



# Cosmologia: Objetivos

---

Estudar a **origem(?)**, **evolução**, **forma** (organização) e **destino** do “Universo” em larga escala, empregando o conhecimento científico estabelecido das Leis Físicas

# Desde que o mundo é mundo...

➤ As mais antigas indagações:



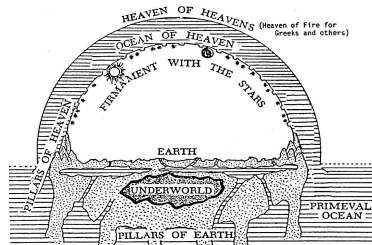
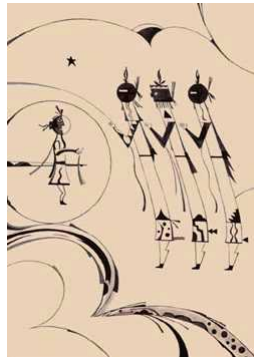
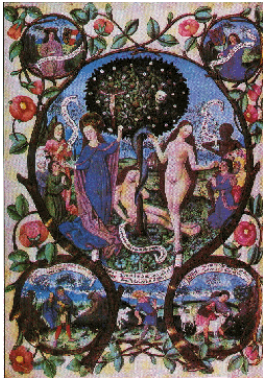
De onde viemos?  
Qual a origem de tudo?  
Como as coisas se  
tornaram como são?

⋮  
⋮

Pobre observação + Muita imaginação = Mitos de Criação

# Desde que o mundo é mundo...

## ➤ As mais antigas indagações:



Pobre observação + Muita imaginação = Mitos de Criação



# Cosmologia como uma Ciência

---

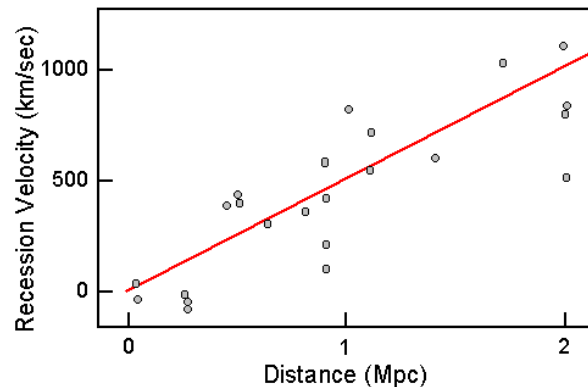
- Marcos que possibilitaram o nascimento da Cosmologia como Ciência:
  - Observacionais:
    - Telescópio óptico (Galileu) – Responsável por todos os avanços até meados do séc. XX;
    - Radiotelescópios (pós II Guerra);
    - Astronomia de infravermelho, raios-X, raios gama;
    - Avanços em Física do Estado Sólido: detetores 50 vezes mais sensíveis que chapas fotográficas;
    - Nova geração de telescópios orbitais e VLAs.
  - Teóricos:
    - Entendimento de que a gravidade deve ser a força responsável pela formação e organização de estruturas (Newton);
    - Descoberta de uma teoria da gravidade apropriada para tratar a questão: Relatividade Geral (Einstein);
    - Melhor entendimento da Física de Altas Energias (Teoria Quântica de Campos).

# Bases da Cosmologia Moderna

## ➤ Universo em expansão: Lei de Hubble (1929)

- A maioria das galáxias observadas apresenta linhas espectrais deslocadas para comprimentos de onda maiores (redshift) (Slipher, 1912);

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} \approx \frac{v}{c}$$



$$v = H_0 d$$

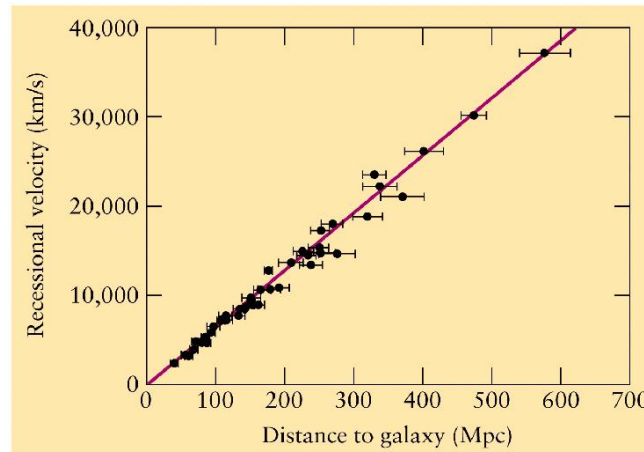
$$H_0 \approx 540 \text{ (km/s)/Mpc}$$

# Bases da Cosmologia Moderna

## ➤ Universo em expansão: Lei de Hubble (1929)

- A maioria das galáxias observadas apresenta linhas espectrais deslocadas para comprimentos de onda maiores (redshift) (Slipher, 1912);

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} \approx \frac{v}{c}$$



$$v = H_0 d$$

$$H_0 \approx 540 \text{ (km/s)/Mpc}$$

$$H_0 = (70,4 \pm 1,4) \text{ (km/s)/Mpc}$$

**Conseqüência: No passado o Universo era mais denso e quente e, possivelmente, teve um "início"! Idade estimada: ~ 14 bilhões de anos.**



# Bases da Cosmologia Moderna

---

➤ Universo em expansão: Lei de Hubble (1929)

- A maioria das galáxias observadas apresenta linhas espectrais deslocadas para comprimentos de onda maiores (redshift) (Slipher, 1912);

➤ Isotropia espacial em larga escala:

- Matéria distribuída isotropicamente pelo espaço em grandes escalas;

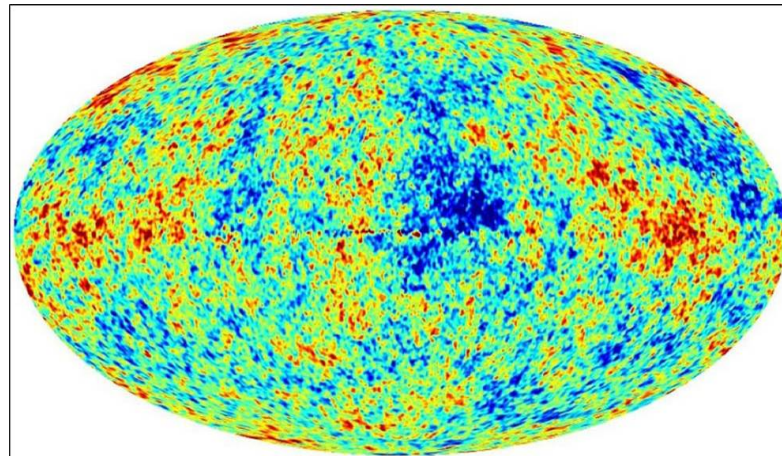
# Bases da Cosmologia Moderna

## ➤ Universo em expansão: Lei de Hubble (1929)

- A maioria das galáxias observadas apresenta linhas espectrais deslocadas para comprimentos de onda maiores (redshift) (Slipher, 1912);

## ➤ Isotropia espacial em larga escala:

- Matéria distribuída isotropicamente pelo espaço em grandes escalas;
- Radiação cósmica de fundo (RCF) isotrópica com precisão de 1 parte em 100000.



$$T_0 = 2,728 \text{ K}$$

$$\Delta T = 18 \mu\text{K}$$





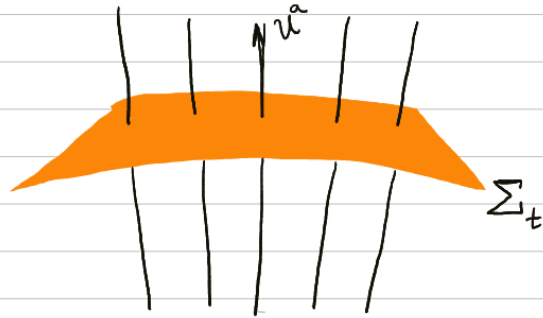
# Bases da Cosmologia Moderna

---

- Universo em expansão: Lei de Hubble (1929)
  - A maioria das galáxias observadas apresenta linhas espectrais deslocadas para comprimentos de onda maiores (redshift) (Slipher, 1912);
- Isotropia espacial em larga escala:
  - Matéria distribuída isotropicamente pelo espaço em grandes escalas;
  - Radiação cósmica de fundo (RCF) isotrópica com precisão de 1 parte em 100000.
- Princípio Cosmológico (espacial):
  - Nosso ponto (espacial) de observação não é privilegiado; homogeneidade espacial.

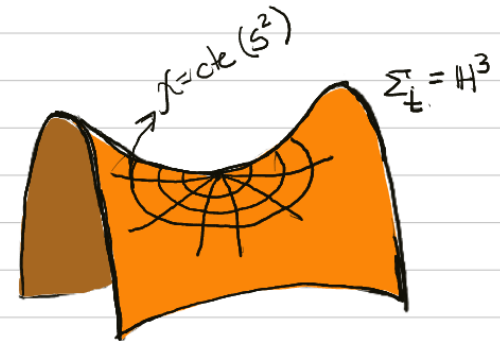
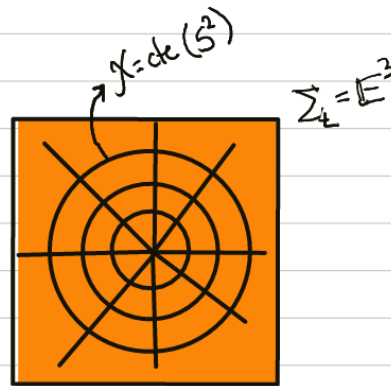
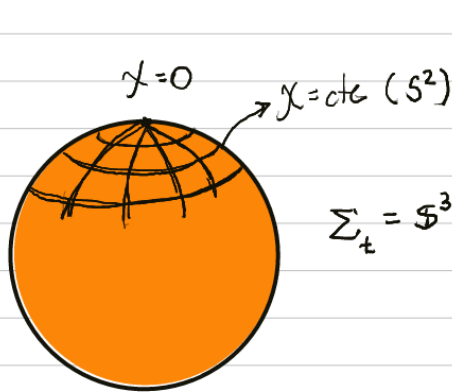
■ Universo espacialmente homogêneo e isotrópico

→ Existe uma família de observadores (i.e., congruência de linhas-de-mundo tipo-tempo) para a qual o universo é isotrópico para todos os membros dessa família



$\mathcal{P} = \bigcup_{t \in \mathbb{R}} \Sigma_t$ , cada  $\Sigma_t$  é um espaço 3d homogêneo e isotrópico

Possibilidades:

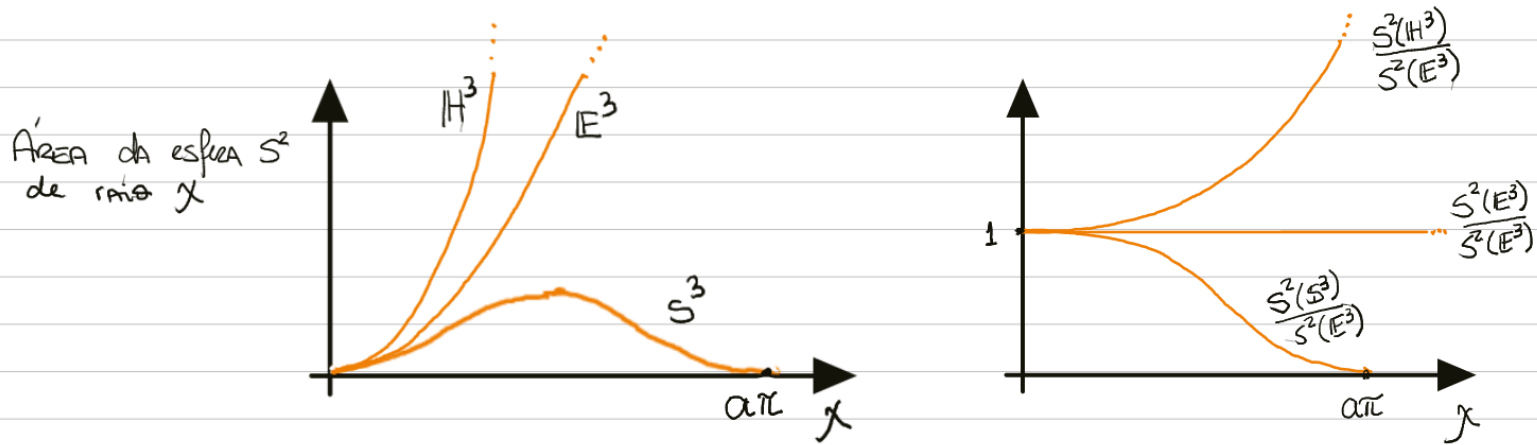


$$dl^2 = dx^2 + (\sin x)^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$dl^2 = dx^2 + x^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$dl^2 = dx^2 + (\sinh x)^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 dl^2$$



Exercício: Mostre que o elemento-de-linha acima pode ser colocado NA FORMA:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[ \frac{dr^2}{(1-kr^2)} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right],$$

com  $k = 1, 0, -1$ . Identifique qual geometria espacial se ASSOCIA A CADA um desses valores de  $k$ .

Exercício: Mostre que o elemento-de-linha acima pode ser colocado NA FORMA

$$ds^2 = a(\eta)^2 \left[ -c^2 d\eta^2 + \frac{dr^2}{(1-kr^2)} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right],$$

onde  $\eta$  é chamado de "tempo conforme".

Exercício: Calcule as componentes do tensor de Ricci associado à métrica acima, tanto em coordenadas  $\{t, r, \theta, \varphi\}$  quanto  $\{\eta, r, \theta, \varphi\}$ .

Formulário:  $R_{\mu\nu} = R_{\mu\nu}{}^\alpha{}_\alpha$ ,  $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ ,

$$R_{\mu\alpha\nu}{}^\beta = \partial_\alpha \Gamma_{\mu\nu}^\beta - \partial_\mu \Gamma_{\alpha\nu}^\beta + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \Gamma_{\lambda\alpha}^\beta - \Gamma_{\alpha\nu}^\lambda \Gamma_{\lambda\mu}^\beta,$$

$$\Gamma_{\mu\nu}^\alpha = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} (\partial_\mu g_{\nu\beta} + \partial_\nu g_{\beta\mu} - \partial_\beta g_{\mu\nu}).$$