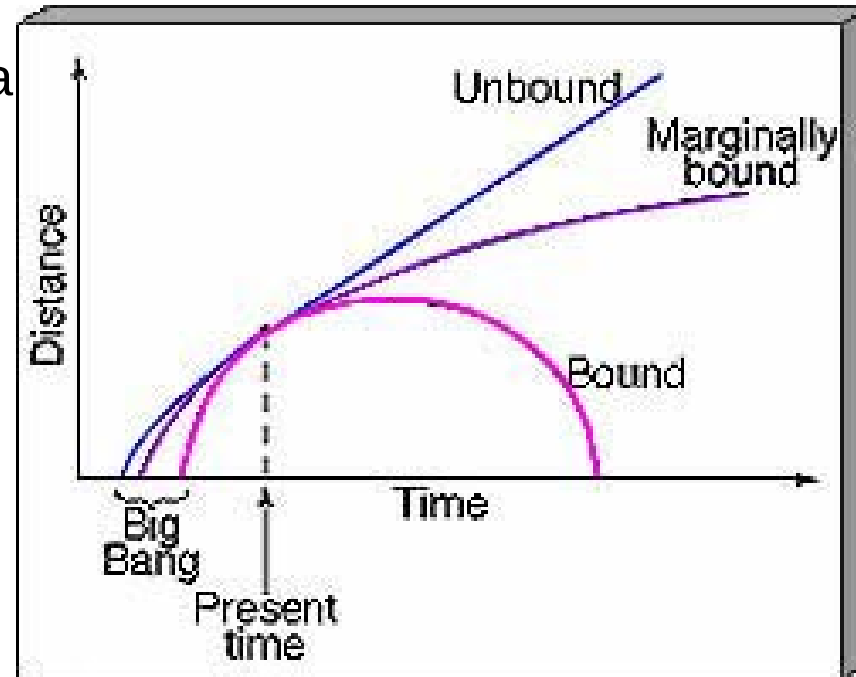
# Destino do Universo

- Se :  $\rho > \rho_0$  (ligado):

Expansão das gal.: vai terminar um dia e Universo contrairá: cada vez mais denso: **morte quente**

- Se :  $\rho < \rho_0$  (não ligado):

$\rho$  nunca será suficiente para deter expansão: gal. continuarão se afastando – radiação cada vez mais fraca com  $d$ : dado momento deixaremos de ver gal. do GL: universo parecerá escuro: eventualmente VL também sem energia: **morte fria**



- Se :  $\rho = \rho_0$ :

Universo contém exatamente a matéria necessária para que a expansão pare de acontecer: **Universo em repouso após  $t = \infty$**

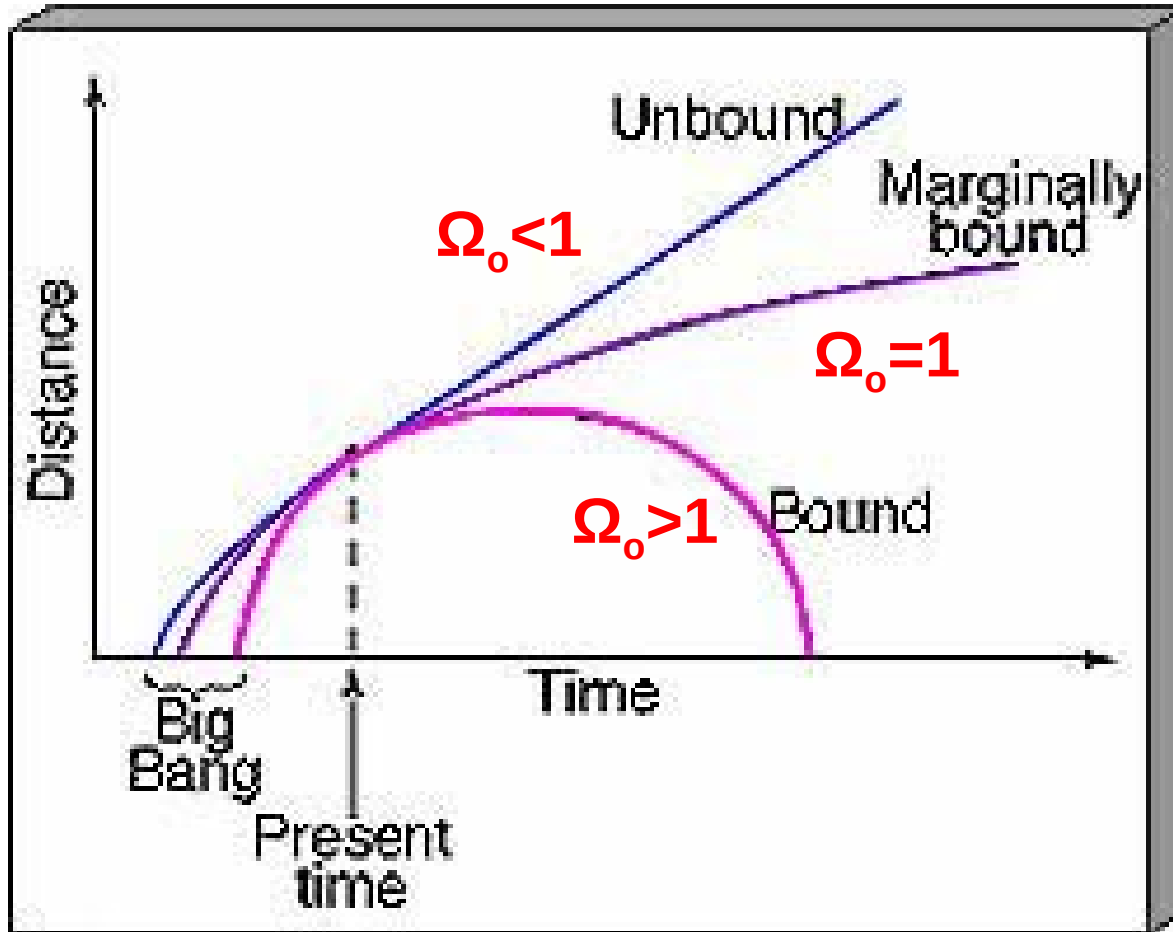
# Destino do Universo

- Tentar estimar  $\rho$  universo:  
ja que este parametro principal para distinguir entre 3 modelos
- $\rho_o = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ : densidade critica atual (se  $v=v$  esc)
- Seja densidade real:  $\rho_U$ :

$$\rho_U/\rho_o = \Omega_o \rightarrow \text{PARAMETRO DE DENSIDADE}$$

- Se  $\Omega_o=1$ : Universo tem densidade critica (**marginalmente ligado**):  
expandira para sempre
- Se  $\Omega_o<1$ : Universo expandira para sempre (**aberto**) (**nao ligado**)
- Se  $\Omega_o>1$ : Universo tera um recolapso (**fechado**) (**ligado**)

# Destino do Universo



# Destino do Universo

- Tentar estimar  $\rho_U$ :

- Medida da massa media das gals.:

$$\rho_U = N \langle M_G \rangle / V \leq 10^{-28} \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_U / \rho_o = \Omega_o = 0,01$$

→ Universo expandiria para sempre ( $\Omega_o < 1$ ) (aberto)

- Levando em conta ME?

Gals.:  $M(\text{ME}) = 10 \text{ ML}$

Aglomerados:  $M(\text{ME}) = 95\% M(\text{total aglomerado})$

- Com ME:  $\rho_U / \rho_o = \Omega_o = 0,2 - 0,3$

→ Universo expandiria para sempre (aberto)



# Destino do Universo

- Em escalas  $>$  que aglomerados: super-aglomerados e vazios:

Imprecisa distribuicao de ME

**Super aglomerado local:** presença de enorme acumulo de massa (**grande atrator**) perturba movimento das galaxias:

$$\rho_u/\rho_o = \Omega_o \sim 1$$

→ Se  $\Omega_o \sim 1$ : Universo expandira para sempre (marginalmente ligado)

**Voltaremos a esta questao depois....**

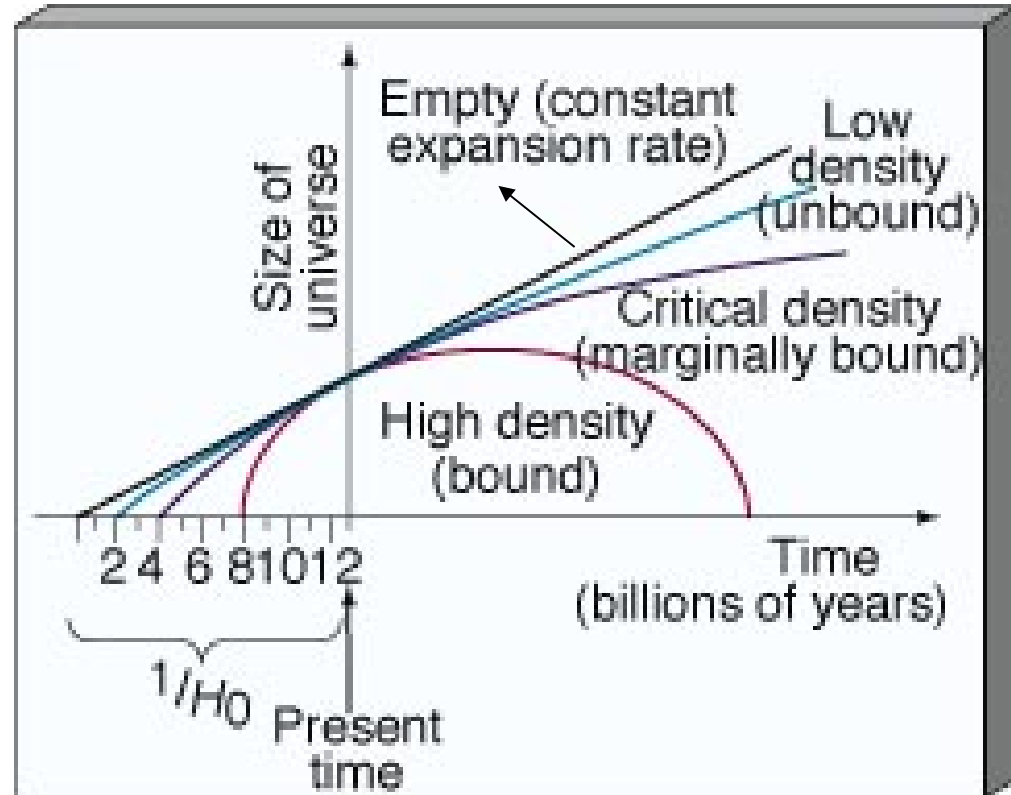
# Idade do Universo ( $t_U$ )

- Estimamos  $t_0$  : assumindo taxa de expansão  $H_0$  constante
- Porém: por causa da **gravidade** - Universo possivelmente **expandia + rápido no passado**:  
 **$H >$  no passado**
- Mas:

$$t_0 = 1/H_0$$

**Idade do Universo:**

$$t_U < t_0 = 13 \cdot 10^9 \text{ anos}$$



**Para maior densidade do Universo:** desaceleração maior

**Idade do Universo  $<$   $1/H_0$**

Idade: **decrece** quanto maior densidade do Universo

# Idade do Universo ( $t_U$ )

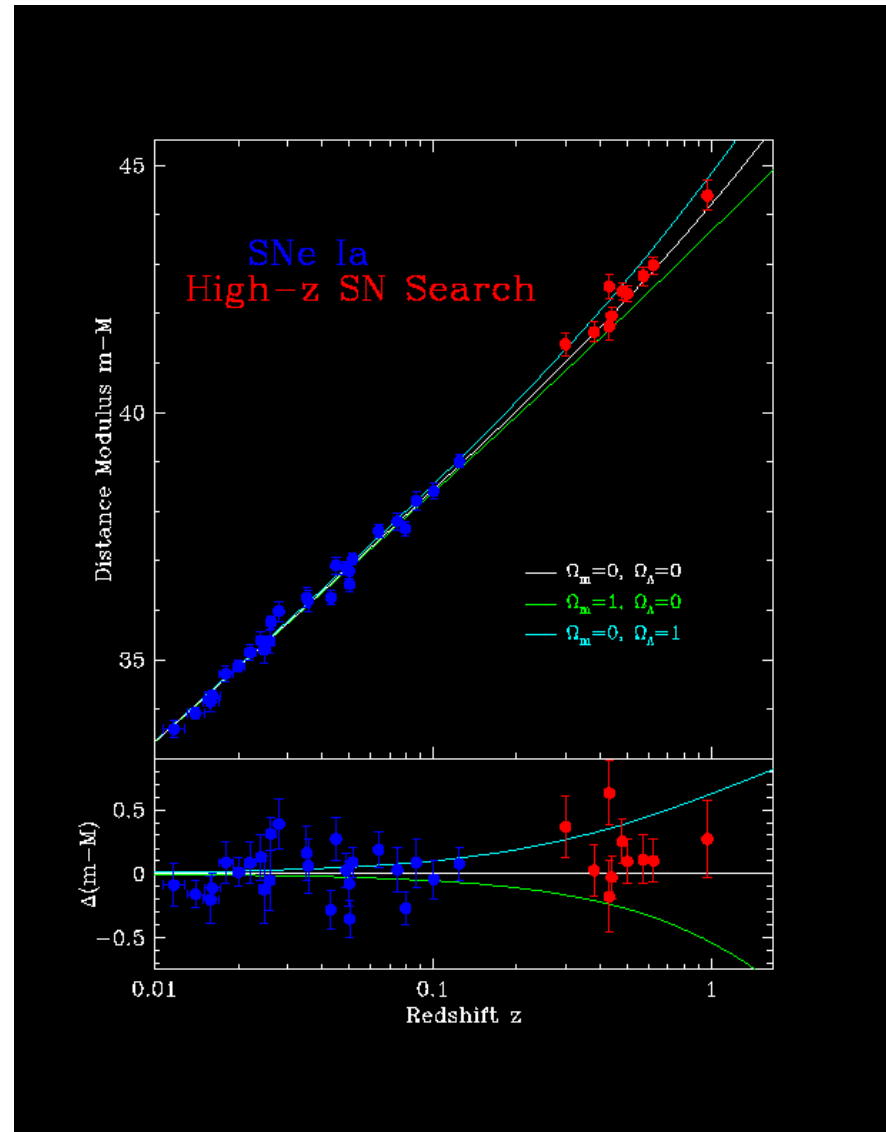
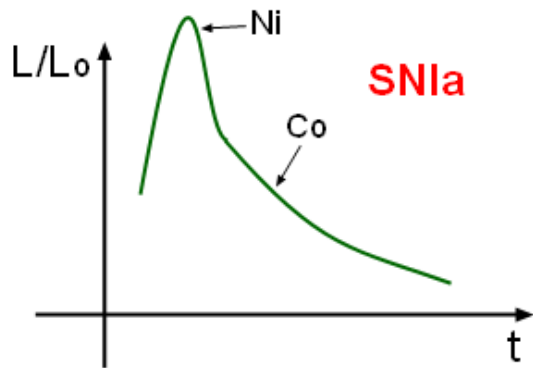
- Porém novas evidências observacionais:

Universo **HOJE acelerando**

**Fonte extra de energia:** força que se opõe a gravidade:

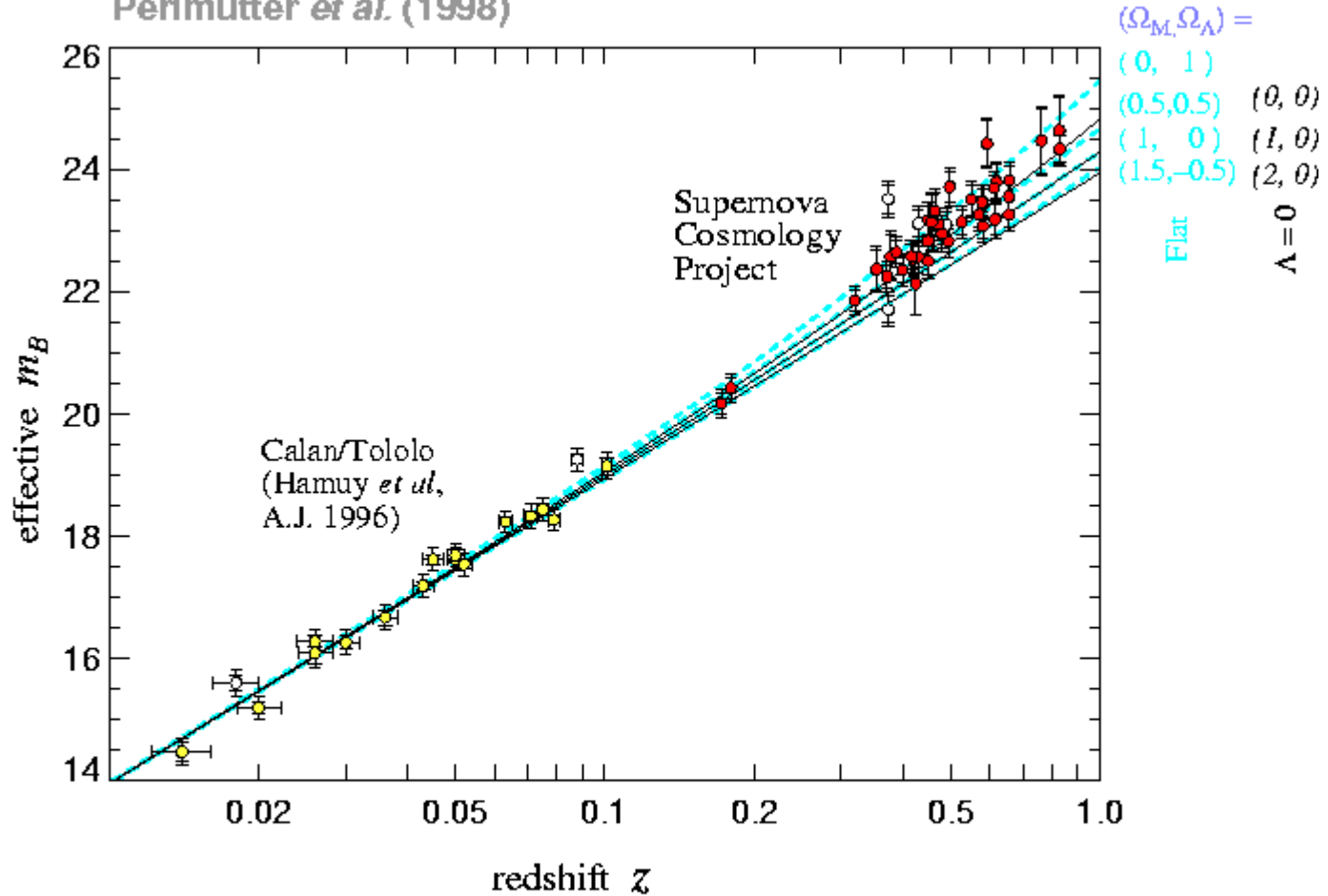
**→ ENERGIA ESCURA (EE)**

# Universo em aceleracao Hoje



High-z Supernovae Search Team

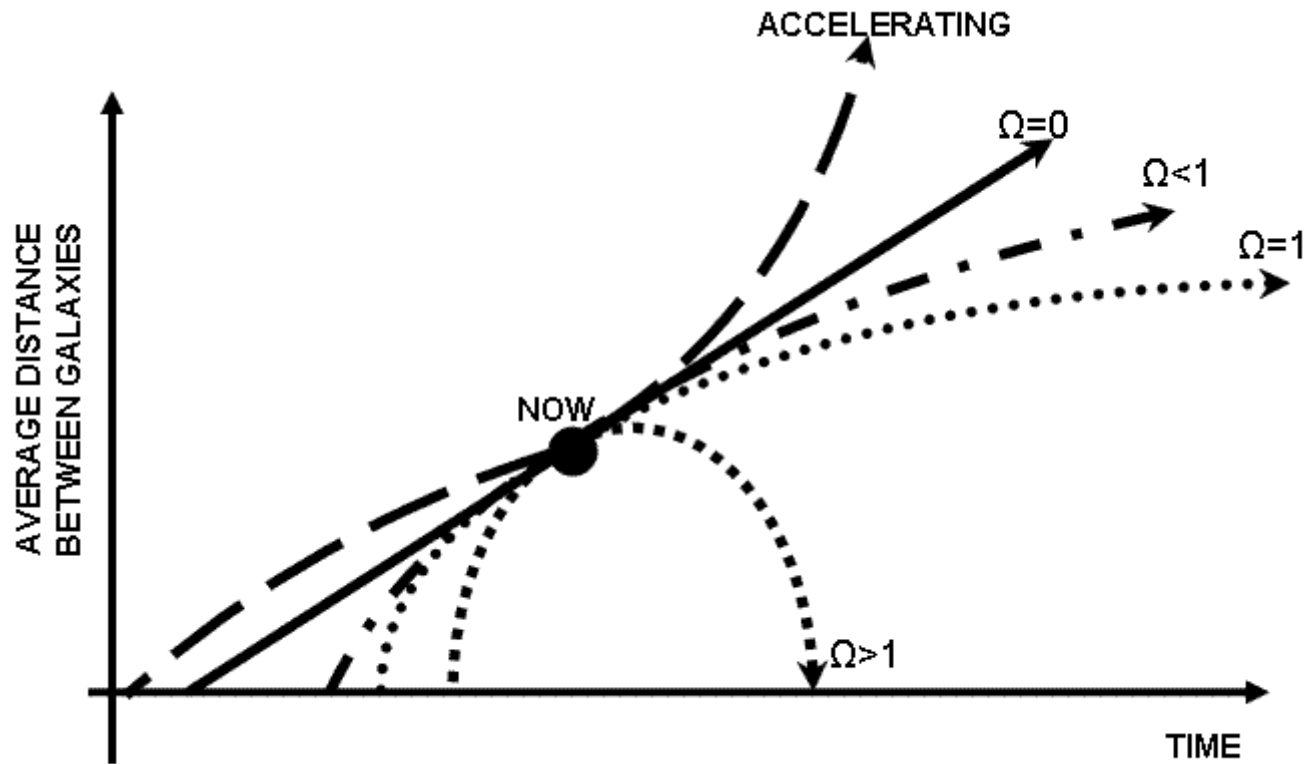
Supernova Cosmology Project  
Perlmutter *et al.* (1998)



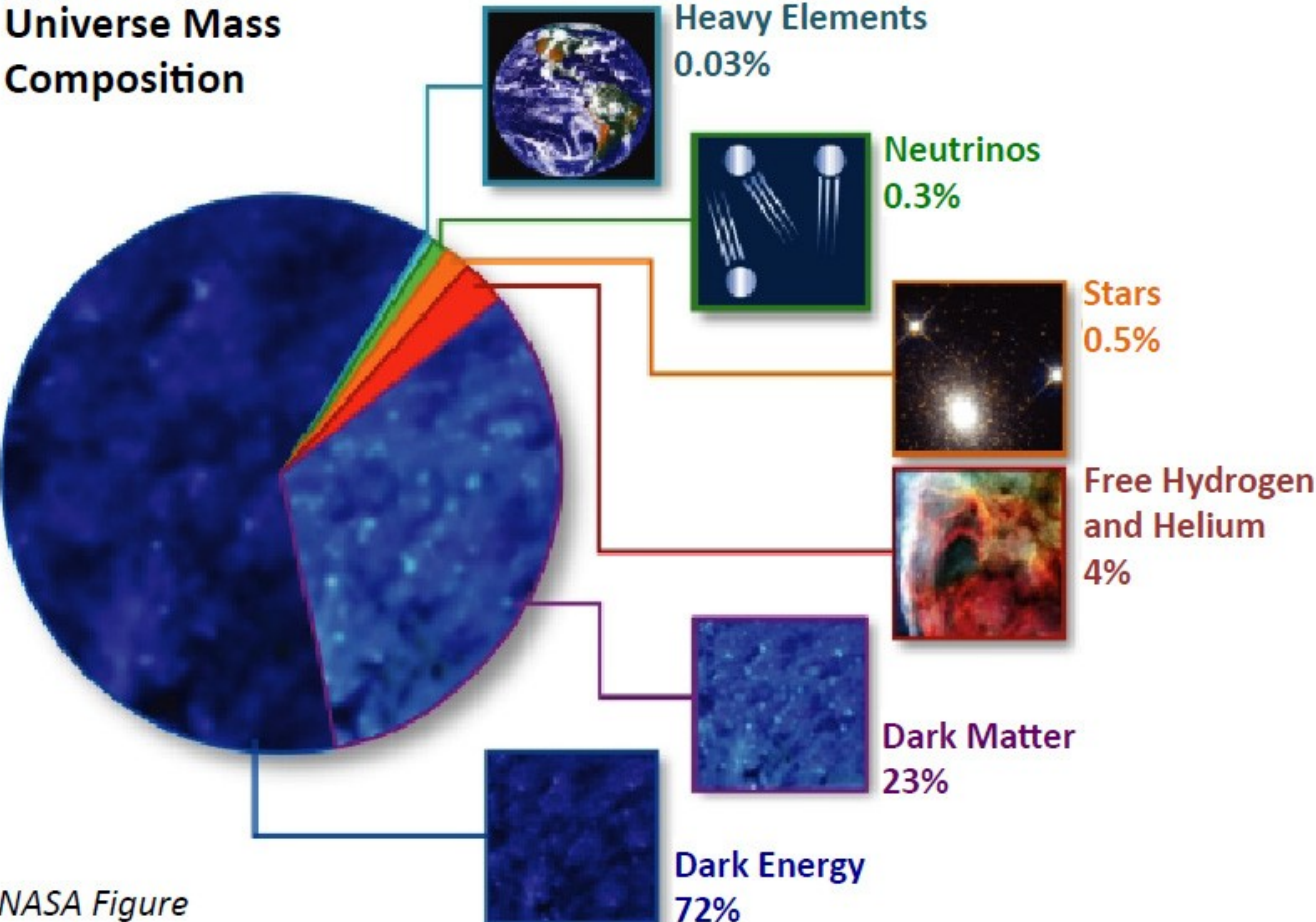
In flat universe:  $\Omega_M = 0.28 [\pm 0.085 \text{ statistical}] [\pm 0.05 \text{ systematic}]$

Prob. of fit to  $\Lambda = 0$  universe: 1%

# Universo em aceleracao Hoje



# Composicao do Universo



NASA Figure

# Geometria do Espaço

Universo expandindo de 1 ponto como um todo (nem mesmo espaço-tempo fora dele):

Não descrito por Mec. Newtoniana

**Teoria Geral da Relatividade (Einstein):**

Curvatura do espaço e dinâmica do espaço-tempo

**Massa: deforma espaço na sua vizinhança**

quanto  $> M$ ,  $> \rho$  :  $>$  curvatura

**Por causa do PC: curvatura deveria ser mesma em toda parte para Universo em grande escala**



# Geometria do Espaço

3 geometrias possiveis para Universo

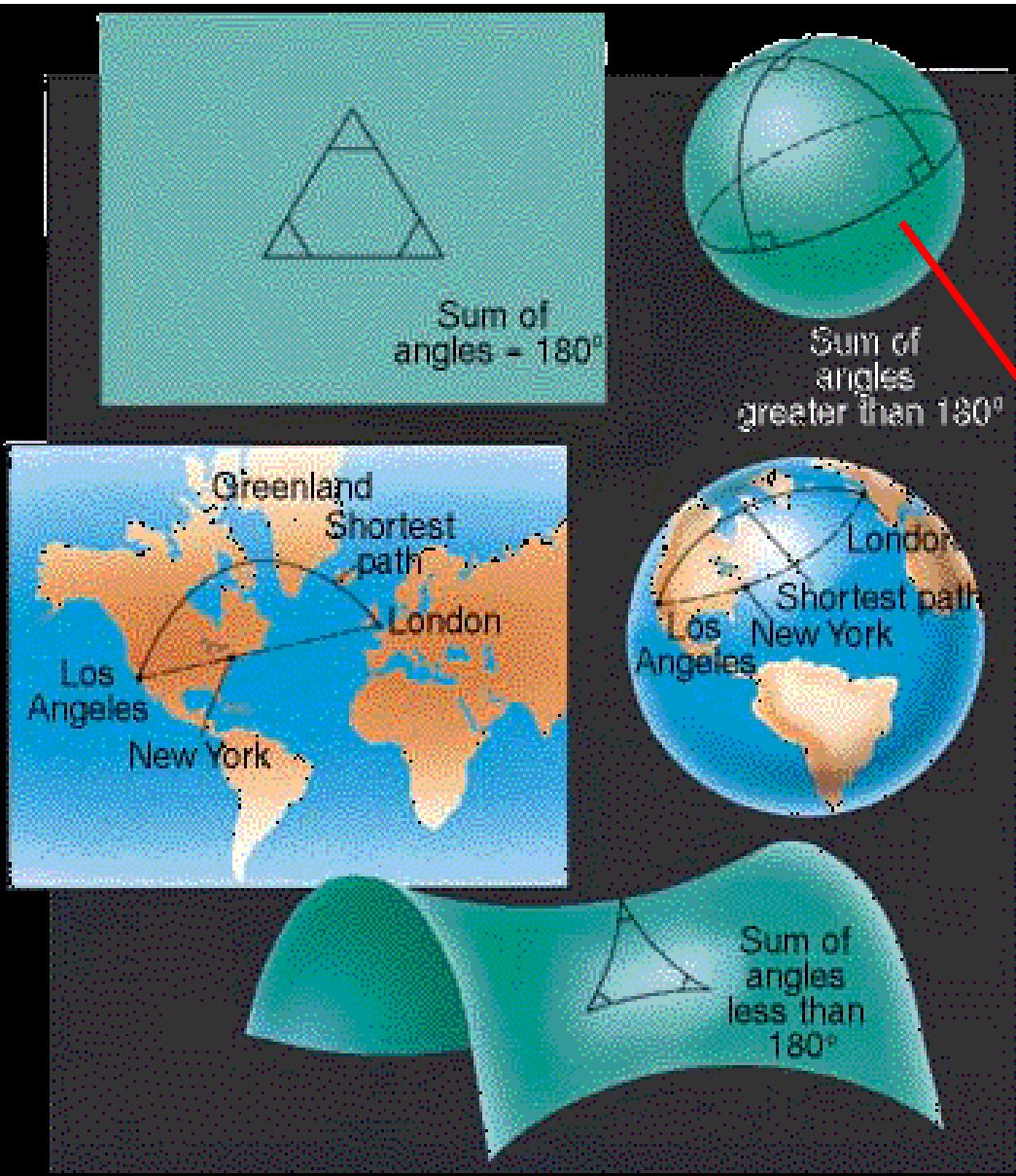
se  $\Omega_0 > 1$  ( $\rho_U > \rho_0$ ):

curvatura do espaço é  $> 0$ :  
fecha-se sobre si mesmo (~  
superf. esfera em 2D):

**Universo FECHADO:**

nao tem bordas mas é finito em  
extensao

Feixe de luz viajando sobre essa  
superficie: retornara ao mesmo  
ponto vindo de outra direcao



# Geometria do Espaço

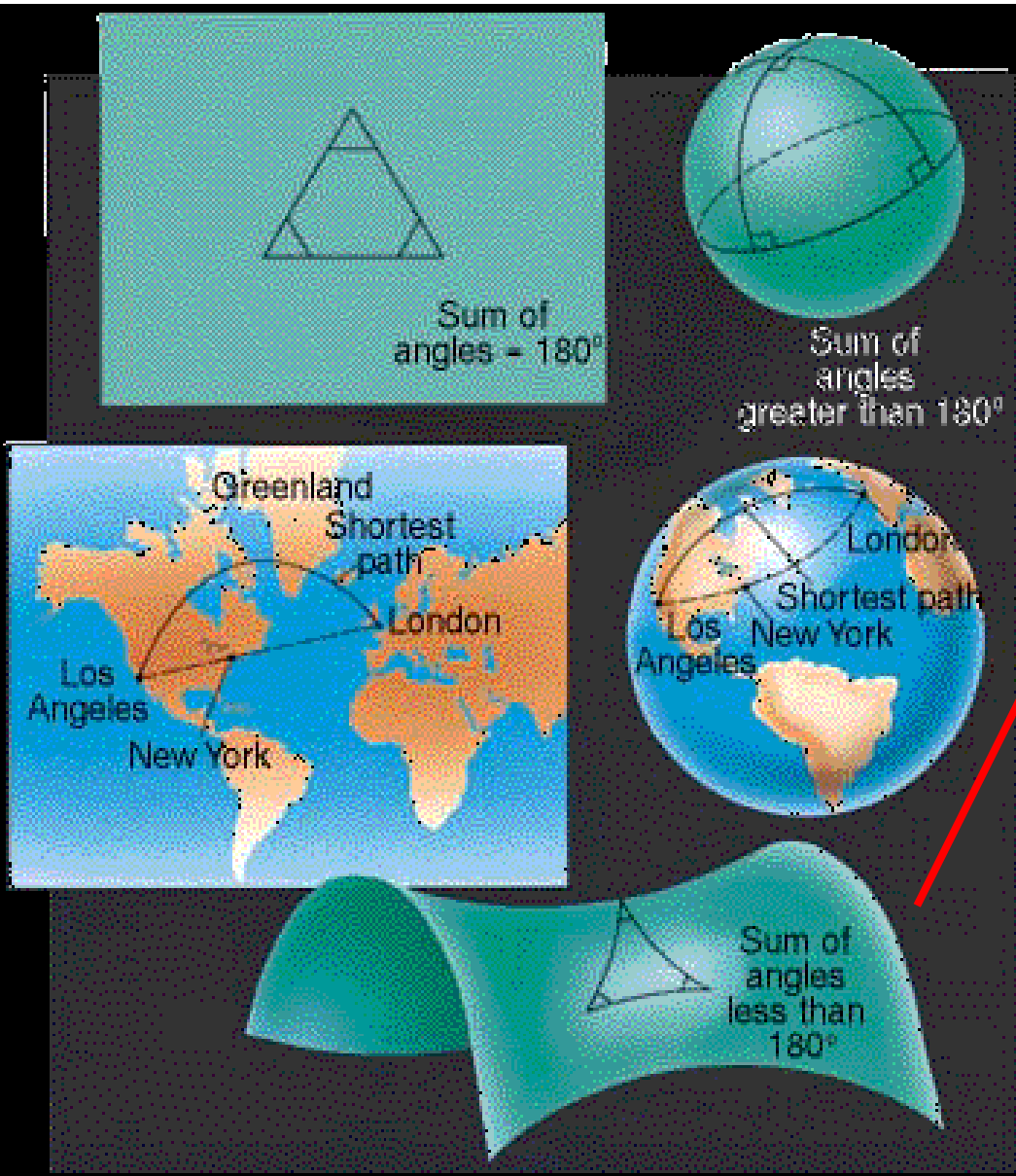
3 geometrias possiveis para Universo

se  $\Omega_0 < 1$  ( $\rho_U < \rho_0$ ):

curvatura de espaço é  $< 0$   
(~ sela do cavalo em 2D):

**Universo ABERTO:**  
infinito

**Soma dos angulos do triangulo  $< 180^\circ$**



# Geometria do Espaço

3 geometrias possiveis para Universo

se  $\Omega_o=1$  ( $\rho_U = \rho_o$ ):

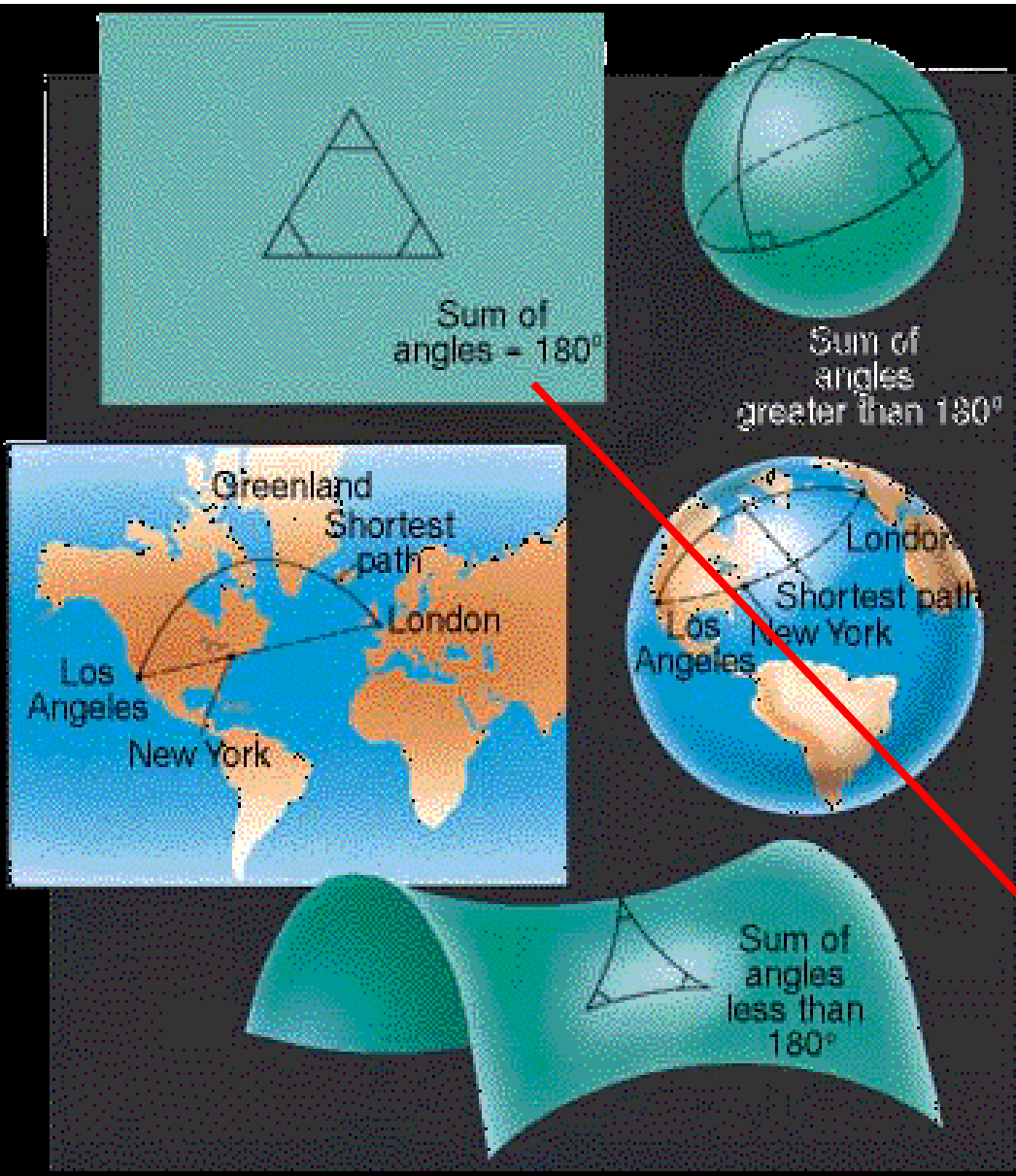
curvatura de espaço é =0:

**Universo PLANO:**

infinito em extensao

Geometria Euclidiana:

**Soma dos angulos do triangulo =180°**



# Geometria do Espaço

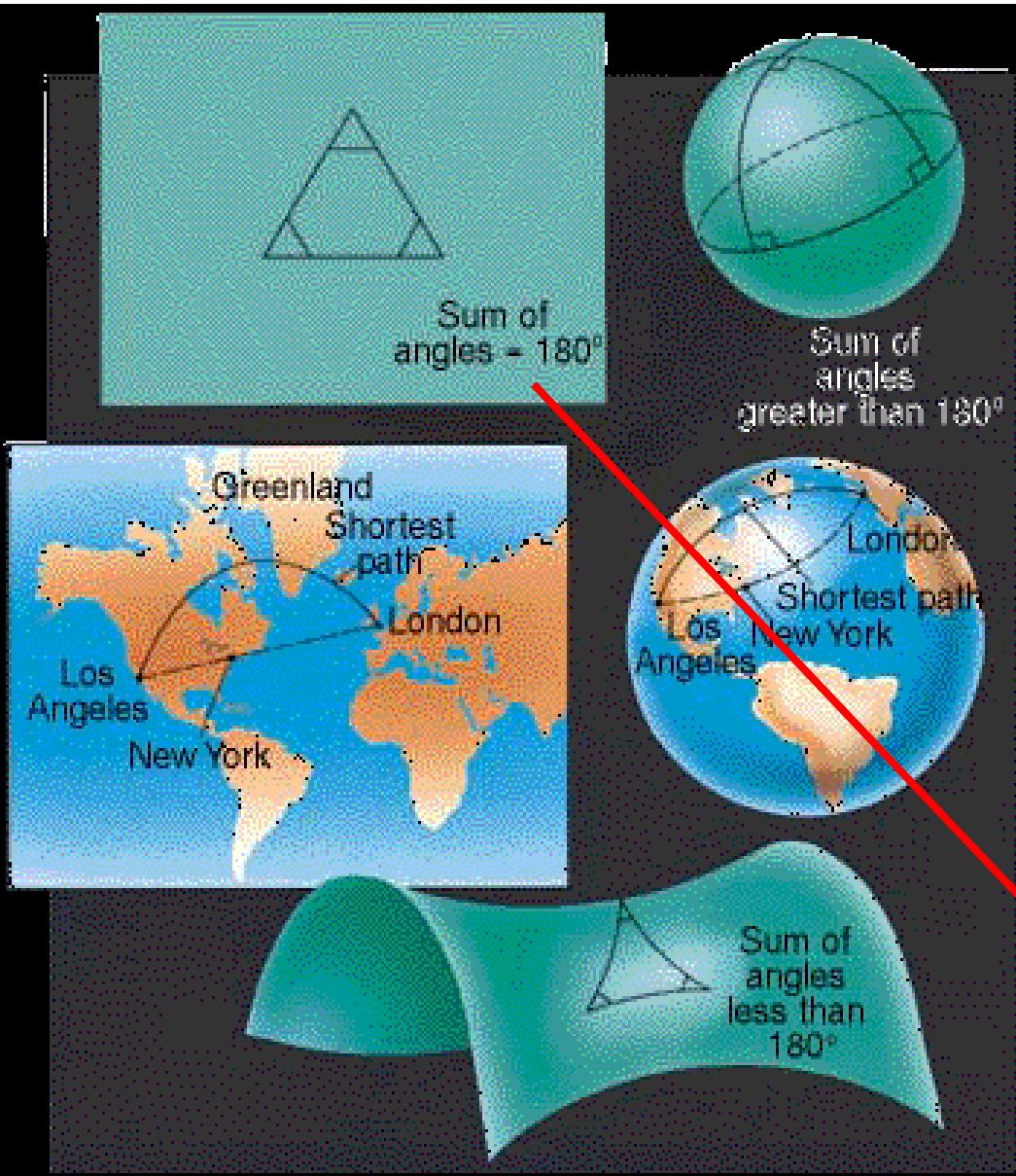
## Geometria Euclidiana:

familiar pois faz boa descrição do Universo na vizinhança da Terra

Não significa que Universo: seja **PLANO**

Tal como mapa plano de ruas: boa representação da cidade, mas sabemos que **Terra é redonda**

**Geometria Euclidiana:** boa descrição do espaço dentro da Galaxia: **curvatura do Universo desprezível em escalas < 1000 Mpc**



# Radiação Cosmica de Fundo

**1964: Penzias e Wilson:**

estudando emissão radio ( $\lambda \sim \text{mm}$ ) da VL:

descobriram emissão: todas direções – preenche todo espaço

**Prova da Origem do Universo e do BB:**



**Radiação Cosmica de Fundo (RCF)**

(ganharam prêmio Nobel 1978)

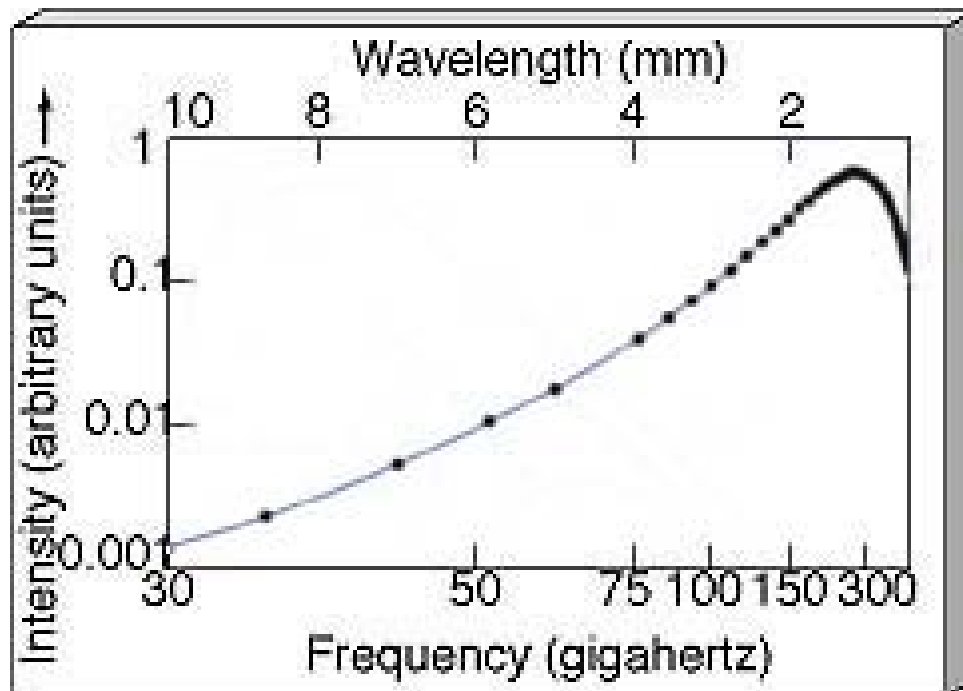
# Radiação Cosmica de Fundo

**1989: Satelite COBE:**

Espectro de micro-ondas difícil de observar antes de 1989

COBE: mediu intensidade do **CORPO NEGRO** da RCF:

$$T_{\text{RCF}} = 2,7 \text{ K}$$



Premio Nobel  
ha poucos  
anos

# Radiação Cosmica de Fundo

1940: Bethe et al.:

previsto existencia de **radiação de fundo cosmologica:**  
**reliquia do BB**

**Proximo ao BB:** radiação termica de **alta T** ( $\lambda \sim$  raios gama)

**Resfriamento do Universo por causa da expansao:**

**T** ↓ **caindo**

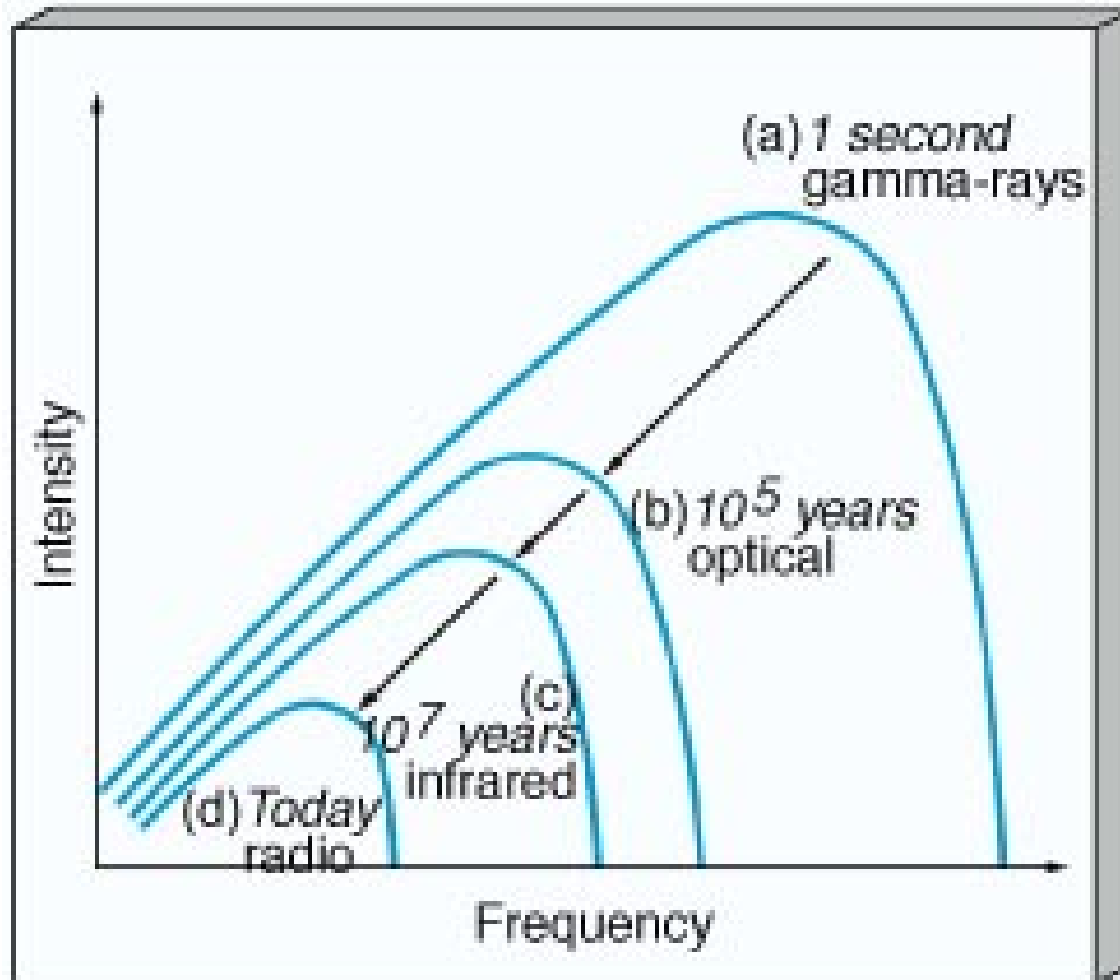
**Hoje:** essa radiação: **T<sub>prevista</sub> ~ poucos K**

**Radiação de Corpo Negro:** com pico em  $\lambda_{\max}$  em:

$$\lambda_{\max} = 2,9 \times 10^{-3}/T \quad \text{m}$$

**Micro-ondas**

# Radiação de Corpo Negro do Universo





# Radiação Cosmica de Fundo

## Altamente Isotropica:

RCF é a mesma em todas as direções (de 1 parte em  $10^5$ )

## Isotropia: forte evidencia do PC !

**RCF:** contem + energia que emitida por todas estrelas e galaxias na historia do Universo

## Por que?

Gals. e estrelas: + brilhantes porque ocupam volume total menor

**RCF preenche todo o espaço:  $E_{\text{RCF}} = 10 E_{\text{total gals+estrelas}}$**

# Materia e Radiação

$\rho_U$ : não 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

$\rho_r$  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

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

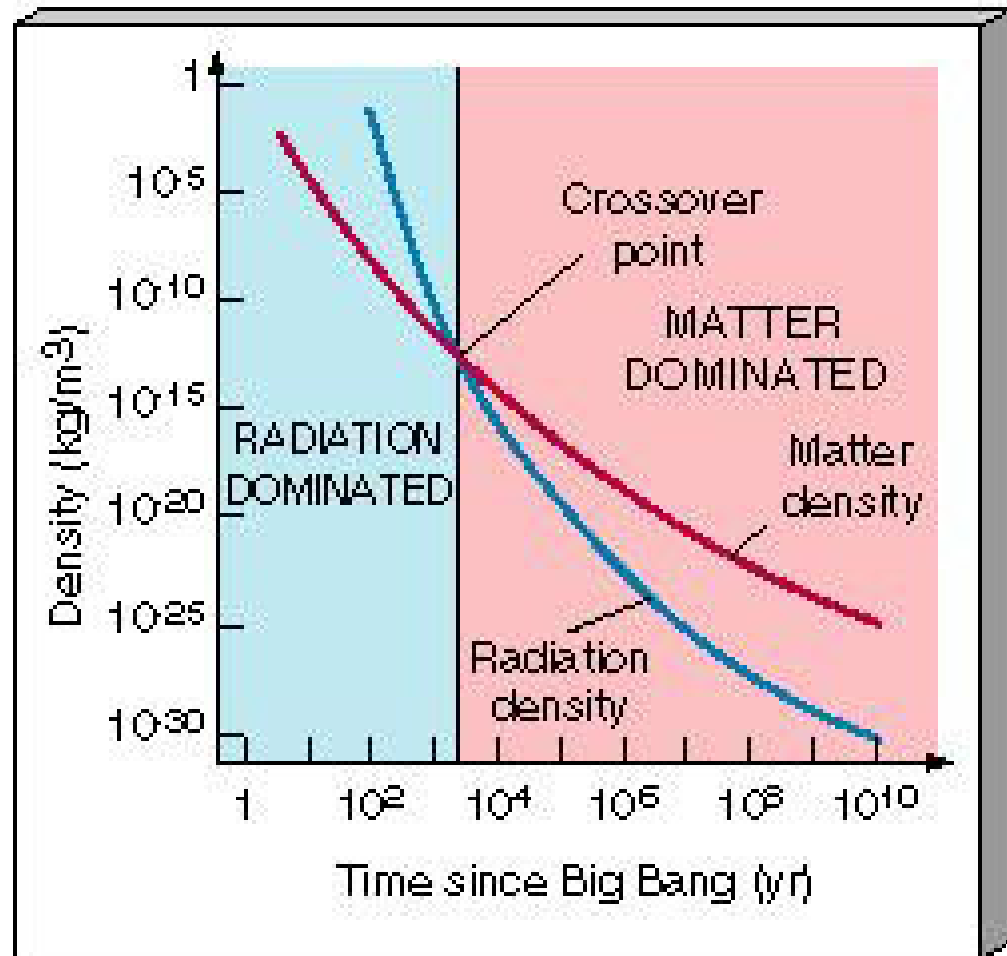
Densidade da radiação  
cai + rapido que  
densidade da materia

Houve epoca no passado:  
radiação dominava:

$$\rho_r > \rho_m$$

T~ 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 então: **EXPANDINDO e ESFRIANDO**

**1ºs minutos:**

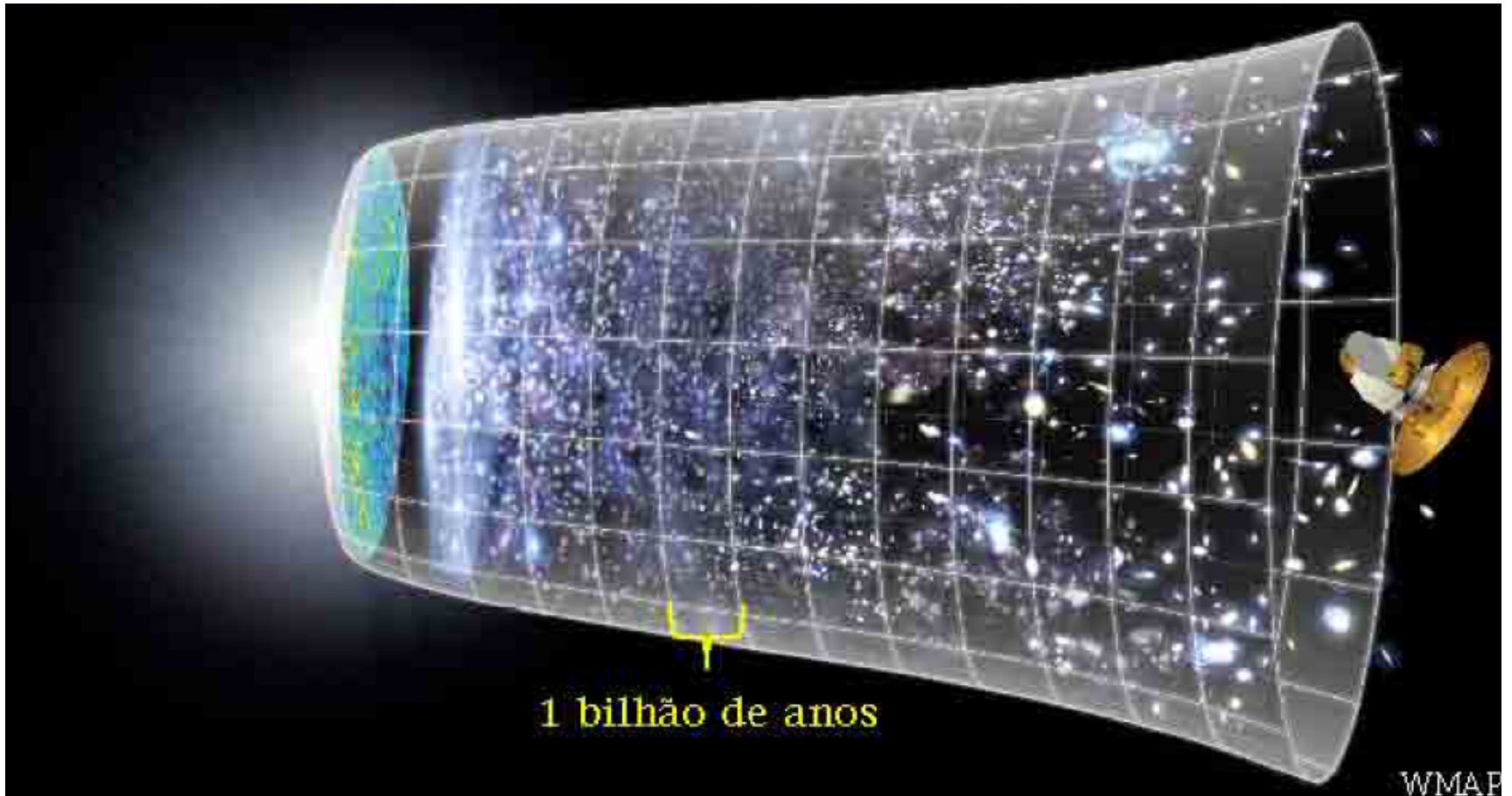
**T tao alta que:** ftons com energia suficiente para transformar-se em materia ( $E=mc^2$ ):



**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)



# Formação do Helio

**Ha mais Helio no Universo** do que o que pode ser explicado por fusão nuclear dentro das estrelas ( **$4\text{H} \rightarrow \text{He}$** )

**Todas estrelas:** possuem uma **abundancia minima de Helio: 25%** massa (em He)

Explicação: **esse He primordial:** criado antes de estrelas terem se formado por fusão nuclear:

**→ NUCLEOSSINTESE PRIMORDIAL**

# Formação do Helio

$t \sim 100$  segs. depois do BB:

T baixou para  $T \sim 10^9$  K

Universo com: parts. exóticas + e, p, n:

$$n_p/n_n = 5$$

Reação frequente nessa época:  ${}^1\text{H}_1 + n \rightarrow \text{D} = {}^2\text{H}_1$

Materia envolvida por mar de radiação: **D destruído por ftons gama com mesma rapidez que era formado:**



# Formação do Helio

t~ 2 mins. depois do BB:

T baixou para  $T < 900 \times 10^6 \text{ K}$

$D = {}^2\text{H}_1$  passa a formar-se: sem ser destruído por ftons (+ frios):  
a partir daí fusões de  ${}^2\text{H}_1 \rightarrow$  produzir  ${}^4\text{He}_2$

Em alguns minutos: maioria dos n consumidos  $\rightarrow D \rightarrow \text{He}$

Universo de: H + He essencialmente

Pequena fração de D é preservada: observada até hoje

Como D não é produzido nas estrelas:

todo D que observamos é primordial!

# Formação do Helio

**Fusão de elementos mais pesados no Universo primordial** continuou depois disso (como no centro das estrelas) ?

**NAO:**

**No interior das estrelas – T vai aumentando** possibilitando queima de elementos + pesados

**No Universo – T vai abaixando** à medida que expande

**t~ 15 mins. depois do BB:**

**Universo: 75% massa em H e 25% He**

**Somente bilhões de anos depois: com começo da formação estelar é que essas abundancias começaram a mudar !!**

# Formação dos Átomos

t~ 100.000 anos depois do BB:

**T= alguns  $10^3$  K**

**núcleos + e → átomos neutros - EPOCA DA RECOMBINAÇÃO**

**Antes disso: quando  $T >$  ou = vários  $10^4$  K:**

elétrons livres: interagem com radiação: espalhando fótons de todos  $\lambda$ s

Universo era: **OPACO à radiação:**

**materia e radiação: ACOPLADAS**

**Quando T caiu para  $T =$  alguns  $10^3$  K:**

**núcleos + e → átomos de H e He**

So alguns fótons: absorvidos

→ maioria dos fótons: viajar livremente sem serem absorvidos

**→ UNIVERSO TRANSPARENTE À RADIAÇÃO**

# Formação dos Átomos

t~ 100.000 anos depois do BB:

**T= alguns  $10^3$  K**

→ **Universo Transparente à radiação**

→ Última interação entre fótons e matéria:

**Época do DESACOPLAMENTO = Época da Recombinação**

A partir daí:

fótons viajando livremente

Universo expandindo e resfriando: **radiação também esfriou:**

**T = 2,7 K (HOJE)**

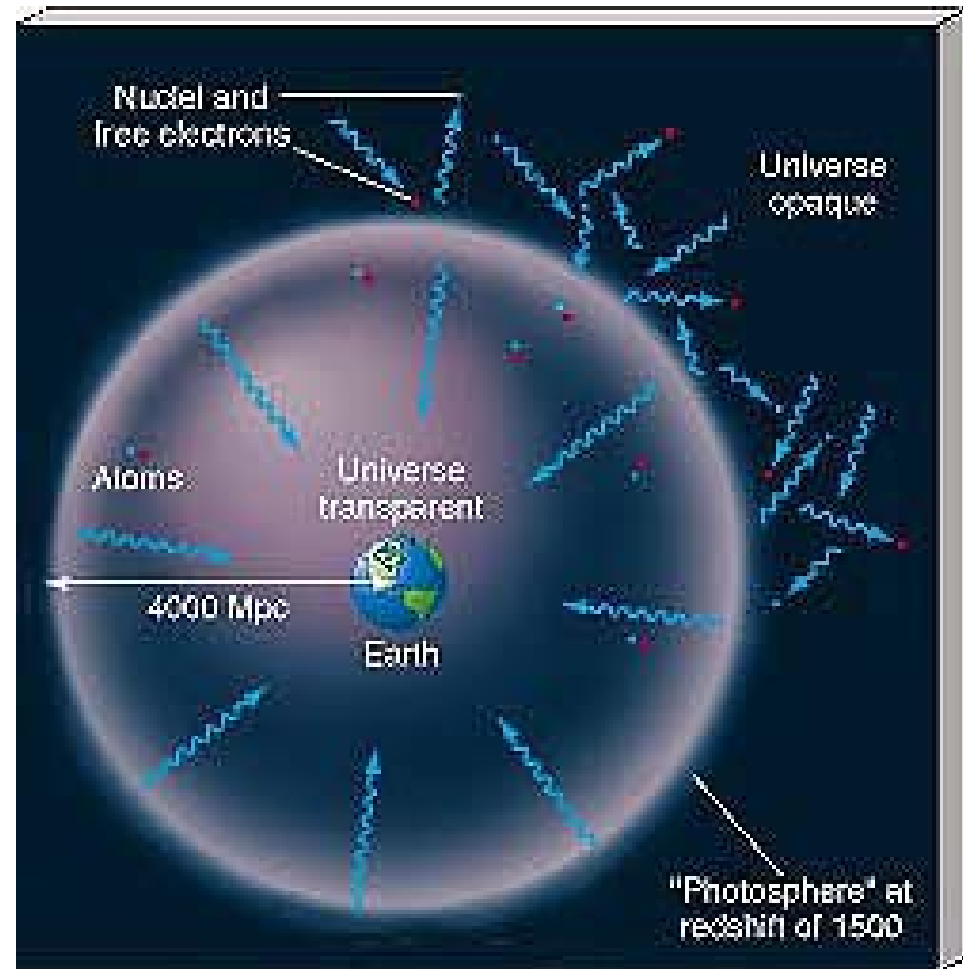


fótons da RCF que observamos: viajando pelo universo desde a época do DESACOPLAMENTO matéria-radiação

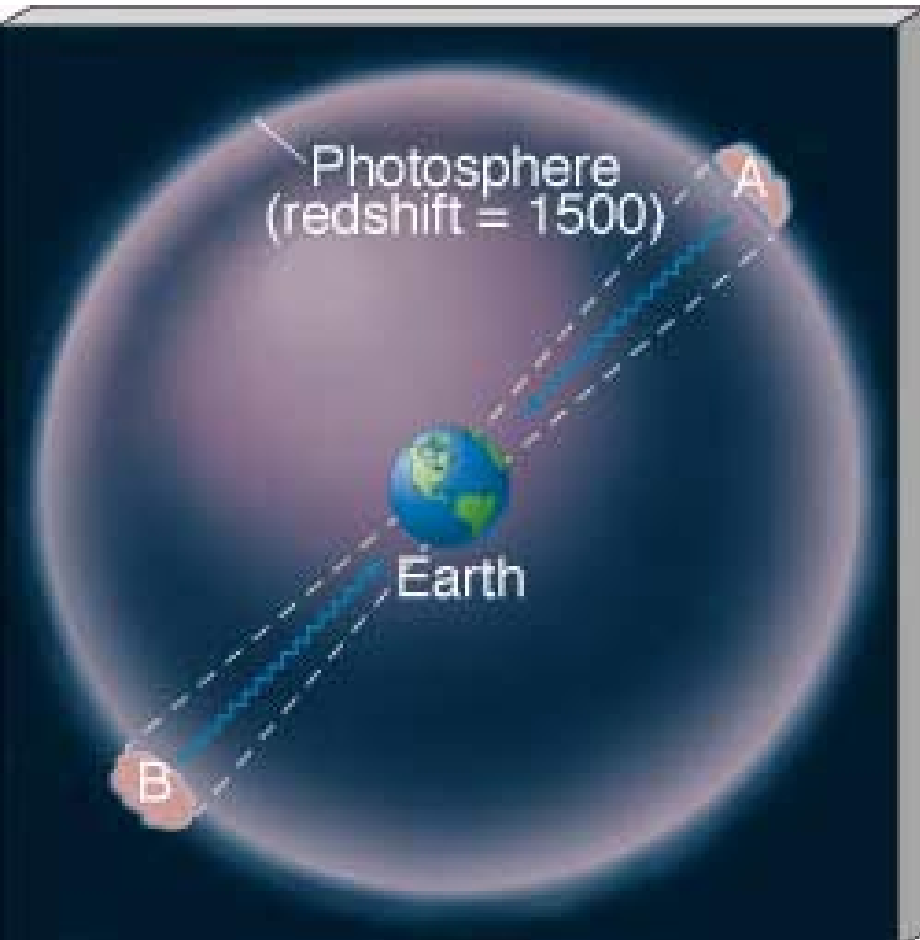
# Desacoplamento Matéria-Radiação

Quando átomos formaram-se (desacoplamento matéria-irradiação): **Universo tornou-se transparente à irradiação** → **RCF**

Observações da RCF: permitem estudar condições do Universo daquela época quando:  **$z = 1500$  ( $t = 100.000$  anos) e  $T = 4500$  K**



# 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

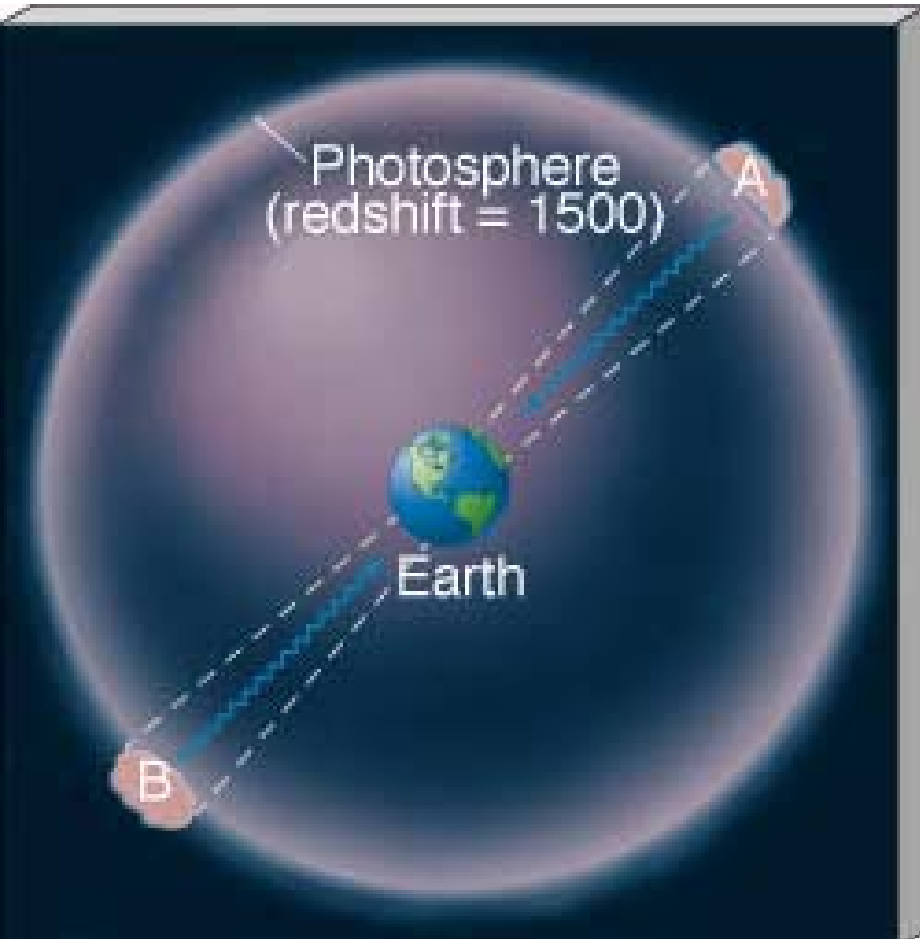
Porem: **dentro da teoria do BB: nao ha razao porque essas 2 regioes devessem ser tao similares**



**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):**

**nao 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**

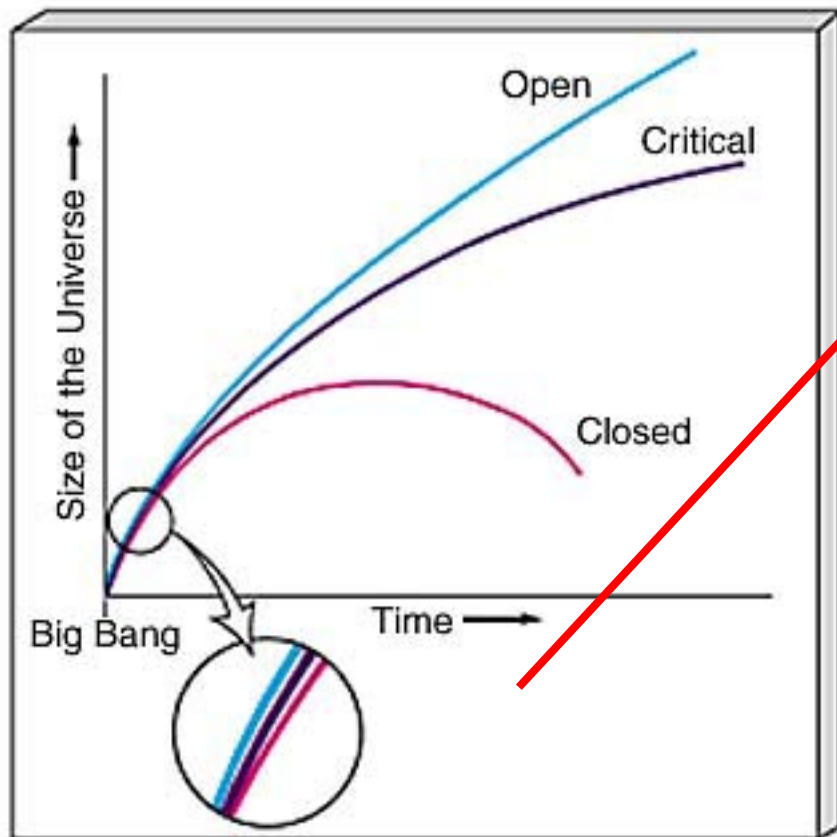
**→ A esta fora do horizonte de eventos de B (e vice-versa)**

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

# Problema da Planura

$\Omega_0 = \rho_U / \rho_0 \sim 1$ : Universo ~ plano

Mas não há nenhuma boa razão porque Universo deva ter  $\Omega_0$  tão próximo de 1:



Essa figura: mostra que **no princípio se** Universo começou com  $\rho_U$  próximo, mas não exatamente =  $\rho_0 \rightarrow$  rapidamente poderia desviar-se de  $\Omega=1$

$\rightarrow$  Se  $\Omega_0 \sim 1$  hoje: **deve ter sido extremamente próximo de 1 no passado**

**Problema da Planura**

# 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)

# Inflação

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

Consequências **dramáticas** 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

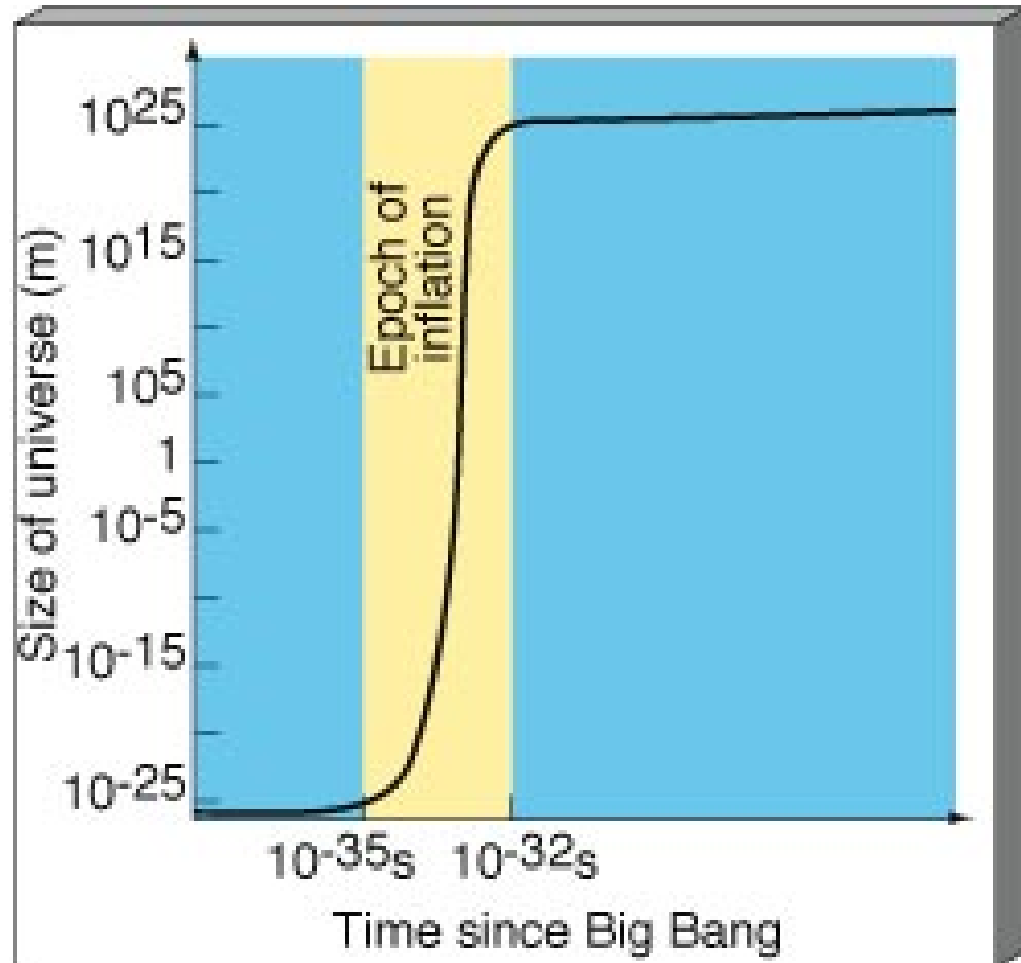
↓  
Epoca da **INFLACAO**

# 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**

# Implicações da Inflação

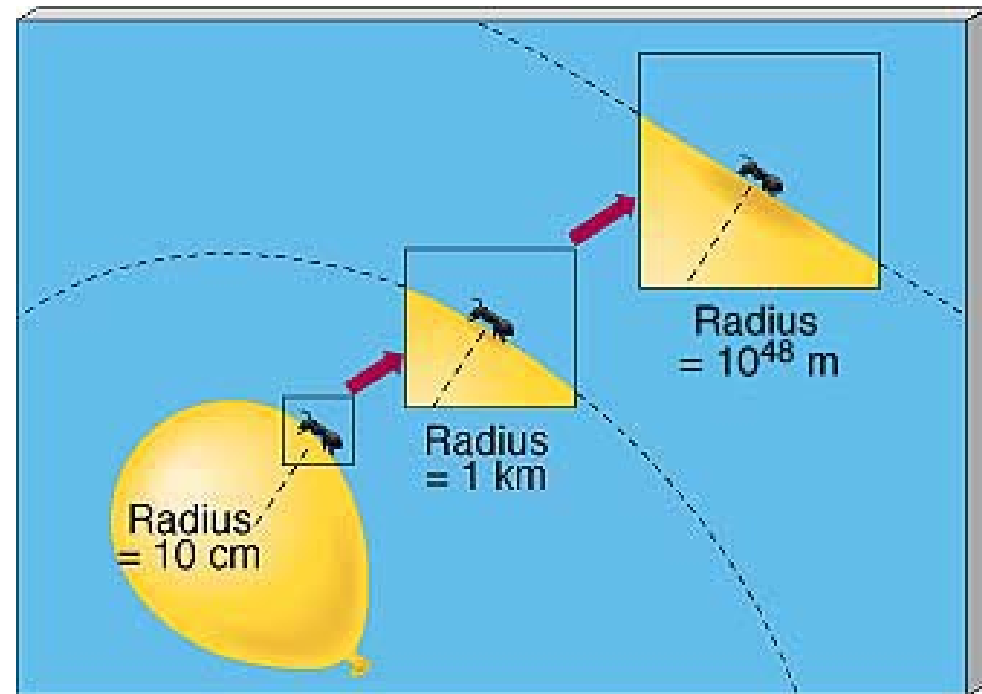
Inflação: também resolve problema da Planura

**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:  $\Omega_0=1$

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

Ideia da **Inflação controversa**: mas evidências observacionais:  $\Omega_0 = 1$

$$\Omega_0 = \Omega_{ML} + \Omega_{ME} + \Omega_{EE}$$

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

**BICEPS 2**: alegou ter medido ondas gravitacionais da Inflação (2014) - **PLANCK** mostrou que essas Ondas correspondiam ao campo magnético da VL ?

# Historia do Universo

## HOW DID OUR UNIVERSE BEGIN?

Some 13.8 billion years ago our entire visible universe was contained in an unimaginably hot, dense point, a billionth the size of a nuclear particle. Since then it has expanded a lot—fighting gravity all the way.

### Inflation

In a flash, then a nanosecond a repulsive energy field inflates space to visible size and fills it with a soup of subatomic particles called quarks.

Age:  $10^{-32}$  milliseconds  
Size: Infinitesimal to golf ball

### Early building blocks

The universe instantly cools. Quarks clump into protons and neutrons, the building blocks of atomic nuclei. Perhaps dark matter forms.

Age: 0.1 milliseconds  
0.1-trillionth present size

### First nuclei

As the universe continues to cool, the lightest nuclei of hydrogen and helium are set. A thick fog of particles blocks all light.

Age: 0.1 to 200 seconds  
1-billionth present size

### First atoms, first light

As electrons begin orbiting nuclei, creating atoms, the glow from our infant universe is unveiled. This light is as far back as our instruments can see.

Age: 380,000 years  
0.0009 present size

### The "dark ages"

For 200 million years the cosmic background radiation is the only light. Clumps of matter that will become galaxies glow brightly.

Age: 380,000 to 300 million years  
0.0009 to 0.1 present size

### Gravity wins: first stars

Dense gas clouds collapse under their own gravity—and that of dark matter—to eventually form galaxies and stars. Nuclear fusion lights up the stars.

Age: 300 million years  
0.1 present size

### Antigravity wins

After being slowed for billions of years by gravity, cosmic expansion accelerates again. The culprit: dark energy. Its nature uncertain.

Age: 10 billion years  
.77 present size

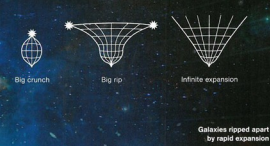
### Today

The universe continues to expand, becoming ever less dense. As a result, fewer new stars and galaxies are forming.

Age: 13.8 billion years  
Present size

## HOW WILL IT END?

Which will win in the end, gravity or antigravity? Is the density of matter enough for gravity to halt or even reverse cosmic expansion, leading to a big crunch? It seems unlikely—especially given the power of dark energy, a kind of antigravity. Perhaps the acceleration in expansion caused by dark energy will trigger a big rip that stretches everything, from galaxies to atoms. If not, the universe may expand for hundreds of billions of years, long after all stars have died.



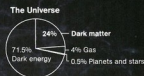
Galaxies ripped apart by rapid expansion

## COSMIC QUESTIONS

In the 20th century the universe became a story—a scientific one. It had always been seen as static and eternal. Then astronomers observed other galaxies flying away from ours, and Einstein's general relativity theory implied space itself was expanding—which meant the universe had once been denser. What had seemed eternal now had a beginning and an end. But what beginning? What end? Those questions are still open.

### WHAT IS OUR UNIVERSE MADE OF?

Stars, dust, and gas—the stuff we can discern—make up less than 5 percent of the universe. Their gravity can't account for how galaxies hold together. Scientists figure about 24 percent of the universe is a mysterious dark matter—perhaps exotic particles formed right after inflation. The rest is dark energy: an unknown energy field or property of space that counteracts gravity, providing an explanation for observations that the expansion of space is accelerating.



### WHAT IS THE SHAPE OF OUR UNIVERSE?

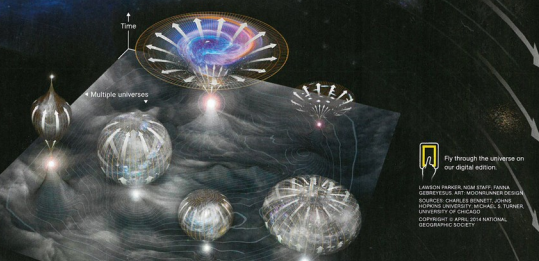
Einstein discovered that a star's gravity curves space around it. But is the whole universe curved? Might space close up on itself like a sphere or curve the other way, opening out like a saddle? By studying cosmic background radiation, scientists have found that the universe is poised between the two, just dense enough with just enough gravity to be almost perfectly flat, at least the part we can see. What lies beyond we can't know.



The Unknown Beyond  
What we can't see. The possible shapes are:

### DO WE LIVE IN A MULTIVERSE?

What came before the big bang? Maybe other big bangs. The uncertainty principle holds that even the vacuum of space has quantum energy fluctuations. Inflation theory says our universe exploded from such a fluctuation—a random event that, odds are, had happened many times before. Our cosmos may be one in a sea of others just like ours—or nothing like ours. These other cosmos will very likely remain forever inaccessible to observation, their possibilities limited only by our imagination.



by through the universe on our digital edition.

LAWSON PETERSON, NICK STAMP, JESSICA KREIBERGER, AND HOWARD WARDENBARGER. SOURCE: GRAVITY: SPINNEY; DARK ENERGY: JAMES H. COOK; PLANETS AND STARS: UNIVERSITY OF CHICAGO; COSMOS: JAMES H. COOK; INFLATION: UNIVERSITY OF CHICAGO.



COPYRIGHT © APRIL 2014 NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY

**Obrigado!**  
**FIM!**