

Cosmologia 1

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=110630

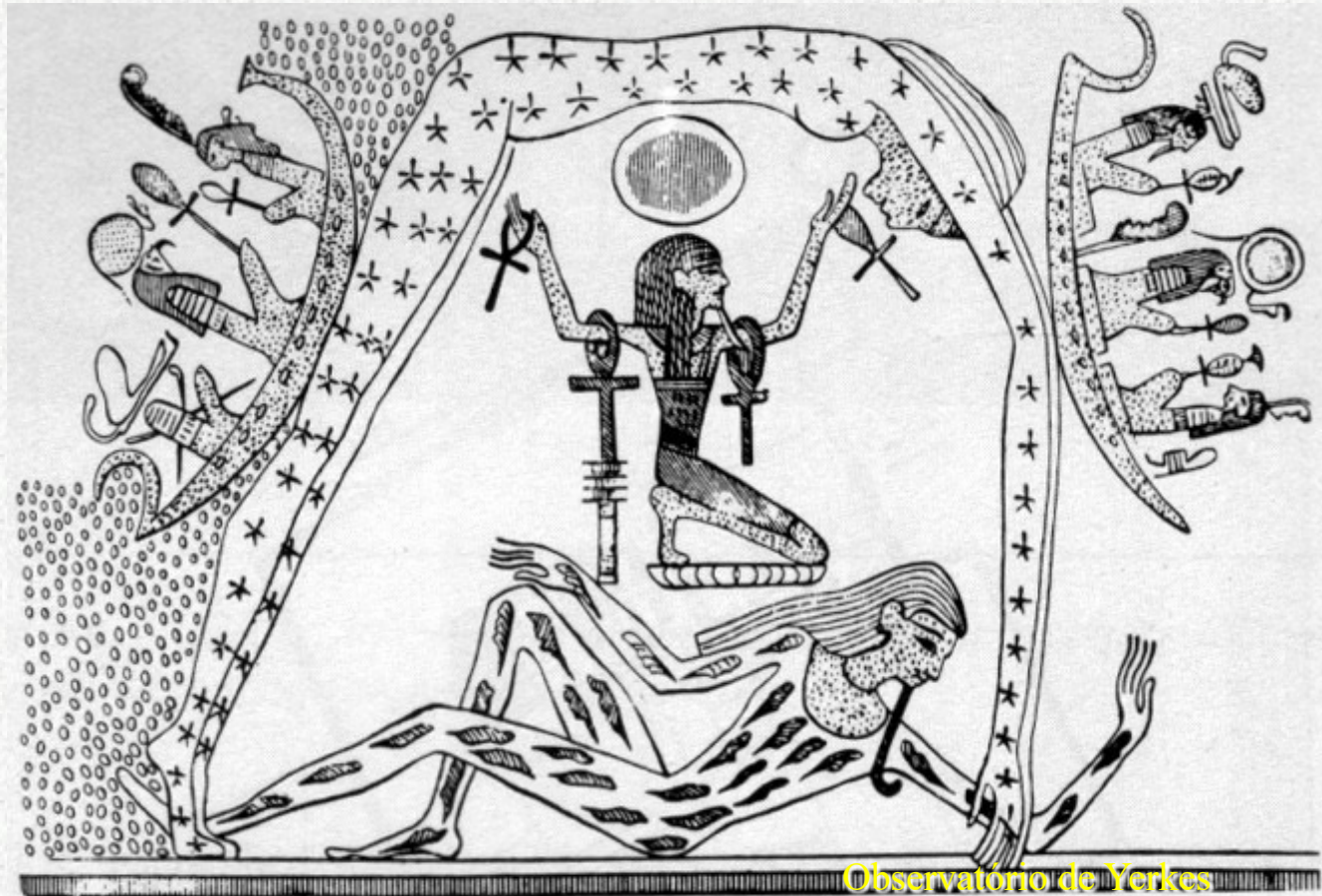
Cosmologia

História e estrutura do universo

- Como se distribui a matéria?
- Do que é composto o Universo?
- Onde estamos?
- Como isto se relaciona com a origem e o futuro do Universo?

Cosmologia é o estudo da história, estrutura e composição do Universo como um todo.

Uma questão antiga



- Egito Antigo: O Universo segundo a mitologia egípcia do 2º milênio a.C.
- Deus Ra (o Sol) navega todos os dias pelo céu de leste a oeste.
- A motivação cosmologica é a geografia do Egito, linear ao longo do Nilo.

Uma questão antiga

Outra possibilidade...

A maioria dos povos da antiguidade desenvolviam uma visão de mundo baseada em superstições e criaturas míticas.



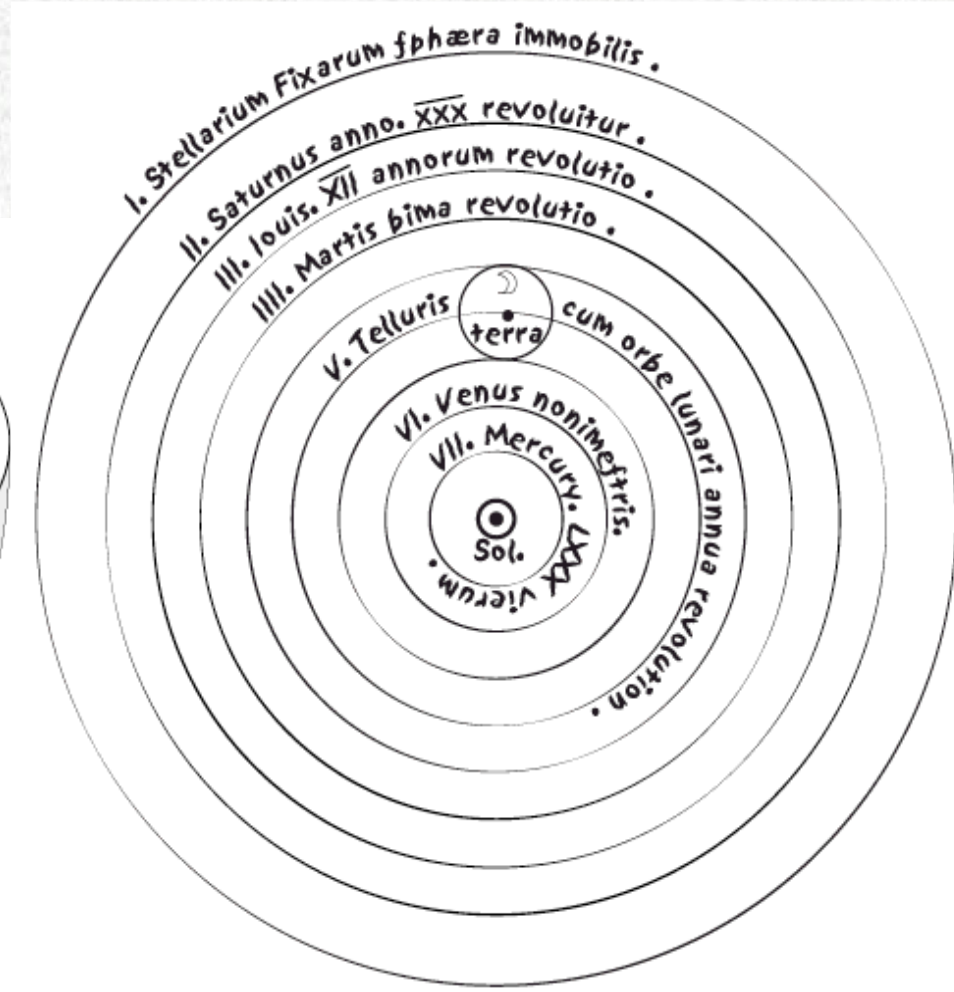
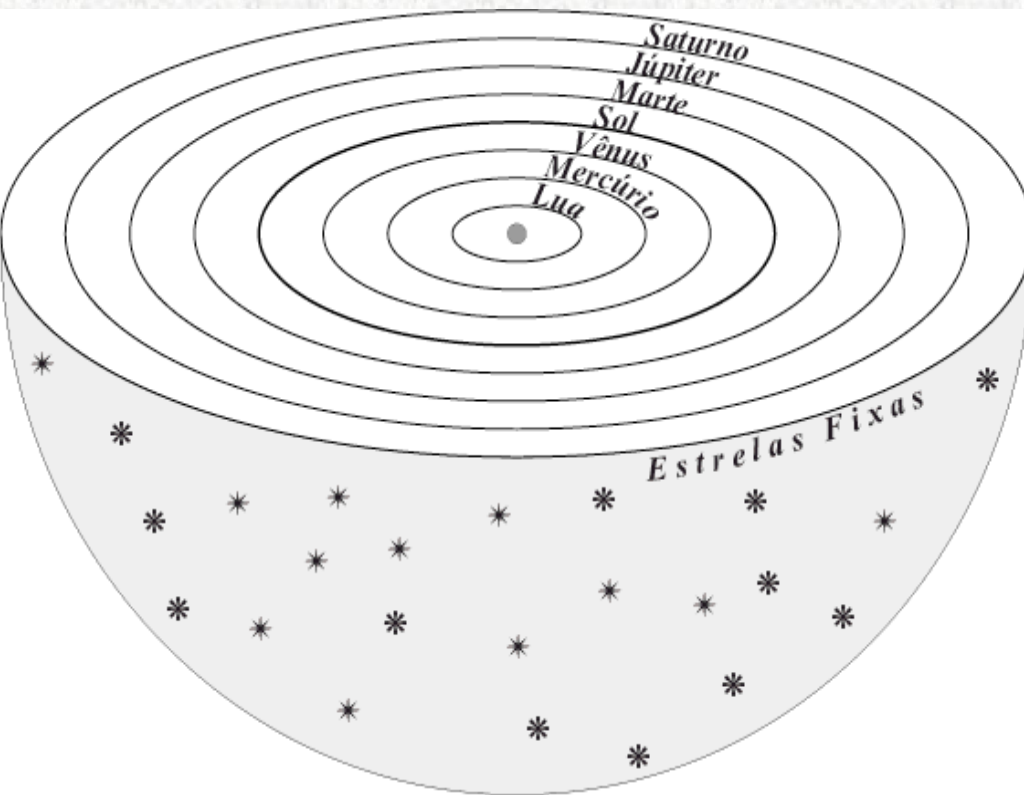
Baseado na
mitologia
Hindu

Josh Kirby, "Diskworld"



Uma questão antiga

Os gregos tentavam descrever o Universo com teorias **geométricas/matemáticas** baseadas em observações. Início do método científico. O termo “**cosmologia**” surge aqui.



Aristóteles (320 a.C.); Ptolomeu (160 d.C.)

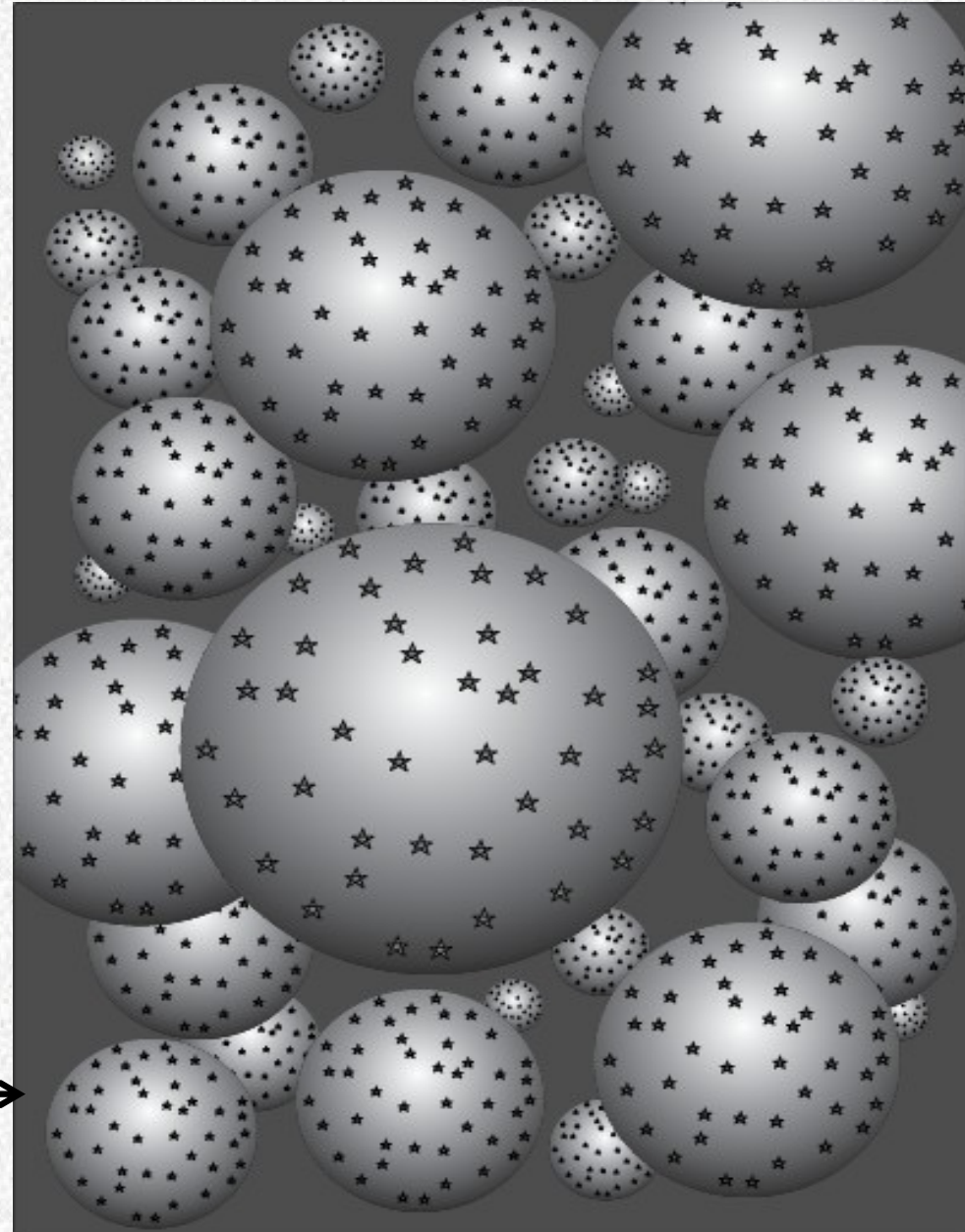
Aristarco (220 a.C.); Copérnico (1543)

Uma questão antiga

Expansão de nossa visão
cosmológica

Galileu revela a Via Láctea
como um **enorme conjunto de
estrelas** e mostra que o universo
geocêntrico não é compatível
com as fases de Vênus
observadas por ele.

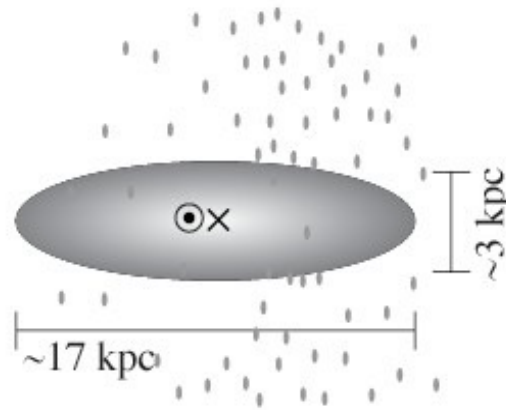
No século 18, Thomas Wright,
Emmanuel Kant e Johann
Heinrich Lambert sugerem
que as estrelas formam
“**Universos-ilhas**”. →



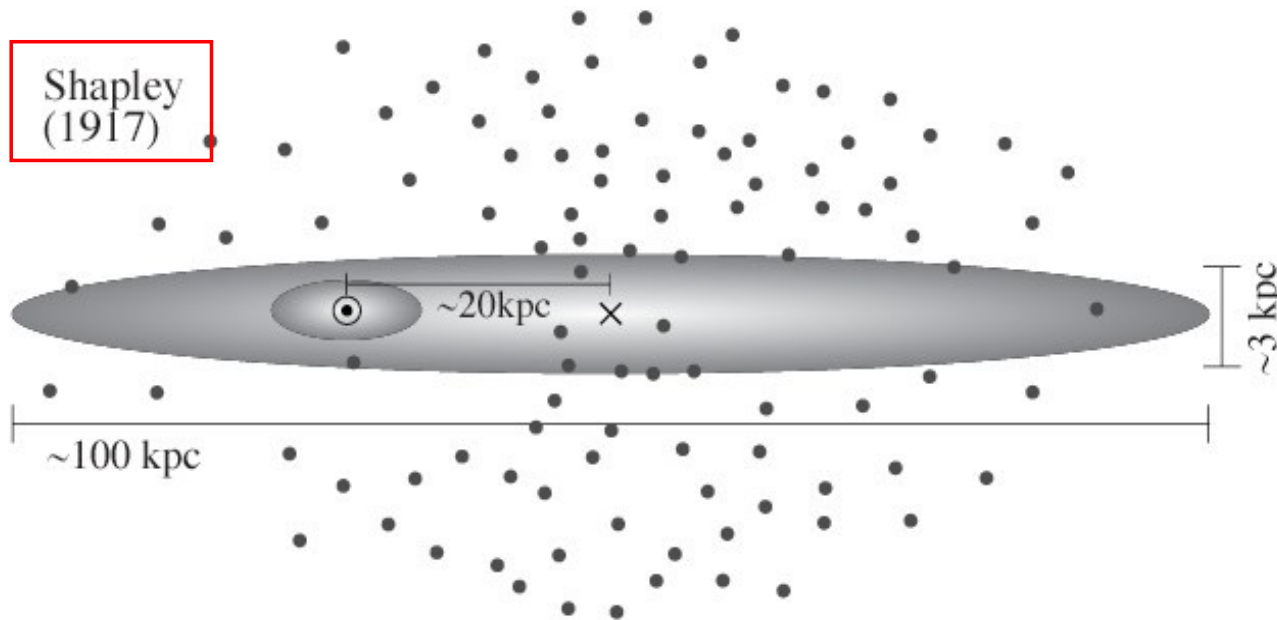
Uma questão antiga??

Início do
Século 20

Kapteyn
(1901)



Shapley
(1917)



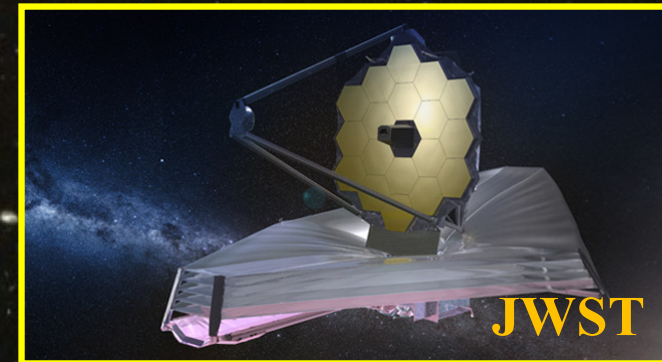
“Grande debate” de 1920 entre
duas visões de Universo:

“Universos-ilhas” ou uma
única galáxia?

Questão resolvida por E.
Hubble e colaboradores em
1926 com a determinação das
distâncias das “nebulosas”
extragalácticas.

Uma questão atual!

Início do
Século 21



Campo Ultra Profundo feito com o Telescópio Espacial Hubble

(800 exposições de 21 minutos no final de 2003 → 11,5 dias observando o mesmo lugar no céu.

Para observar todo o céu desta forma seria preciso 1 milhão de anos neste ritmo e teríamos uma imagem de 50 Terapixel).

Cosmologia

Até o início do século 20, a Cosmologia era parte da Filosofia. Havia a **cosmogonia**, que tratava da origem do Sistema Solar.

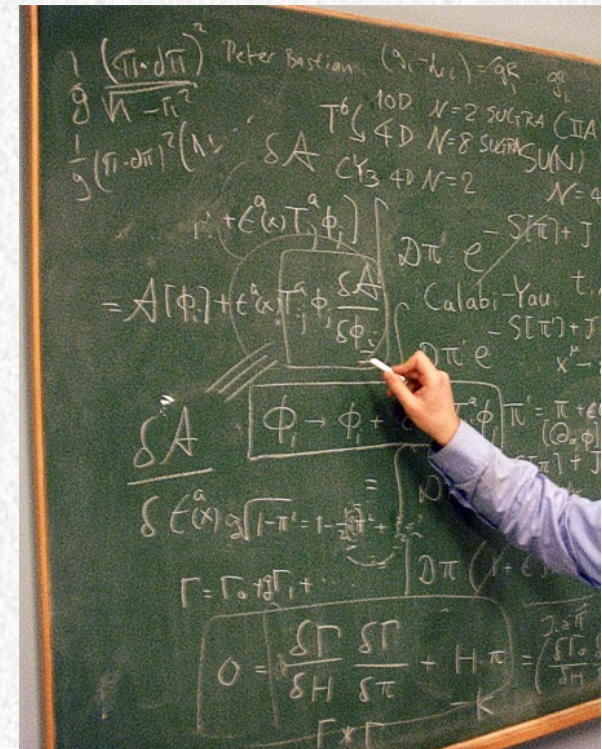
A cosmologia moderna tem duas bases:

Observacional

Teórica



South Pole Telescope.
obscos.astro.illinois.edu/images/spt_twilight.jpg

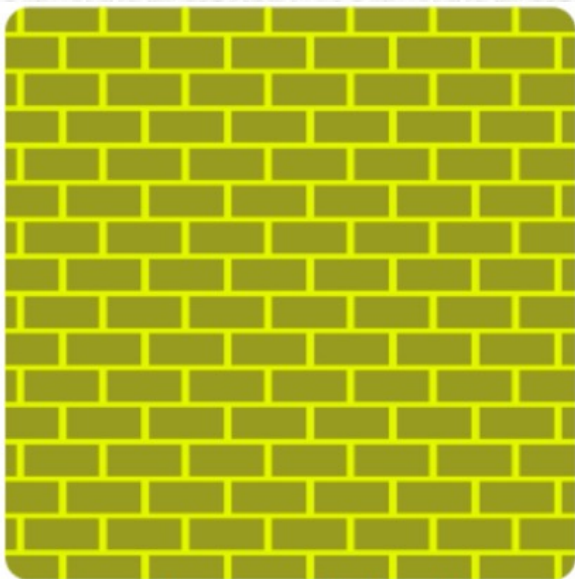


Cosmologia

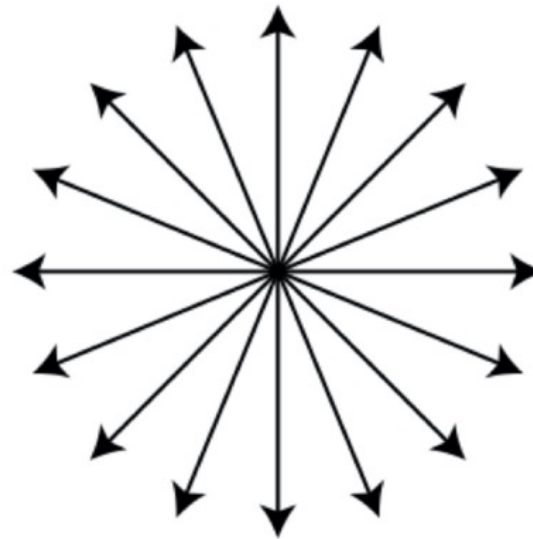
- Base teórica

- Princípio Cosmológico

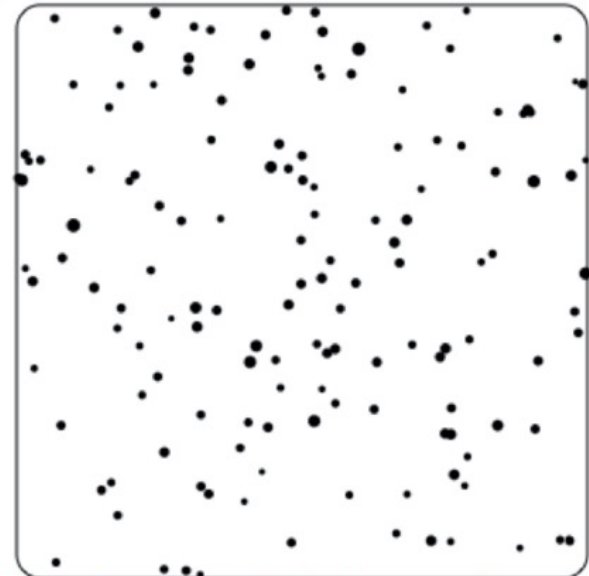
"Universo é homogêneo e isotrópico" (em grande escala)



Homogêneo, mas não isotrópico



Isotrópico (no centro), mas não homogêneo



Homogêneo e isotrópico (em grande escala)

homogêneo → todas as regiões do espaço são idênticas.

isotrópico → mesma aparência em qualquer direção ou
mesma aparência para qualquer observador.

Forças da Natureza

Existem 4 forças diferentes na natureza

- ➔ Interação forte → estabilidade do núcleo atômico.
 - Curto alcance ($< 10^{-4}$ Å).
- ➔ Interação fraca → processos de decaimento radioativo.
 - Curto alcance ($< 10^{-6}$ Å).
- ➔ Interação eletromagnética → descreve os fenômenos elétricos e magnéticos, inclusive a onda eletromagnética.
 - Longo alcance, mas precisa de carga e na natureza a matéria é (em grande escala) neutra.
- ➔ **Interação gravitacional**
 - Longo alcance e só temos massa positiva.
 - Logo, esta é a interação **mais importante para cosmologia**, apesar de ser a mais fraca.

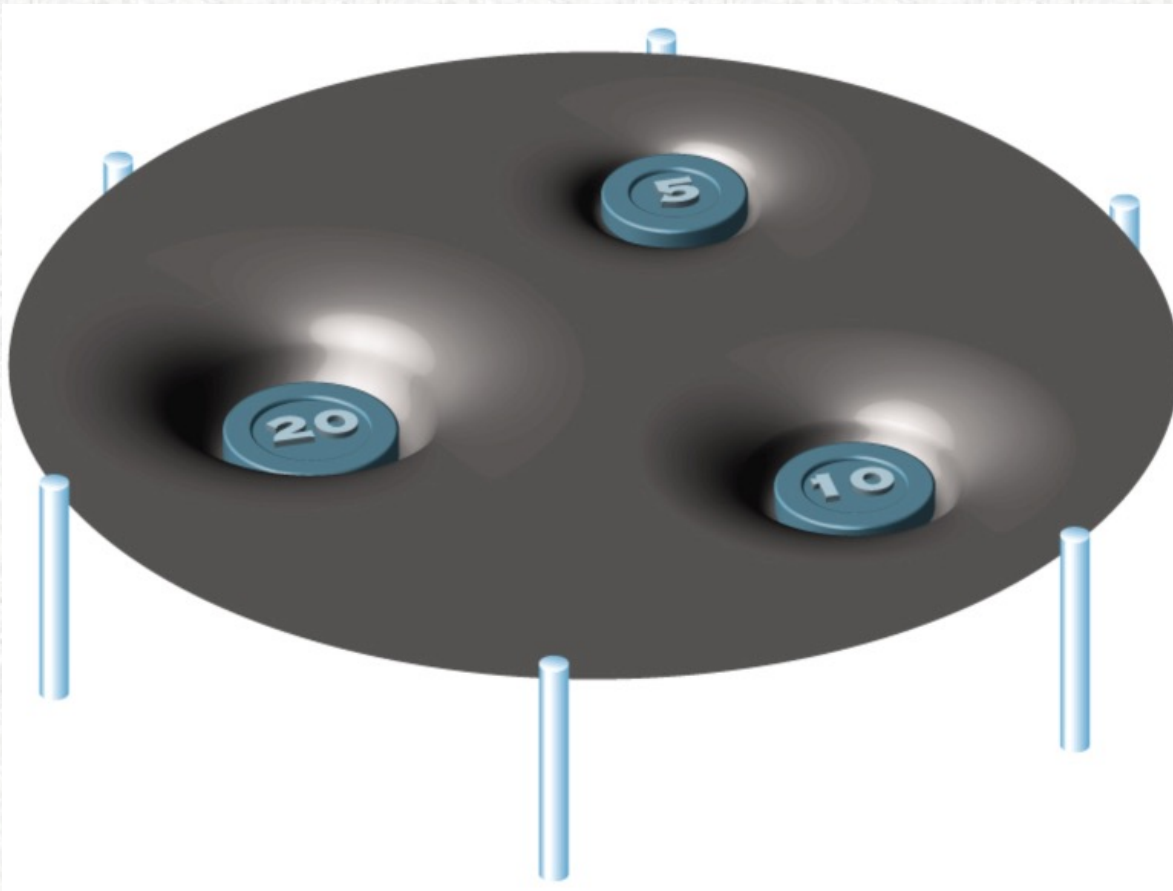
Cosmologia

A Relatividade Geral deu uma base física para o estudo da Cosmologia, assim como novas observações no início do século 20.

Um modelo cosmológico tem necessariamente que ser compatível com a Equação de Einstein da Relatividade.

Cosmologia

- Base teórica
 - Relatividade geral (Einstein, 1915) → Gravitação



Corpos de massa maior deformam mais o espaço-tempo.

A teoria da gravitação de Newton é uma boa aproximação para campos gravitacionais fracos e baixas velocidades.

Cosmologia

- Base teórica

- Princípio Cosmológico

“Universo é homogêneo e isotrópico”

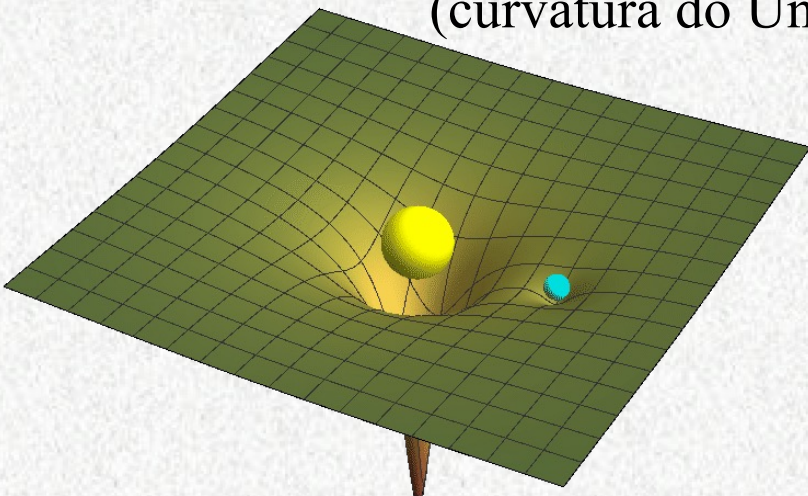
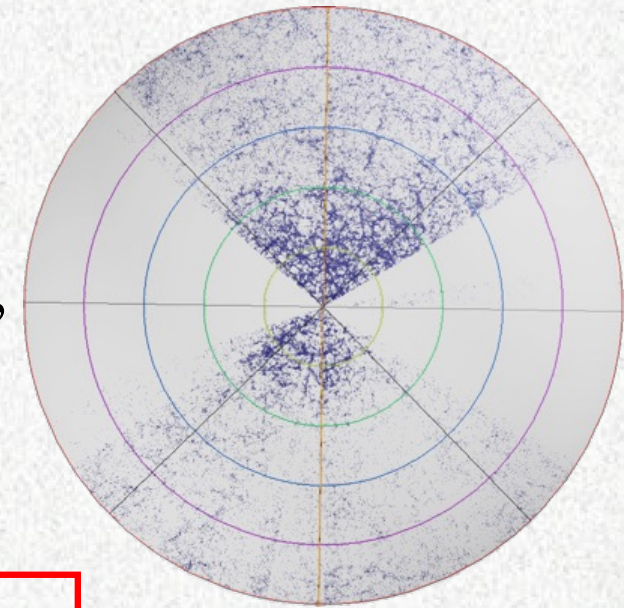
(em escalas superiores a 300 milhões de anos-luz).

- Relatividade geral (Einstein, 1915)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

geometria do espaço-tempo
(curvatura do Universo)

× matéria/energia
(de todo o Universo)

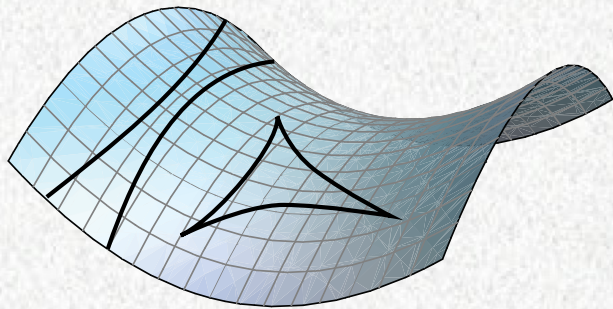


Matéria e energia deformam o espaço-tempo.

A deformação do espaço-tempo determina a trajetória dos corpos (as geodésicas).

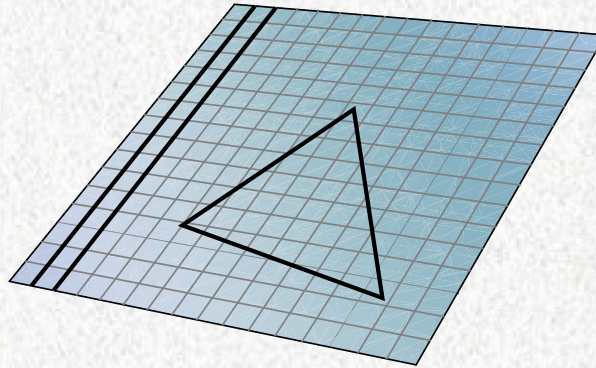
Massa-energia determina a curvatura do Universo

aberto



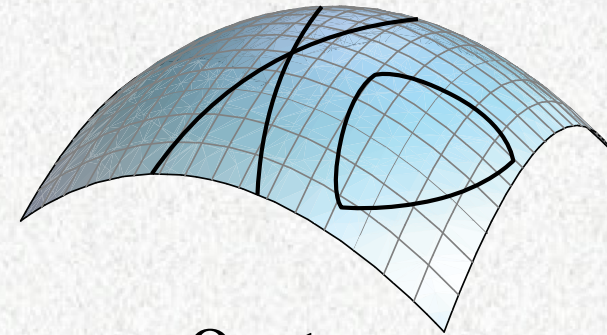
$$\Omega < 1$$

plano



$$\Omega = 1$$

fechado



$$\Omega > 1$$

$\Omega \rightarrow$ parâmetro de densidade = ρ/ρ_c

Densidade crítica (ρ_c): densidade necessária para parar a expansão do universo, em um Universo só de matéria, ou densidade de um Universo plano.

$$\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_R + \dots$$

(soma de todas as componentes do universo:
radiação, átomos, matéria escura, energia escura, etc...)

Cosmologia

- Base observacional:
 - O universo está em expansão
(Slipher, Leavitt, Lemaître, Hubble entre 1912 e 1929)
 - Radiação cósmica de fundo com 2,7K
(previsto nos anos 1950, observado desde 1964)
 - Cerca de 10% dos átomos são de Hélio
(previsto no final dos anos 1940, observado desde 1960)

3 pilares clássicos da cosmologia moderna

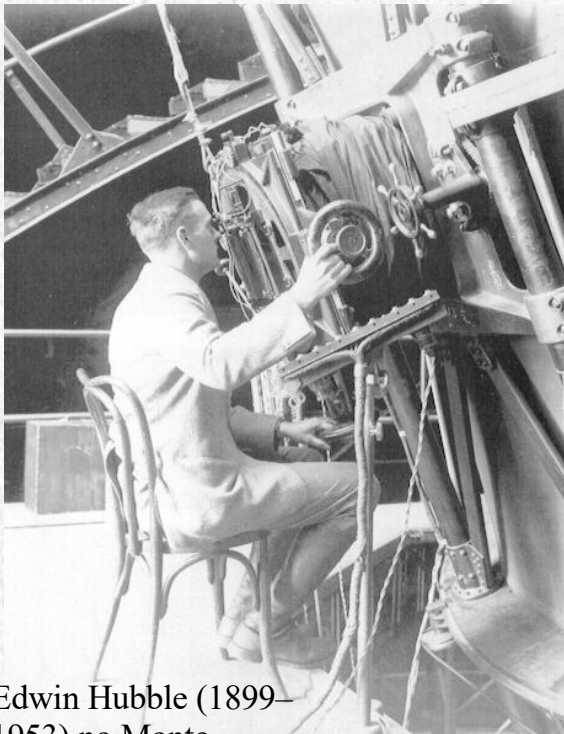
Expansão do Universo

Determinada por Lemaître em 1927 e Hubble em 1929.

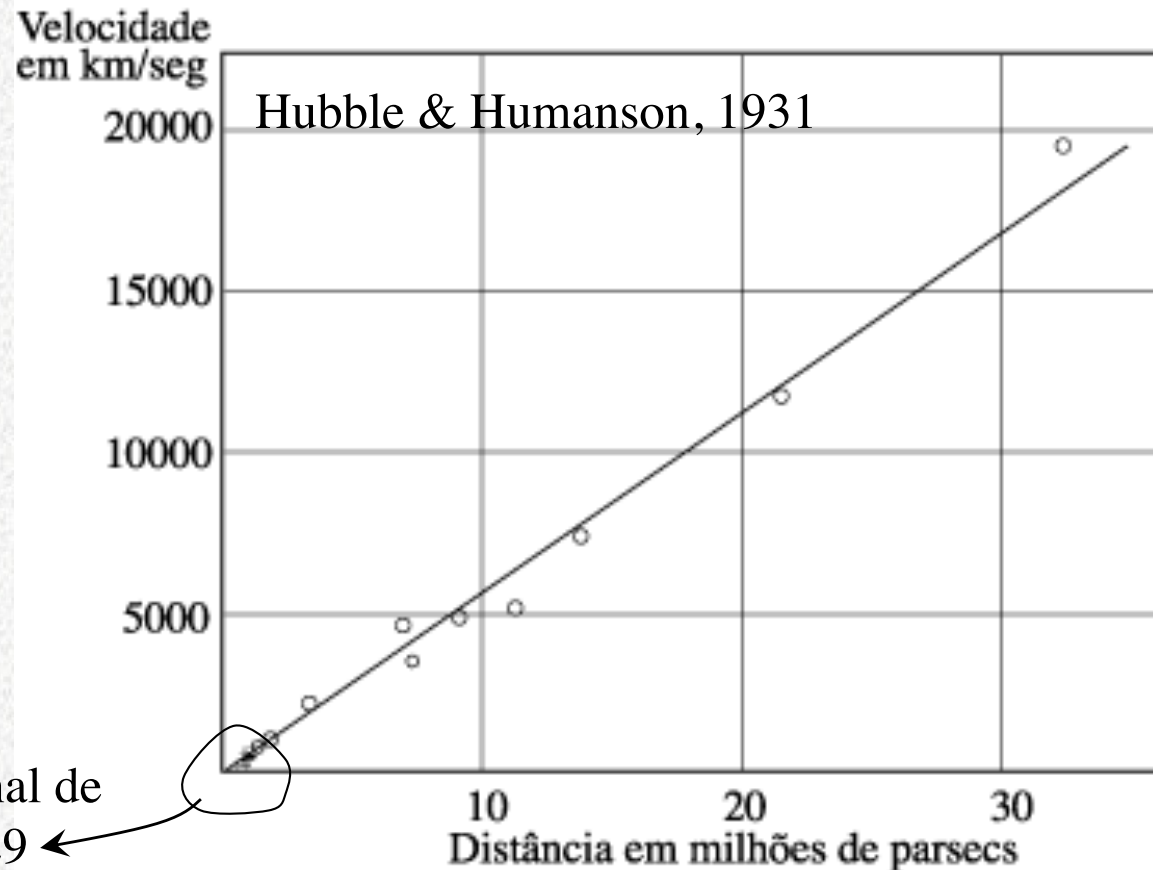


Lei de Hubble-Lemaître: $v = H_0 D$

$H_0 \rightarrow$ Constante de Hubble-Lemaître



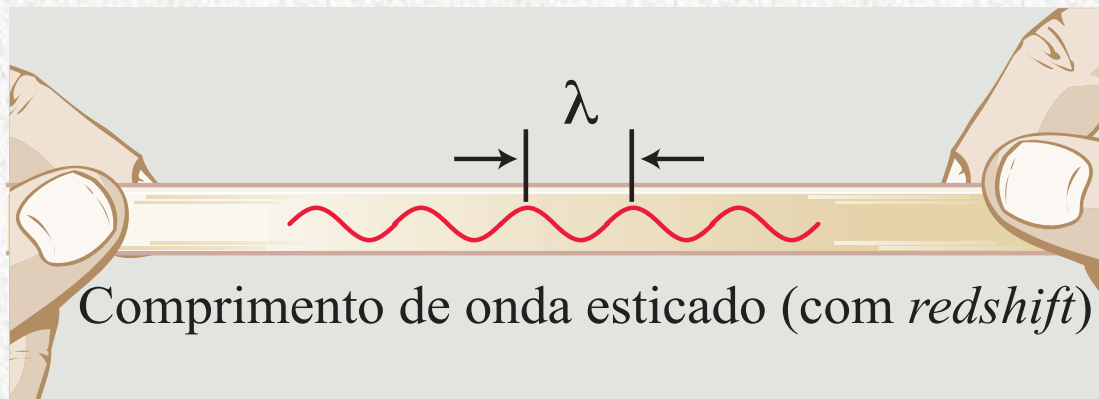
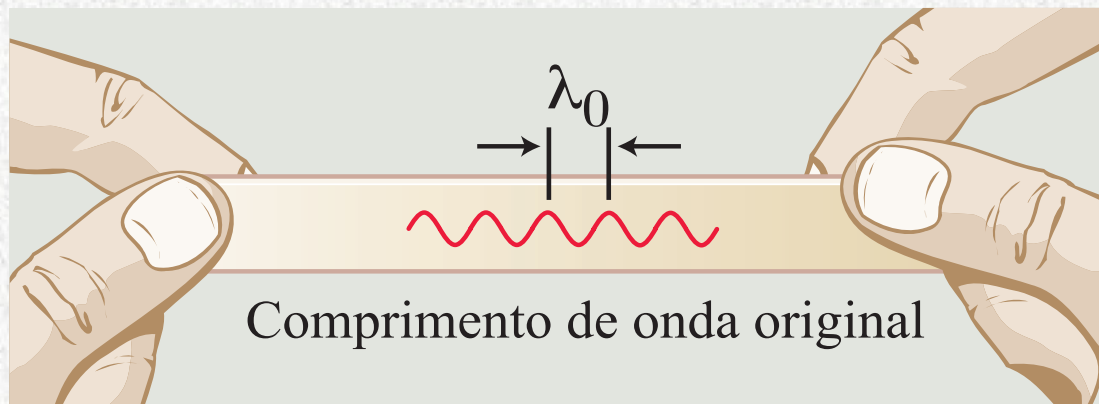
Edwin Hubble (1899–1953) no Monte Wilson.



Trabalho original de Hubble em 1929

Expansão do Universo

- A expansão do Universo afeta a radiação eletromagnética.
- Conforme o Universo expande o **comprimento de onda aumenta**.
- Analogia com um elástico.
→ **Redshift Cosmológico**.



Velocidade de recessão e distância das galáxias

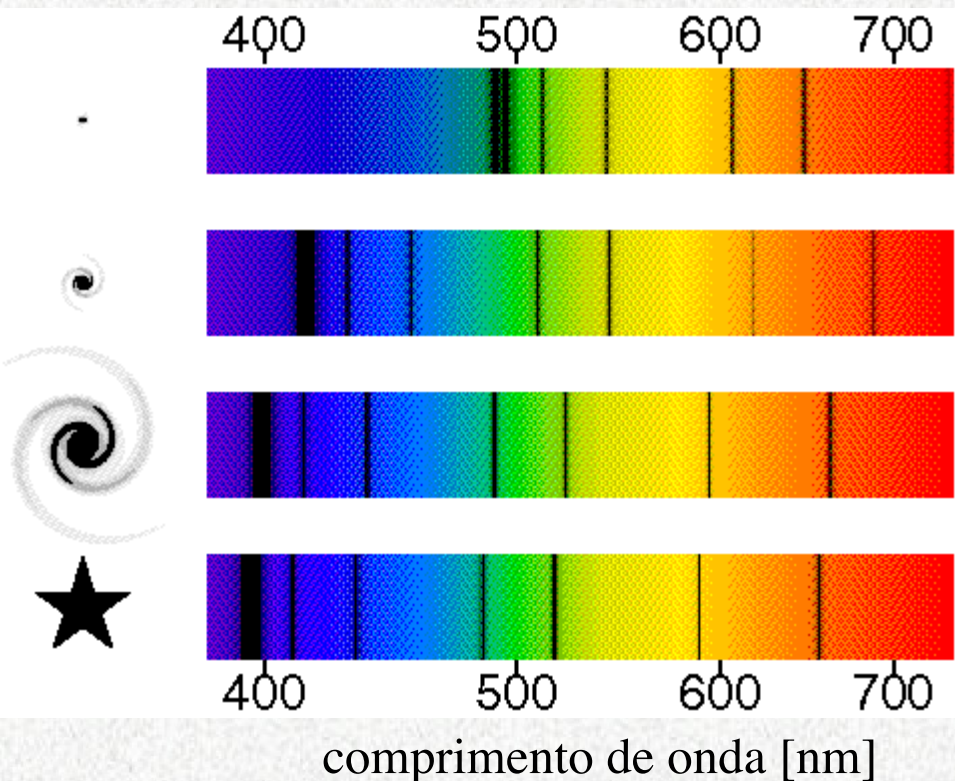
$$c z = v$$

$$z \equiv \Delta\lambda / \lambda_{\text{rep}}$$

$$v = H_0 D$$

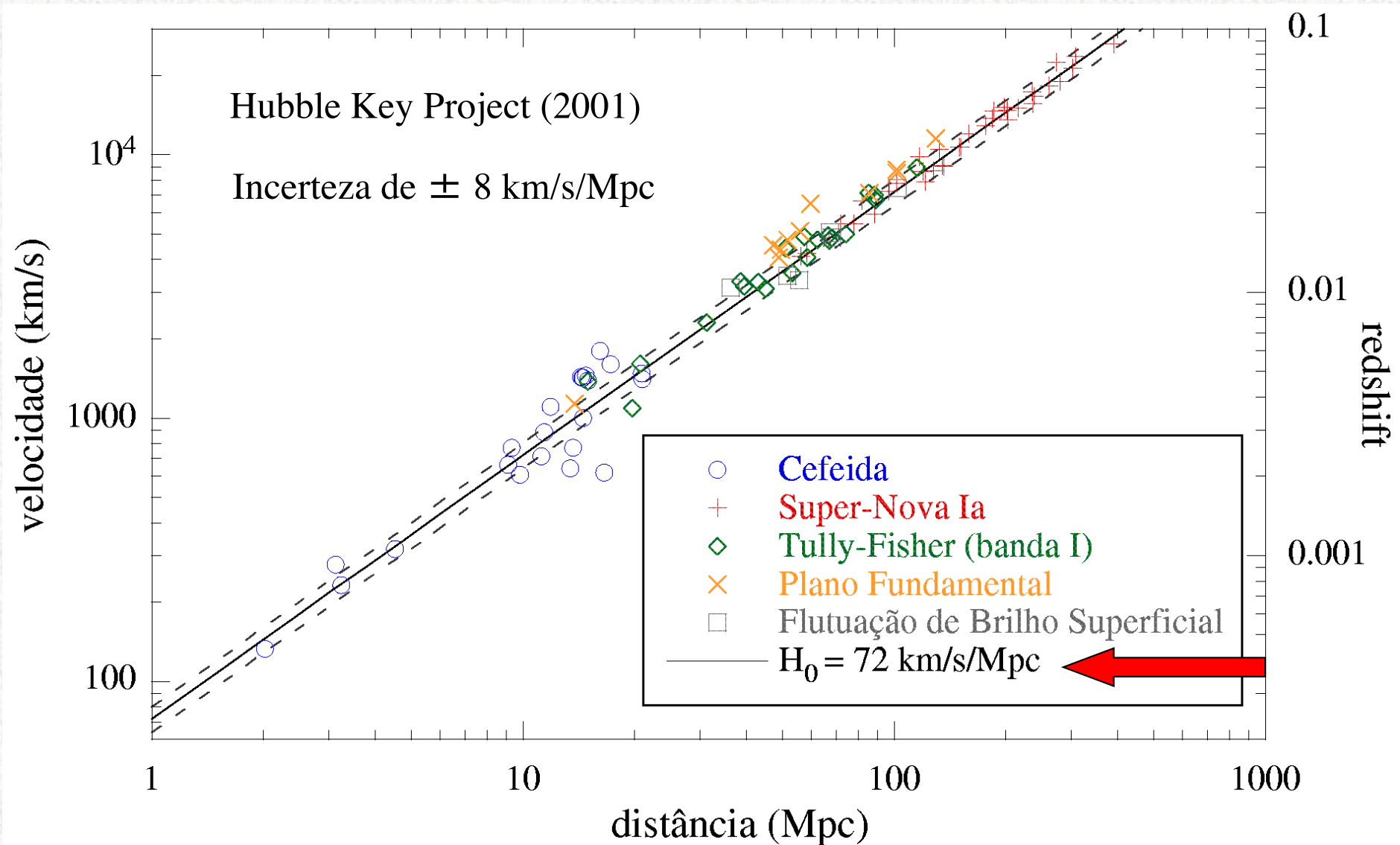
Expansão do universo, semelhante ao efeito Doppler \Rightarrow desvio para o vermelho (“*redshift*”):

Determinação de distâncias:



- ✓ Relação Período-Luminosidade de Cefeidas;
- ✓ Aglomerados de galáxias;
- ✓ Supernovas;
- ✓ Relações de escala em galáxias
 - ✓ Tully-Fisher
 - ✓ Plano Fundamental
- ✓ Flutuação de brilho superficial

Lei de Hubble: medida observacional



Expansão do Universo

$$H \equiv \frac{\text{velocidade da expansão do universo}}{\text{“tamanho do universo”}}$$

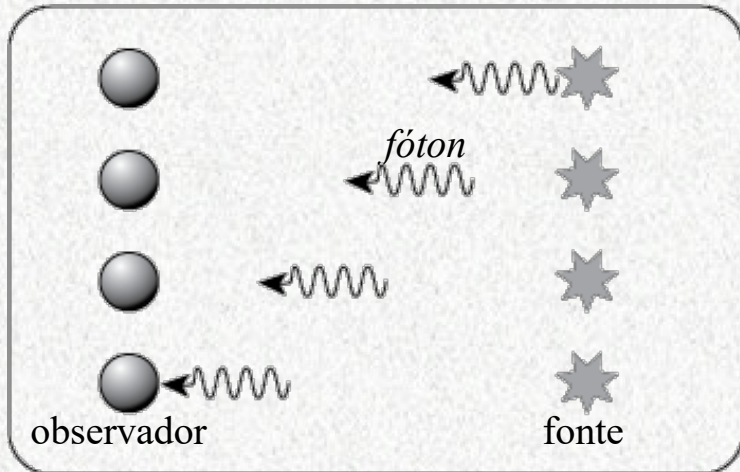
Indica a taxa de expansão do universo.

“Tamanho do universo” → Fator de escala (a)

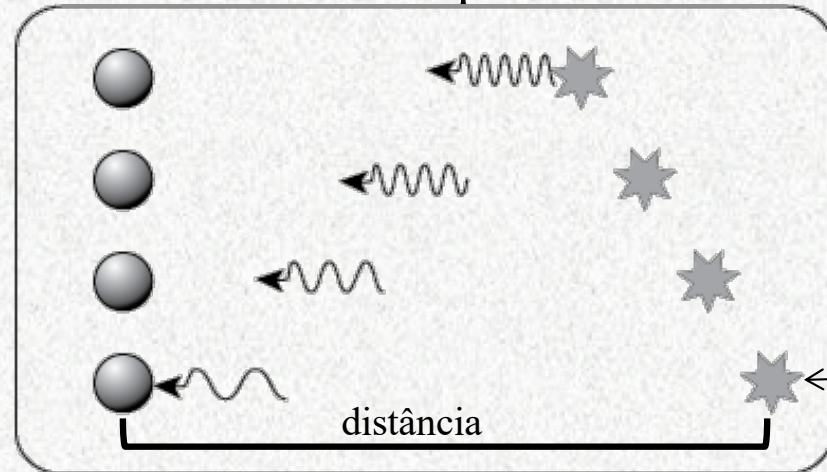
H não é constante!

Valor hoje: Constante de Hubble, H_0 .

universo estático



universo em expansão



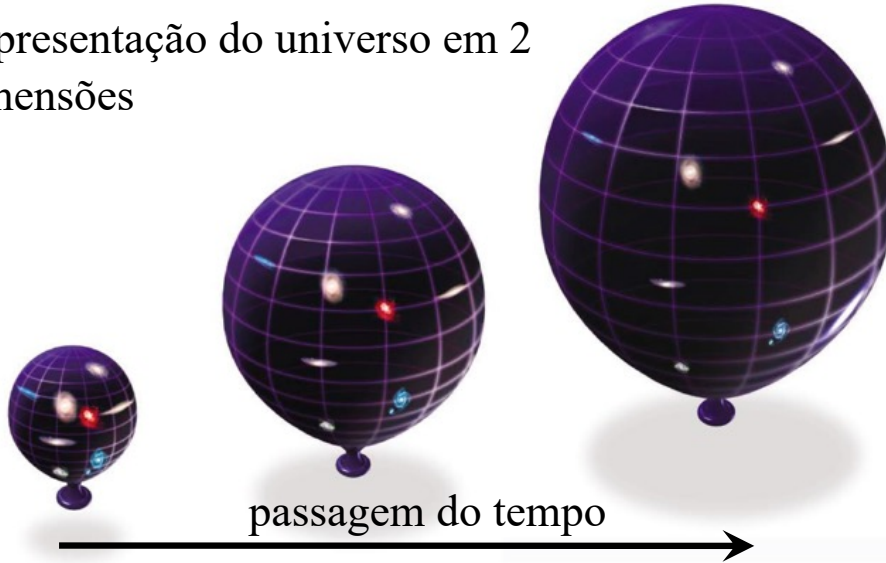
Além desta fonte não podemos observar: os fótons não tiveram tempo de chegar ao observador.

Maior distância observável = raio do universo observável ~ 14 Gpc hoje.

(raio de 45,5 bilhões de anos-luz hoje)

Lei de Hubble-Lemaître: expansão do Universo

Representação do universo em 2 dimensões



- Lei de Hubble implica em um universo isotrópico:
 - qualquer observador no universo determina a mesma lei de Hubble-Lemaître da expansão do universo.

Paradoxo de Olbers

- **Porque a noite é escura?**
- Questão já colocada por Kepler e E. Halley (1720), paradoxo devido a infinitas estrelas (em um universo eterno e infinito) que tornariam o céu infinitamente brilhante.

Imaginemos uma casca esférica com raio r e espessura dr centrada na Terra, uma densidade média de estrelas ρ_* , cada estrela com luminosidade \bar{L} (isto é, \bar{L} é a luminosidade média das estrelas). O número de estrelas em cada casca é $N_* = 4\pi\rho_*r^2dr$, e a luminosidade de uma casca será $L_{\text{casca}} = N_*\bar{L} = 4\pi\rho_*\bar{L}r^2dr$.

O brilho aparente (fluxo) de cada casca observado na Terra é, portanto:

$$f_{\text{casca}} = \frac{L_{\text{casca}}}{4\pi r^2} = \rho_*\bar{L}dr. \quad (1)$$

O brilho total, de todas as cascas, será $f = \int_0^\infty \rho_*\bar{L}dr \rightarrow \infty$. Ou seja, somando-se infinitas cascas, o brilho observado seria infinito.

Solução?

Paradoxo de Olbers

- **Porque a noite é escura?**
- Questão já colocada por Kepler e E. Halley (1720), paradoxo devido a infinitas estrelas (em um universo eterno e infinito) que tornariam o céu infinitamente brilhante.

O brilho aparente (fluxo) de cada casca observado na Terra é, portanto:

$$f_{\text{casca}} = \frac{L_{\text{casca}}}{4\pi r^2} = \rho_* \bar{L} dr. \quad (1)$$

O brilho total, de todas as cascas, será $f = \int_0^\infty \rho_* \bar{L} dr \rightarrow \infty$. Ou seja, somando-se infinitas cascas, o brilho observado seria infinito.

O Universo tem uma **idade finita**.

Portanto, só podemos observar um volume finito e a integral em distância é limitada.

O brilho superficial do céu noturno, excluindo a luz Galáctica, luz Zodiacal e o brilho da atmosfera corresponde à soma das galáxias não resolvidas: $\mu_V = 28,0 \text{ mag}/''^2$.

Expansão do Universo

Lei de Hubble: Velocidade de recessão = H_0 x distância

Quanto tempo levou para uma galáxia qualquer estar a uma certa distância de nós?

$$\text{tempo} = \text{distância}/\text{velocidade} = \text{dist.}/(H_0 \times \text{dist.}) = 1/H_0$$

O tempo acima não depende da galáxia considerada, qualquer que seja a distância.

Existe um tempo no passado, $\sim 1/H_0$, no qual todo o universo esteve em um mesmo ponto:
uma singularidade.

BIG BANG

Idade do Universo

Lei de Hubble: Velocidade de recessão = H_0 x distância

$$\text{tempo} = \text{distância}/\text{velocidade} = \text{dist.}/(H_0 \times \text{dist.}) = 1/H_0$$

$$H_0 = 72 \pm 5 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$

ou seja, a cada megaparsec (cerca de 3,3 milhões de anos-luz) o universo expande 72 km/s mais rapidamente.

$$\frac{1}{H_0} = \frac{1}{72 \text{ km/s}} = \frac{1 \text{ Mpc}}{72 \text{ km}} \text{ s} = \frac{3,086 \times 10^{19} \text{ km}}{72 \text{ km}} \text{ s} = 4,286 \times 10^{17} \text{ s} =$$

$$= 13,6 \text{ bilhões de anos}$$

Como o inverso de H_0 tem unidade de tempo, o valor acima significa (**aproximadamente**) a idade do universo.

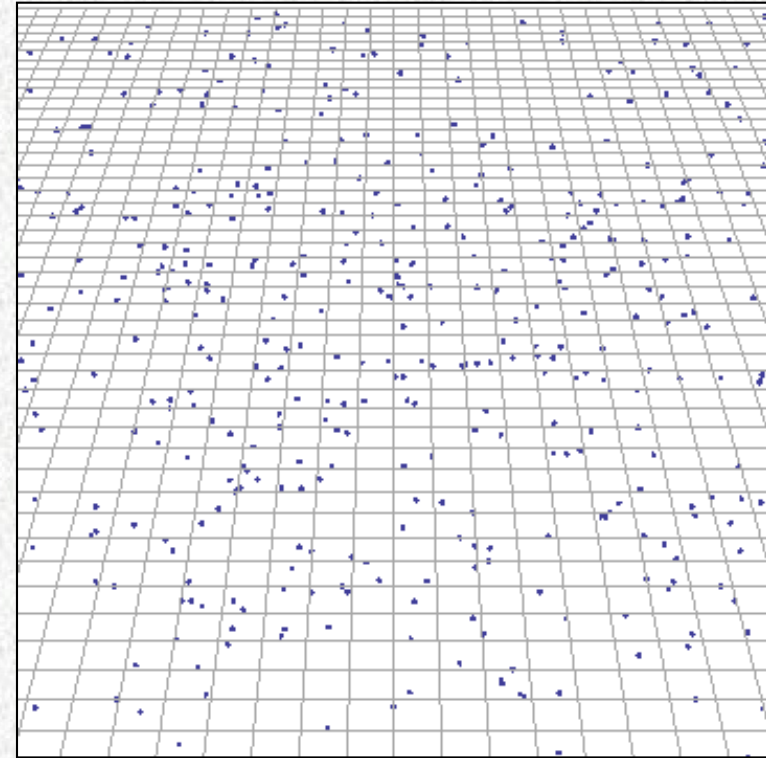
Um cálculo mais preciso dá algo entre 13,7 e 13,8 bilhões de anos.

Expansão do Universo

Existe um tempo no passado no qual todo o universo esteve em um mesmo ponto:

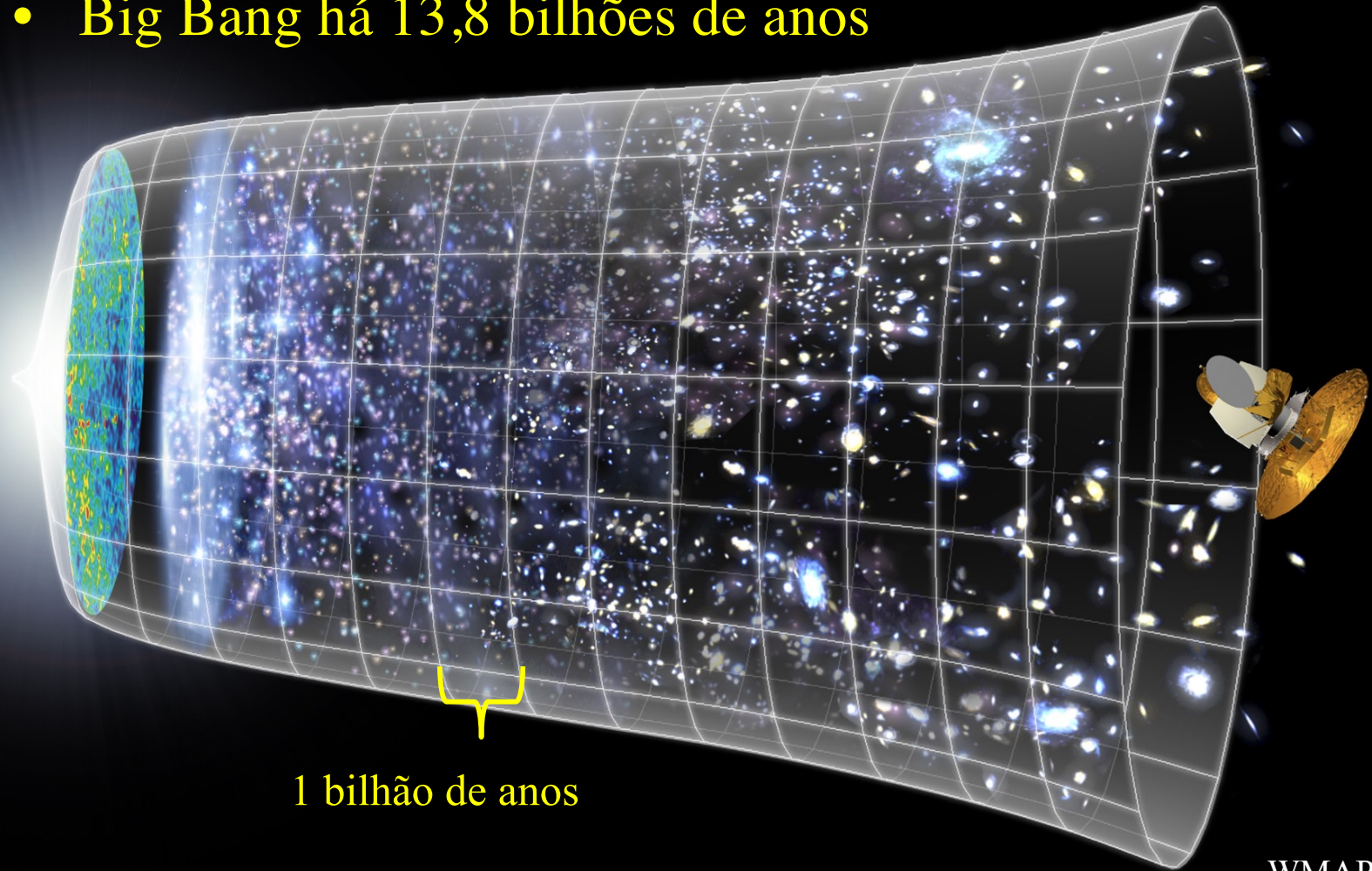
BIG BANG

- A expansão **NÃO** tem centro.
- O universo **NÃO** tem borda:
 - ou você anda para frente para sempre (universo infinito).
 - ou você anda sempre para frente e volta ao ponto de partida (universo finito).
- O universo **NÃO** expande para lugar nenhum.
 - não existe um “lado de fora” do universo.



História do universo

- Big Bang há 13,8 bilhões de anos



1 bilhão de anos

WMAP

História do universo é determinada pelos **parâmetros cosmológicos**

Parâmetros cosmológicos

Constante de Hubble
Densidade de matéria (escura e normal)
Densidade de energia escura
Densidade de radiação



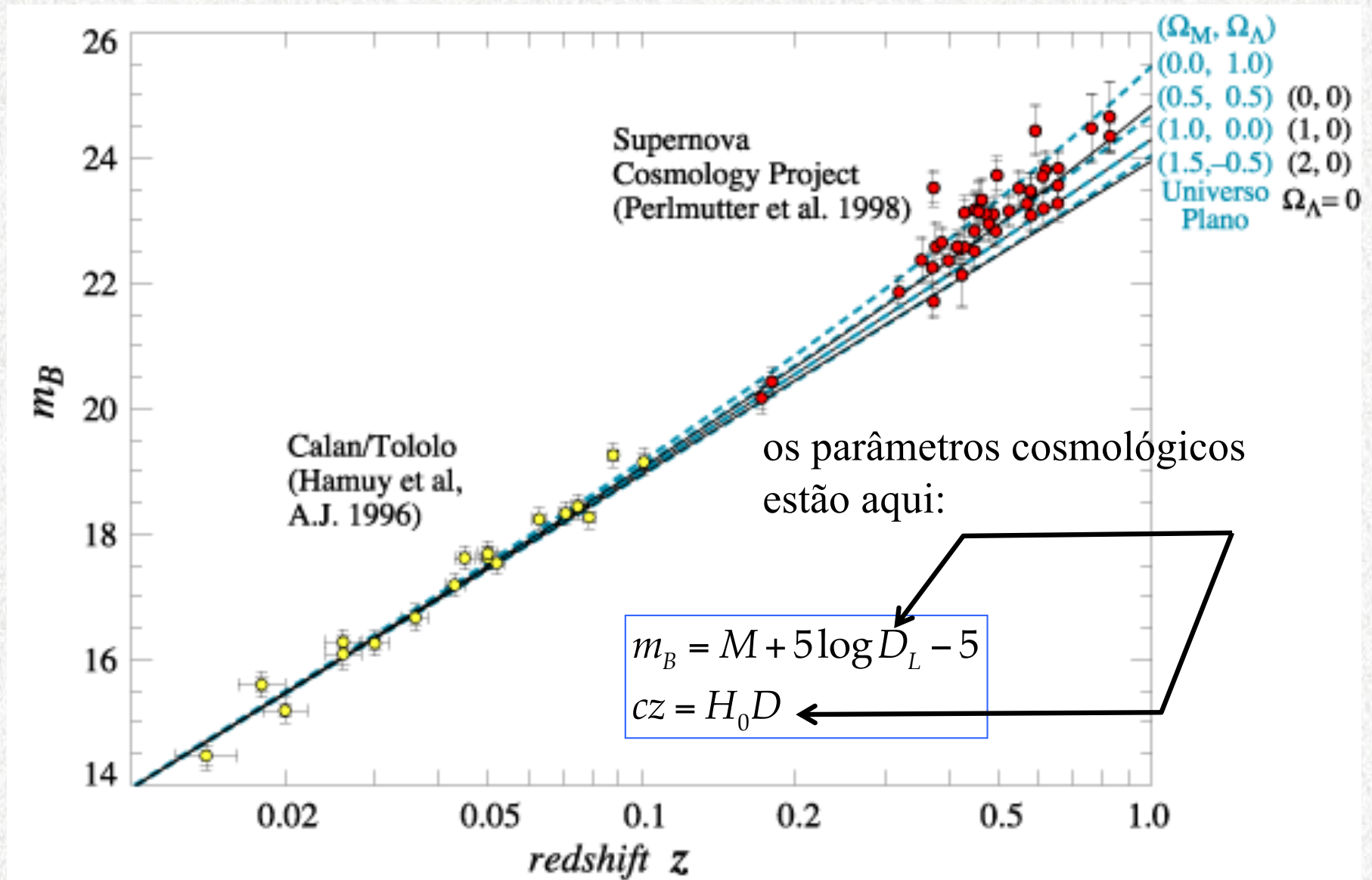
Idade do Universo
Densidade crítica
Curvatura do Universo

A **evolução do universo** é descrita pelas soluções das equações de Einstein: Equações de Friedmann–Lemâitre.

As soluções das equações de Friedmann–Lemâitre são determinadas pelos **parâmetros cosmológicos**.

Parâmetros cosmológicos são determinados **observacionalmente**

Determinação dos parâmetros cosmológicos. exemplo: supernovas distantes



Energia Escura

- 1998: observação de supernovas distantes de tipo Ia mostram que o universo está em **expansão acelerada**.

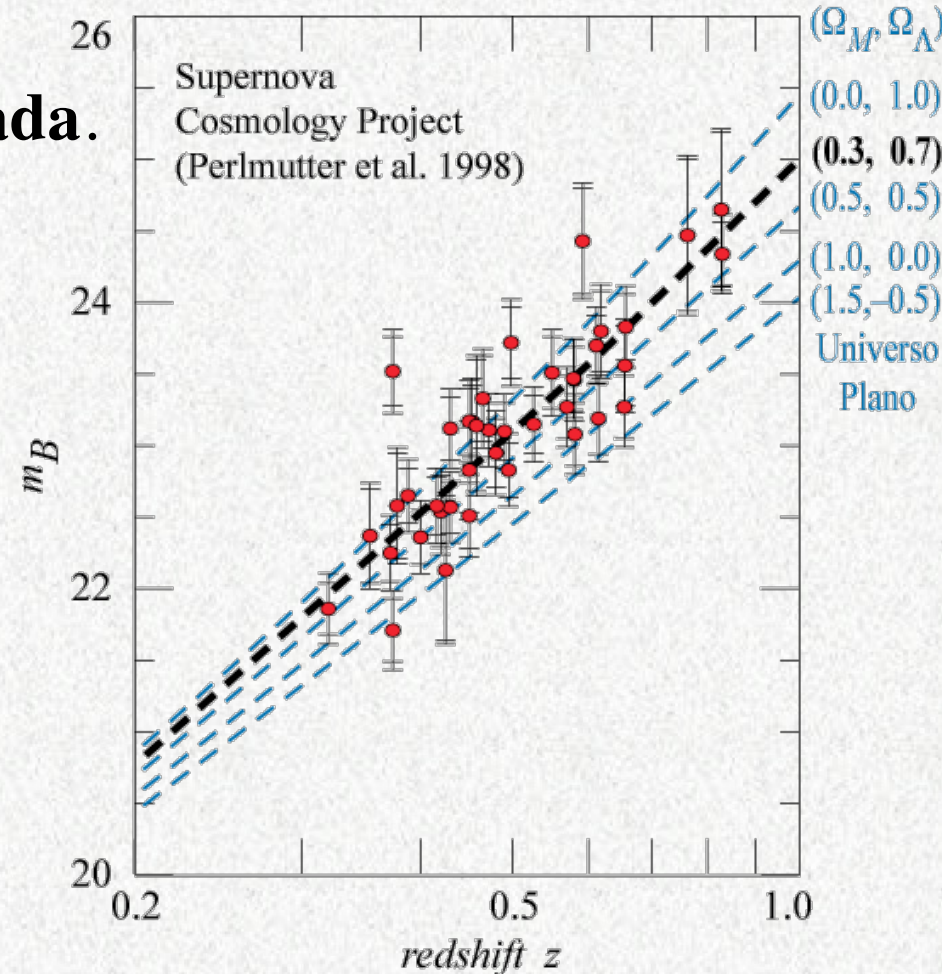
- As SNs distantes parecem menos brilhantes do que esperamos.

- 1998: Observação da radiação cósmica de fundo por balões mostraram que o universo tem **geometria plana**,

$$\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$$

(outras medidas davam $\Omega_M = 0,3$).

- Logo, existe uma componente além da matéria e radiação que chamamos de **Energia Escura** (na falta de um nome melhor) e 70% do universo é feito desta componente!

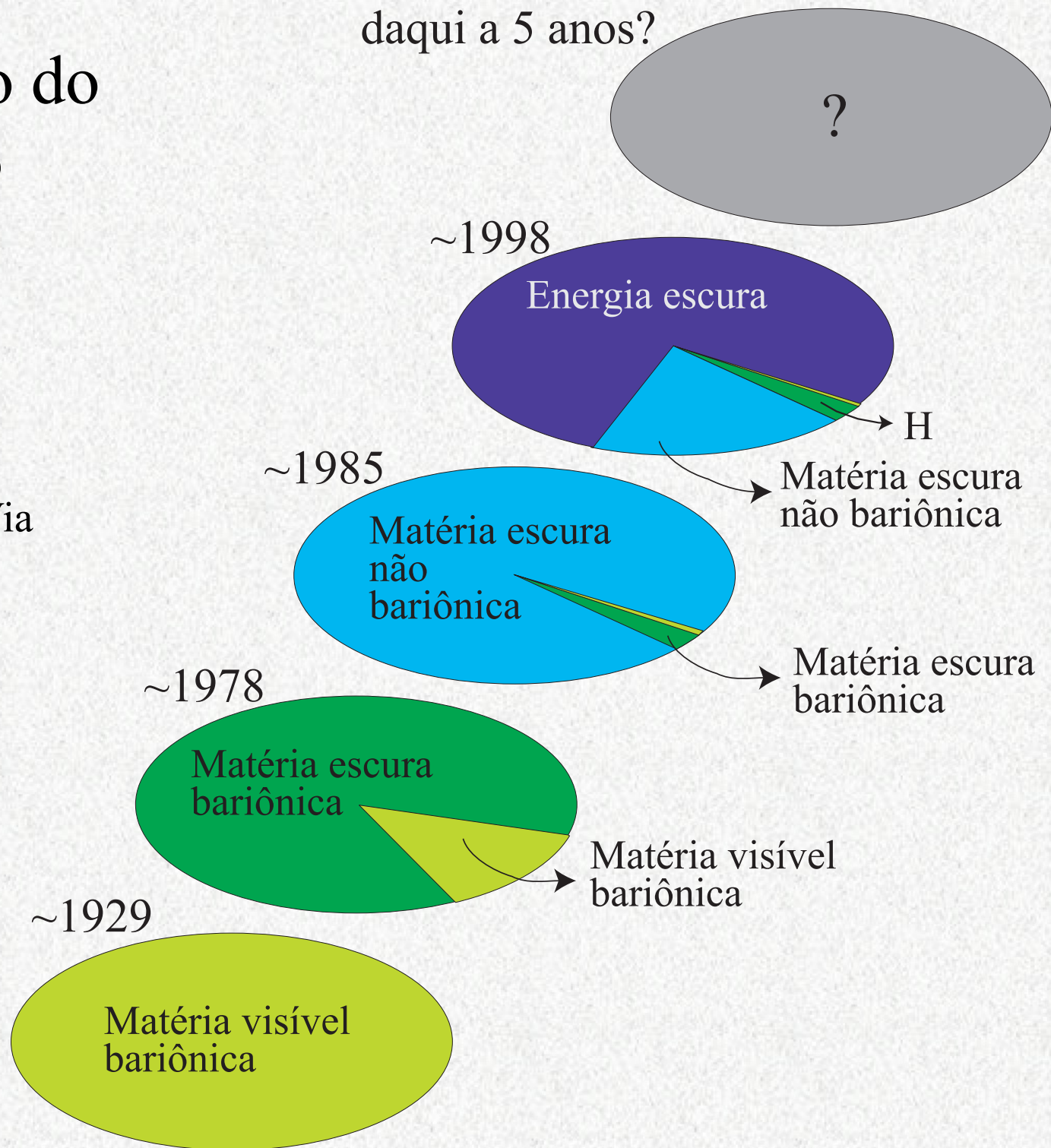


Composição do universo

Evolução da nossa concepção do universo.

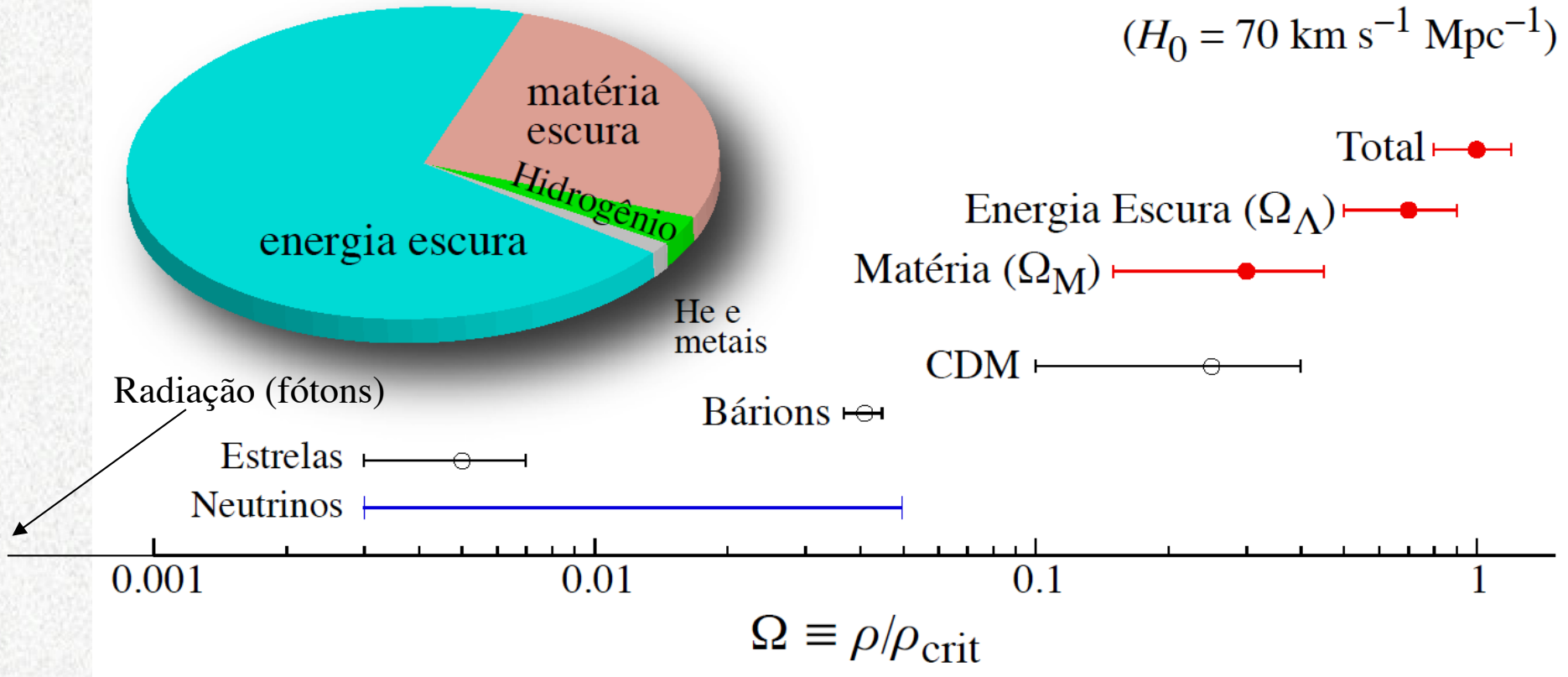
Antes de 1929, não sabíamos ainda se o Universo era apenas a Via Láctea ou não.

Matéria bariônica é aquela composta de Prótons e Nêutrons, isto é, a matéria normal que bem conhecemos.



Composição do universo hoje

$$(H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$$



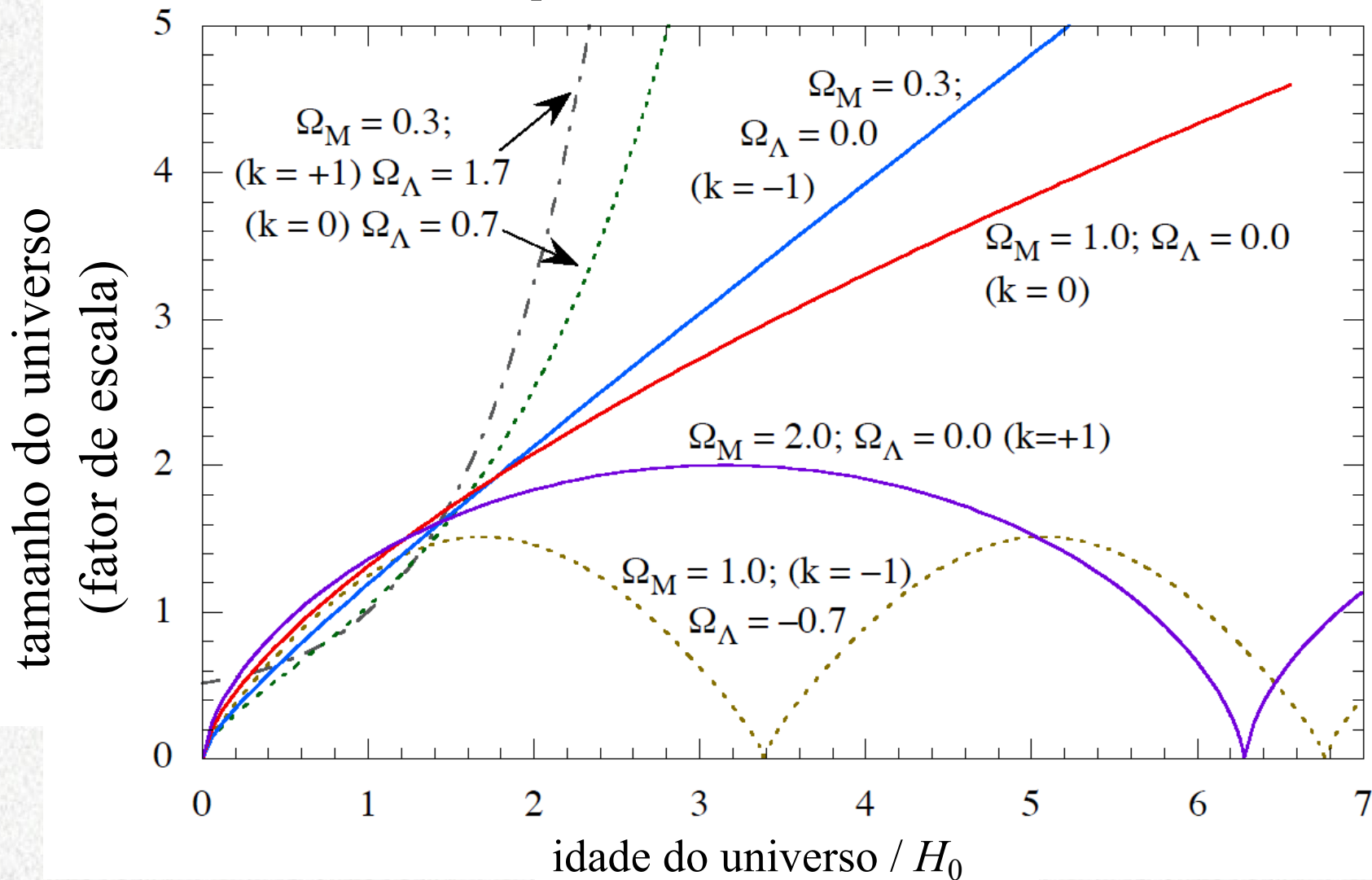
$$\rho_{\text{crit}} \equiv \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 1,9h^2 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \approx 2,8h^2 \times 10^{11} \text{ M}_{\text{sol}}/\text{Mpc}^3$$

Densidade crítica: densidade necessária para parar a expansão do universo, na ausência de energia escura

Componente	Porcentagem
Energia Escura	70%
Matéria Escura	26%
Hidrogênio	3%
“Metais”	1%
Radiação	0,005%

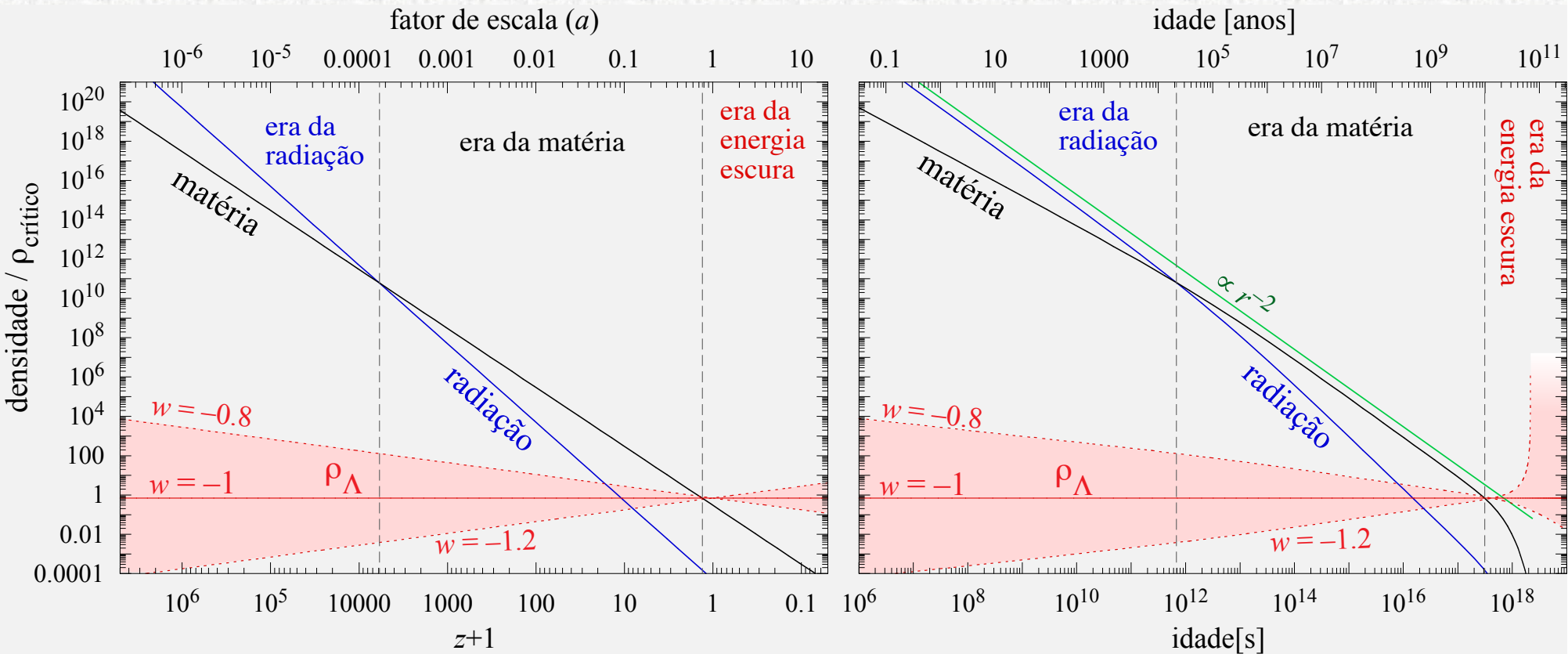
Massa-energia determina a evolução

Soluções da equação de Friedmann–Lemaître



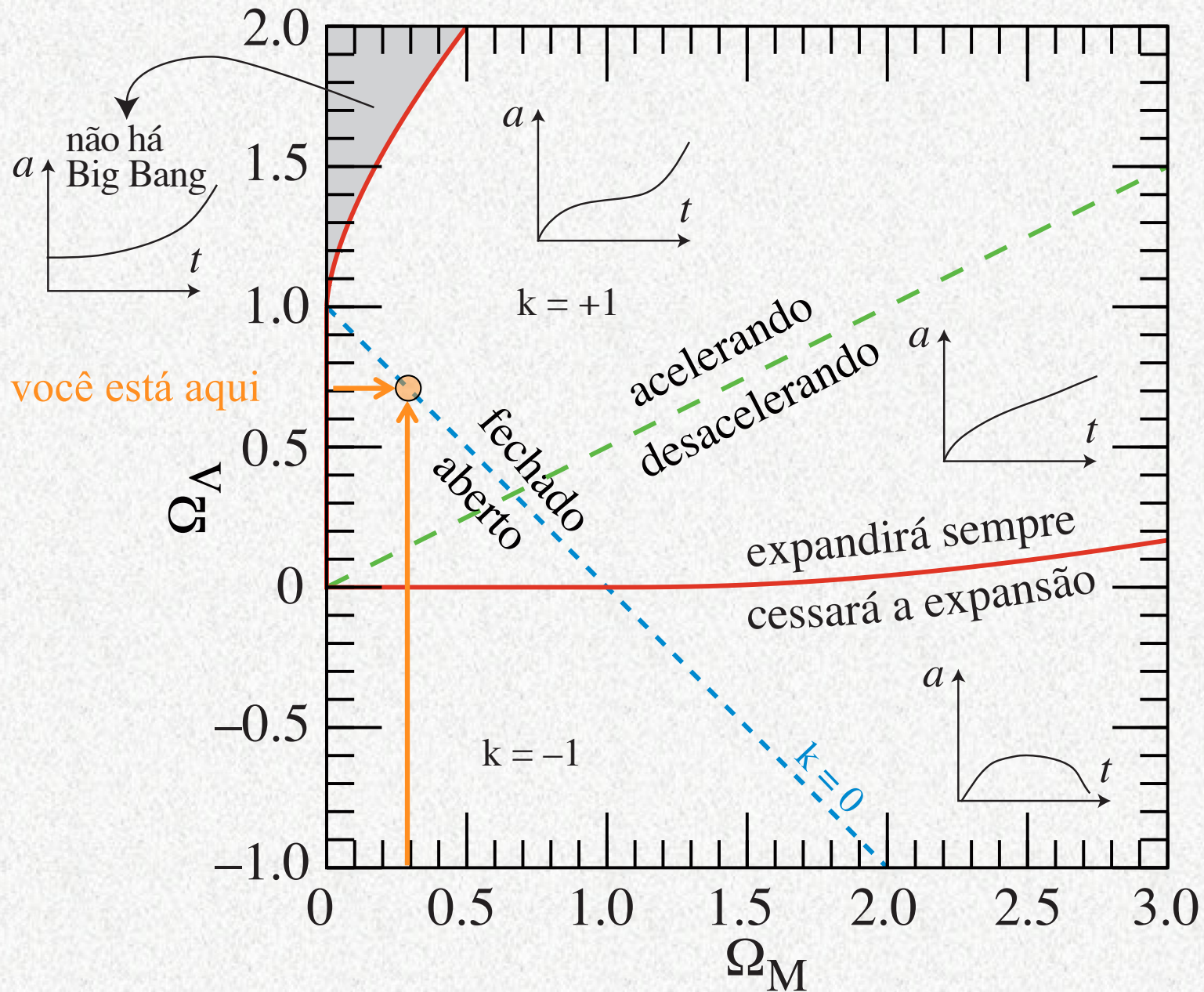
fator de escala hoje = 1

Uma breve história do Universo



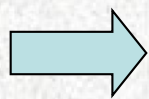
Evolução da densidade (ρ) das três principais componentes do Universo: radiação, matéria (escura e bariônica), e energia escura. As eras são definidas pela intersecção da reta representando a densidade de matéria com a densidade de radiação e a densidade de energia escura.

Massa-energia determina a evolução



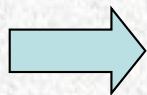
Determinação dos parâmetros cosmológicos

- ✓ Constante de Hubble: H_0
- ✓ Densidade de matéria: Ω_M
 - (matéria bariônica: Ω_B)
- ✓ Densidade de energia escura: Ω_Λ



Geometria do universo

Evolução e idade do universo



Formação de estruturas (galáxias, aglomerados,...)

Distribuição de matéria em grande escala