

Cosmologia

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

O que é cosmologia?

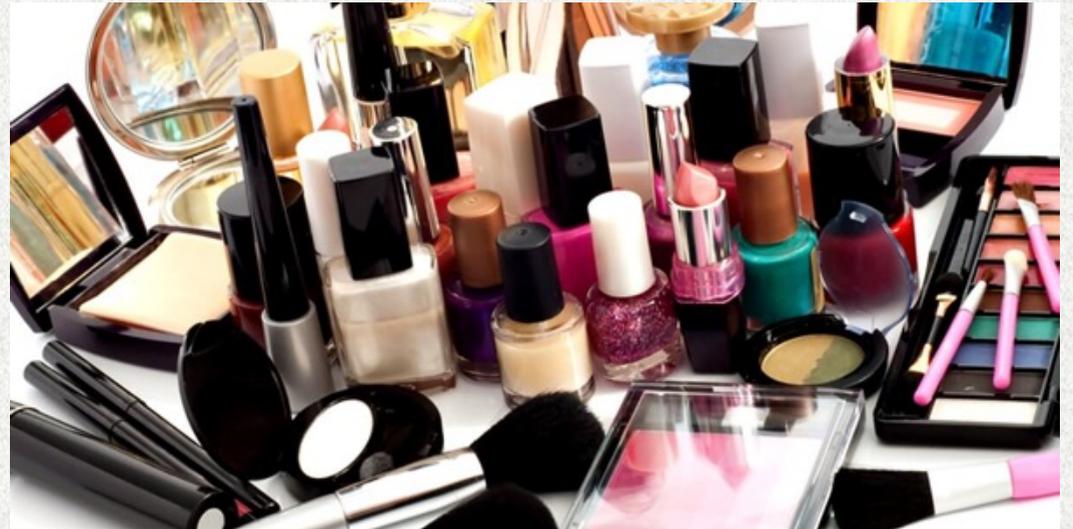
- Ciência que estuda o Universo, seu conteúdo, sua natureza e sua história.
- Algumas perguntas:
 - Como surgiu o Universo?
 - Qual é sua idade e tamanho?
 - Do que o Universo é feito?
 - O que vai acontecer com o Universo?
 - Quando e como surgiram as estrelas e as galáxias?



Imagem do aglomerado de galáxias
SMACS 0723, JWST (2022)

O que é cosmologia?

- A palavra **cosmologia** vem do grego: *kosmos* (ordem, harmonia, beleza) + *logia* (estudo, discurso).
- Os gregos, desde Pitágoras pelo menos, usavam a palavra *kosmos* no sentido de **universo**.
- A palavra *kosmos* também está na origem da palavra **cosmético**.

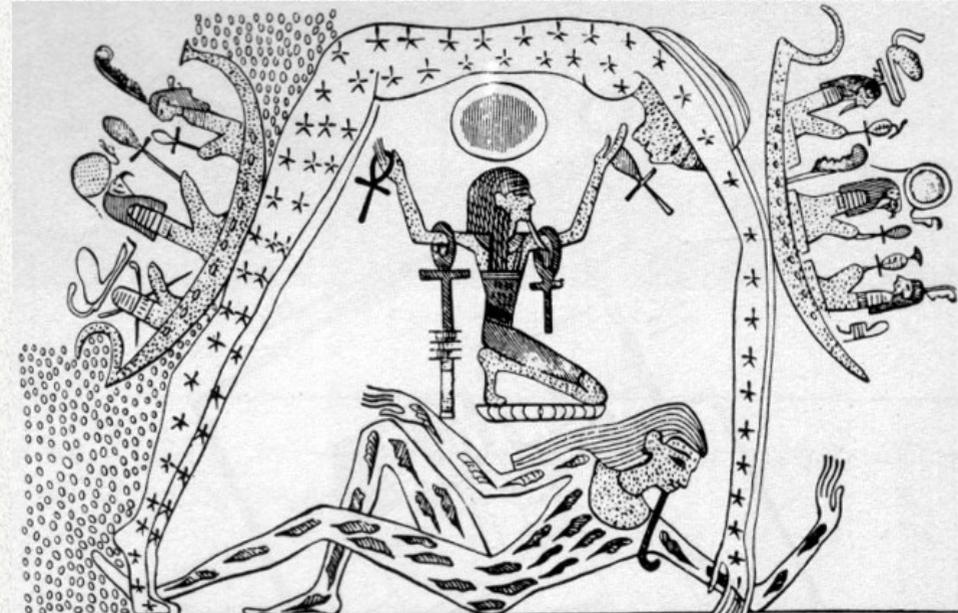


Cosmologia

- Questão sempre presente em todas as sociedades, desde a pré-história.
- Na Antiguidade, a cosmologia se confundia com a mitologia e superstição.



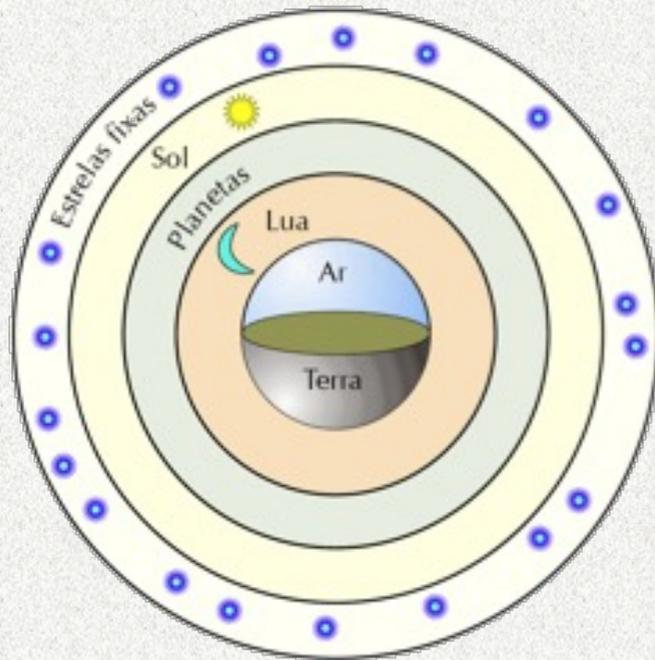
Mitologia Asteca



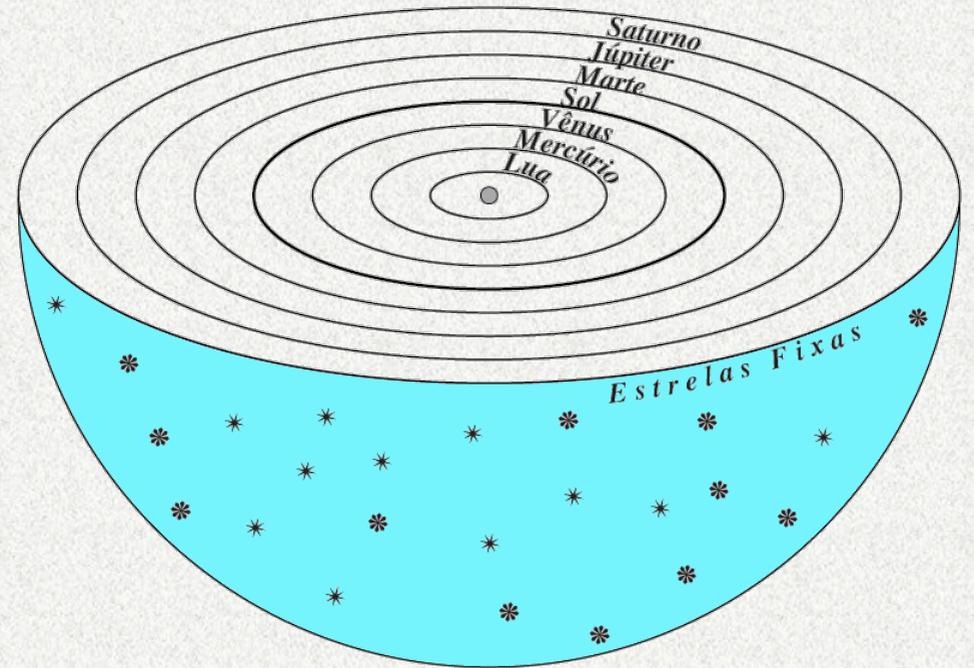
Visão do Universo no Egito antigo

Universo geométrico grego

- Na Grécia, há cerca de 2500 anos, surge uma visão racional do Universo.
- Método Científico: observação, interpretação, teoria.



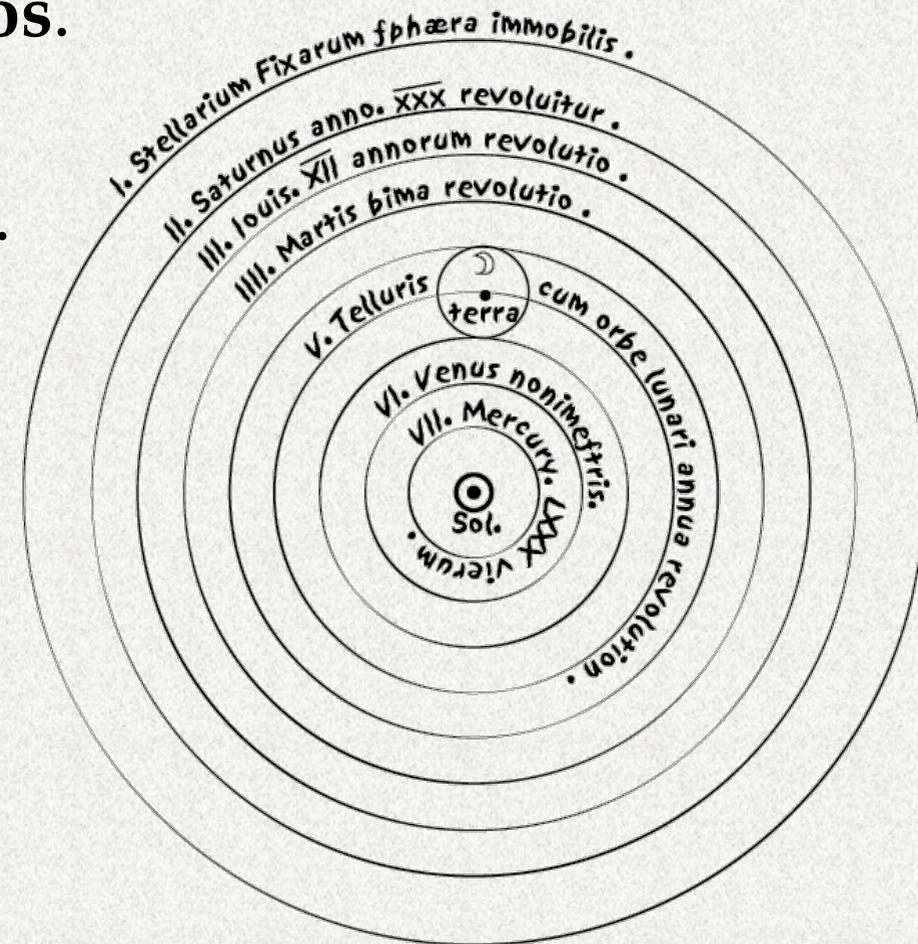
Leucipo (~450 a.C.)



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

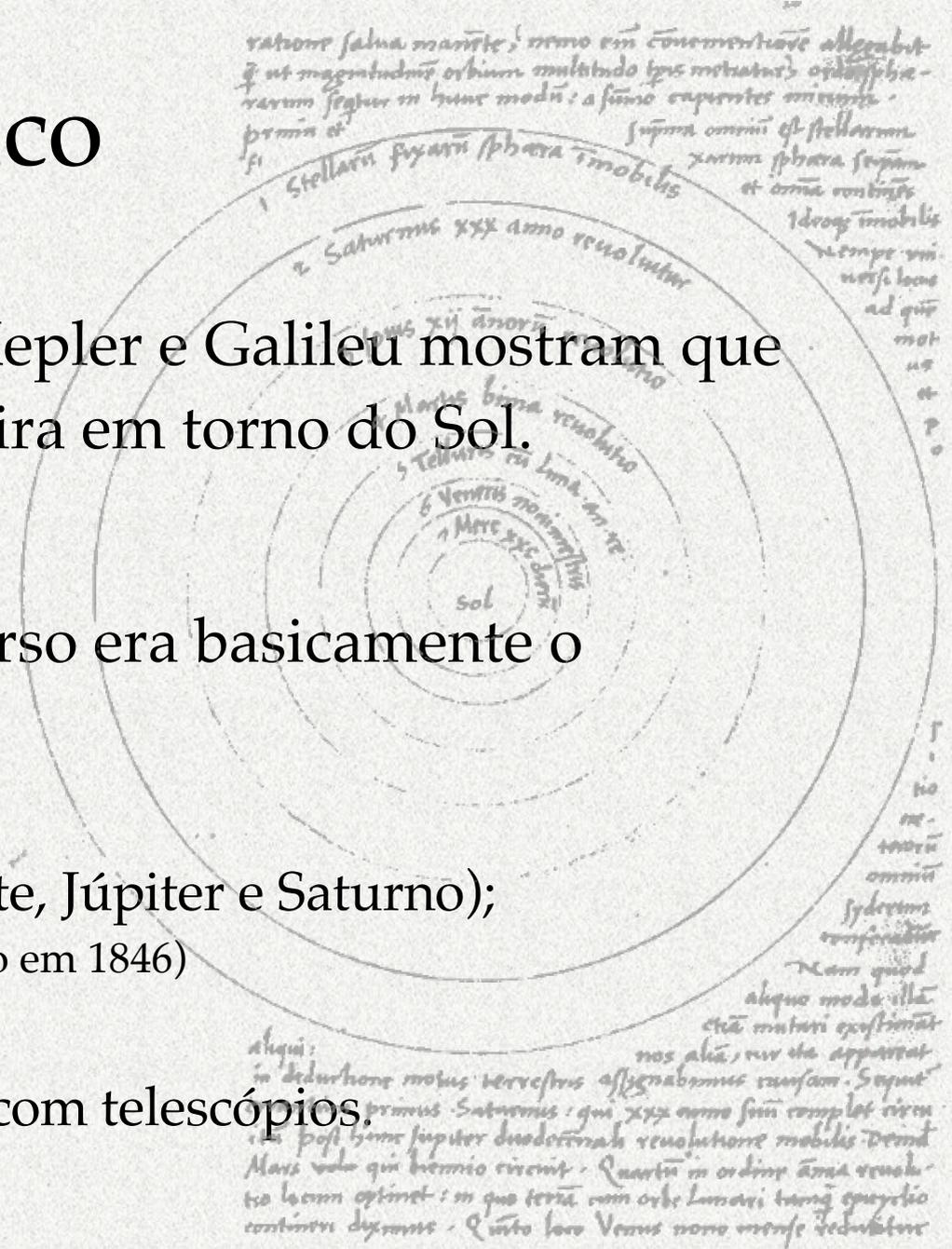
Universo geométrico grego

- A maioria dos modelos colocavam a Terra no centro do Universo: **Modelos geocêntricos.**
- Aristarco (~220 a.C.) foi uma exceção: **Modelo heliocêntrico.**
- A ideia da Terra no centro do Universo, defendida por Aristóteles durou quase 2 milênios.

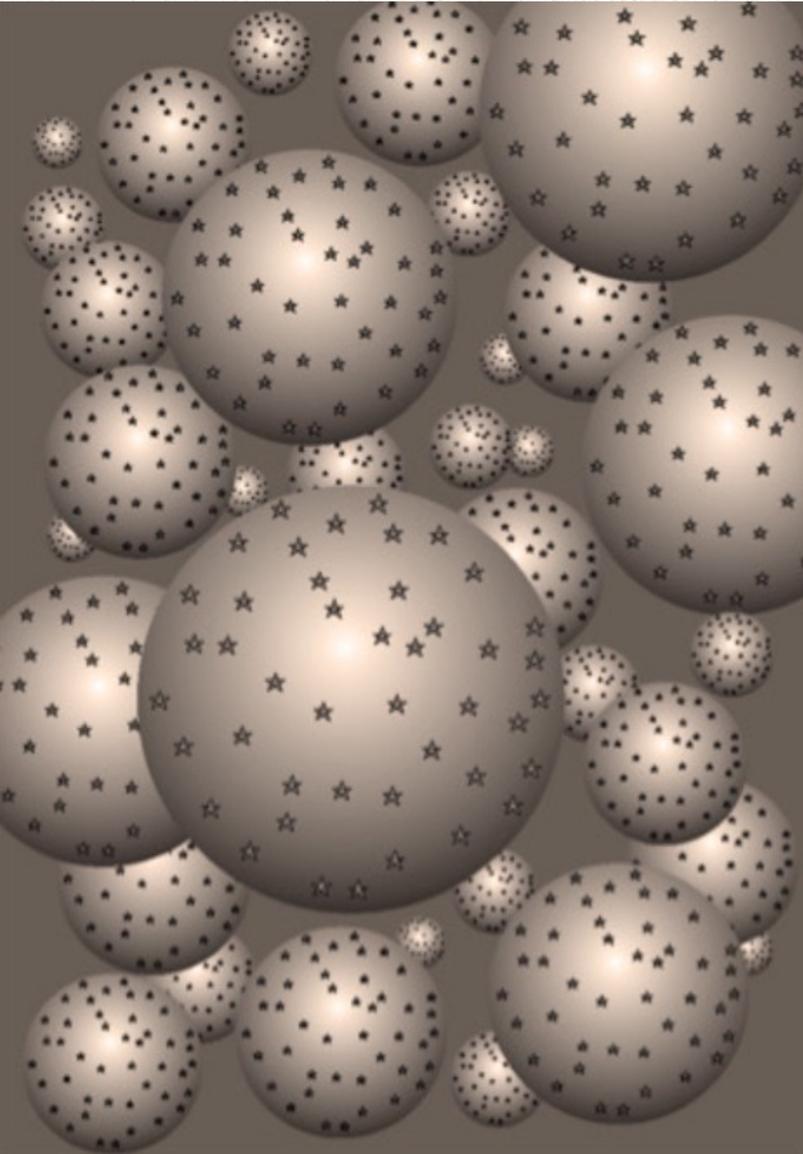


Universo heliocêntrico

- Entre 1530 e 1630, Copérnico, Kepler e Galileu mostram que os planetas, inclusive a Terra, gira em torno do Sol.
- No início do século 17, o Universo era basicamente o Sistema Solar:
 - o Sol, a Terra e a Lua;
 - 5 planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno);
 - ✓ (Urano foi descoberto em 1781; Netuno em 1846)
 - As estrelas fixas;
 - As nebulosas, recém descobertas com telescópios.



Universo de estrelas e nebulosas

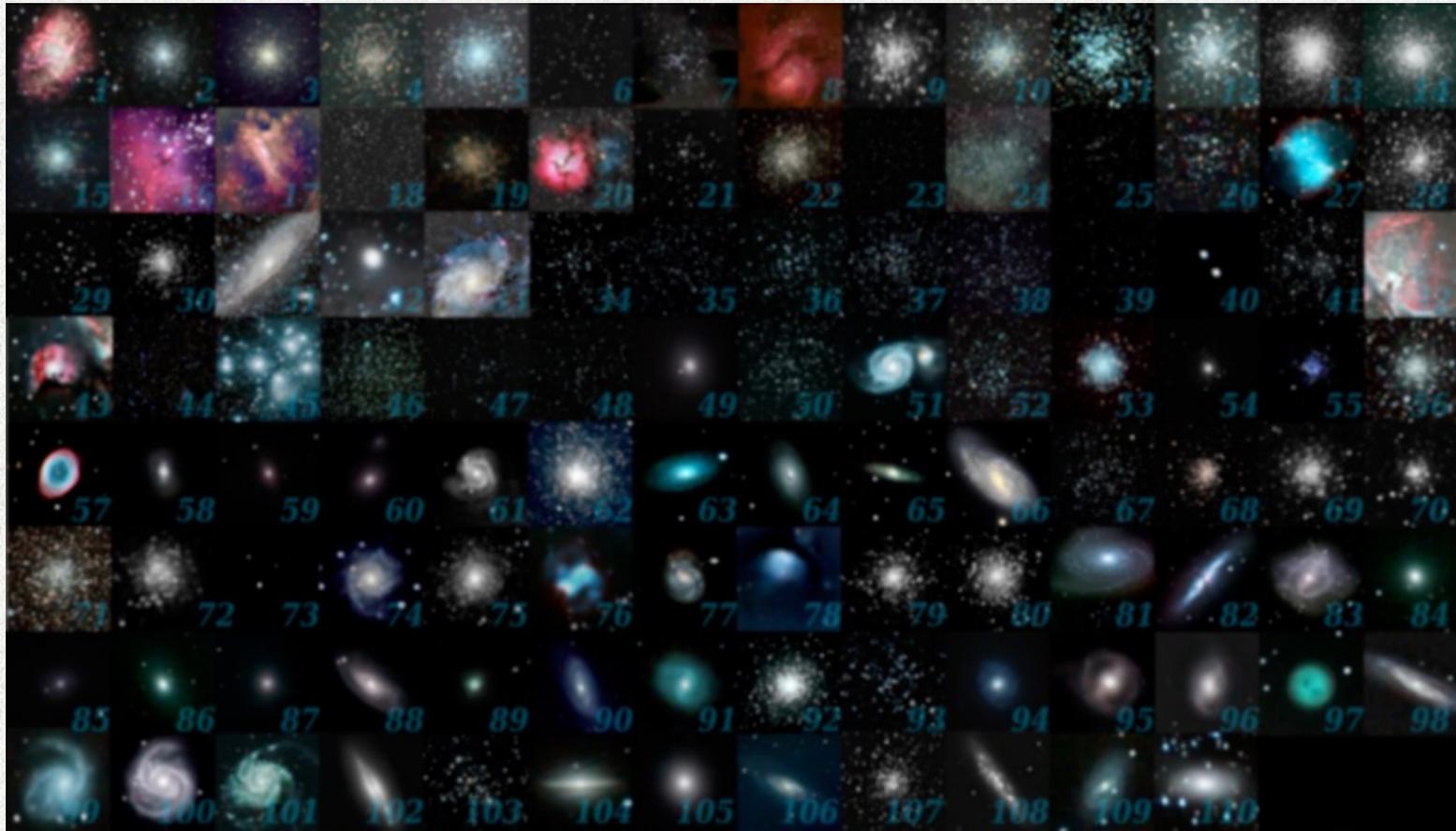


- Com telescópios cada vez maiores e melhores, o Universo parece cada vez mais vasto.
- Em 1750, Thomas Wright sugere que a Via Láctea seja uma casca esférica de estrelas.
- Immanuel Kant escreve sobre o que será chamado mais tarde de “Universos ilhas”.



Universo de estrelas e nebulosas

- Entre 1771 e 1781, Charles Messier produziu o primeiro catálogo de nebulosas e aglomerados estelares, com pouco mais de 100 objetos.



Charles Messier

Universo de estrelas e nebulosas

- Entre 1780 e 1802, William e Caroline Herschel catalogam cerca de 2500 nebulosas.
- John Herschel dá continuidade acrescentando nebulosas observáveis do Hemisfério Sul. Em 1864, o catálogo tinha cerca de 5000 nebulosas.



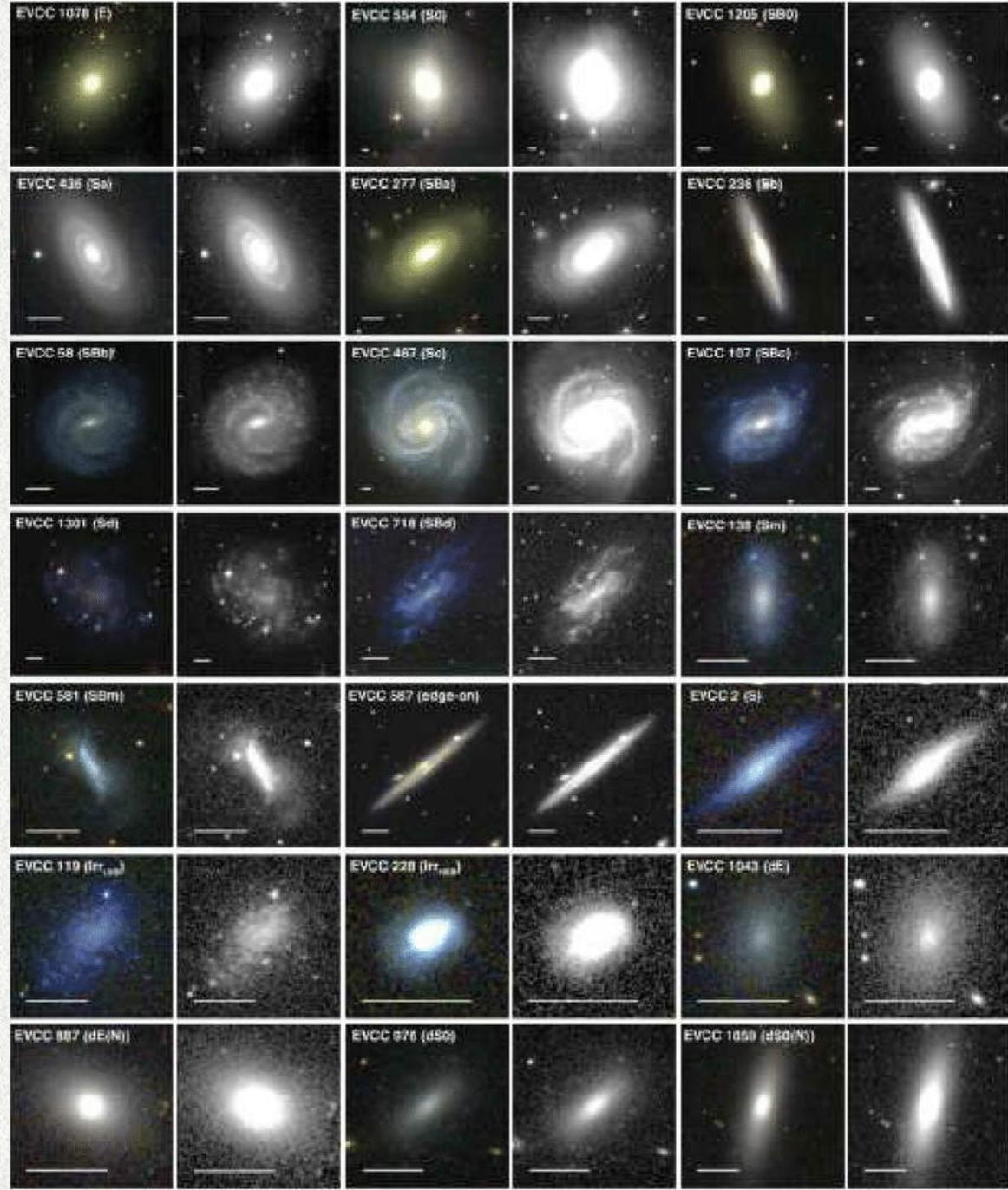
Fotografia feita em placa de vidro por John Herschel do telescópio de seu pai



William e Caroline Herschel

Universo de estrelas e nebulosas

- O que são as nebulosas?
- Qual é sua ligação com a Via Láctea?
- Como é nosso Universo?



Grande debate de 1920

Harlow Shapley	Heber D. Curtis
<ul style="list-style-type: none">• Via Láctea muito grande• Sol distante do centro• Nebulosas fazem parte da galáxia; a Via Láctea corresponde a todo o universo.	<ul style="list-style-type: none">• Via Láctea pequena• Sol está no centro• Nebulosas são “universos ilhas”; a Via Láctea é também um “universo ilha”.

Universo de estrelas

X

Universo de galáxias

- Dificuldade: medir distâncias.
- Papel da poeira interestelar desconhecido.
- Em 1926, Edwin Hubble mostra que muitas nebulosas estão muito além da Via Láctea.



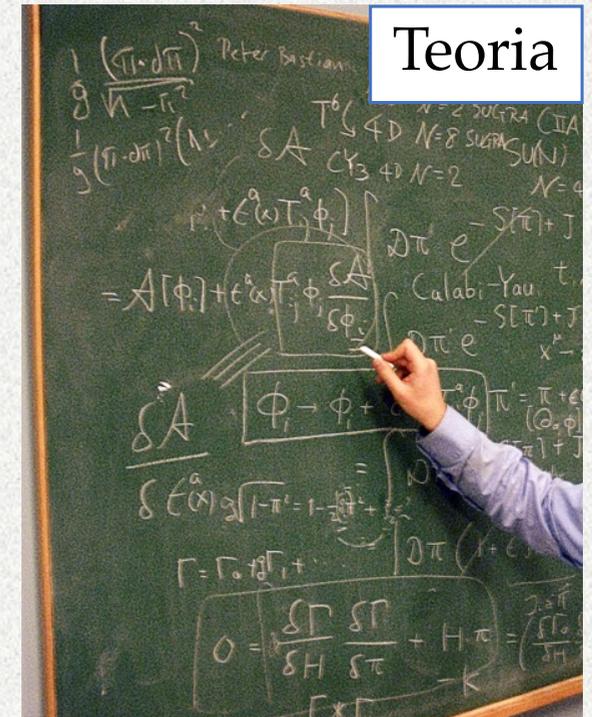
Cosmologia

- O início do século 20 marca o começo da cosmologia moderna.
- A cosmologia se apoia em duas bases:

Observações

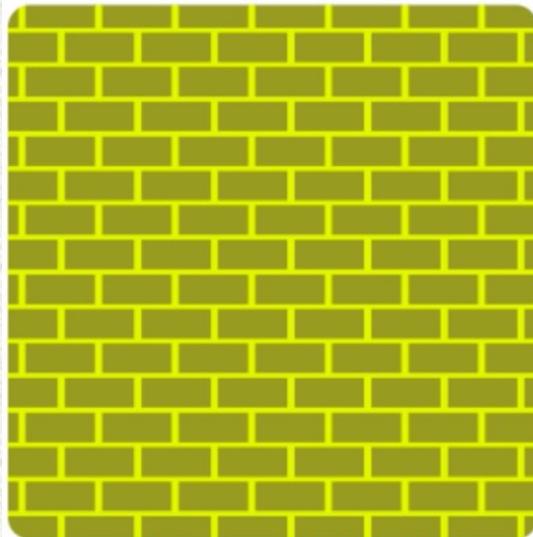


Teoria

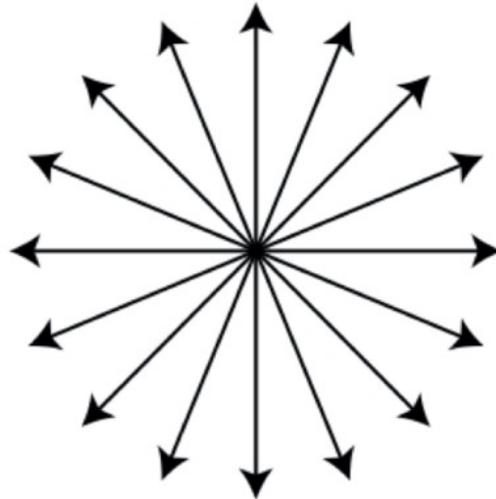


Base teórica da cosmologia

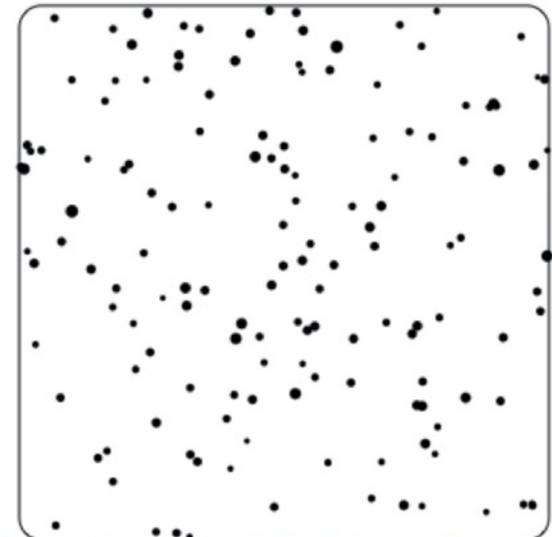
- **Princípio cosmológico:**
“Universo é homogêneo e isotrópico” (em grande escala).
- **Homogêneo:** todas as regiões do universo são idênticas;
- **Isotrópico:** mesma aparência para qualquer observador ou mesma aparência em qualquer direção.



Homogêneo, mas não isotrópico



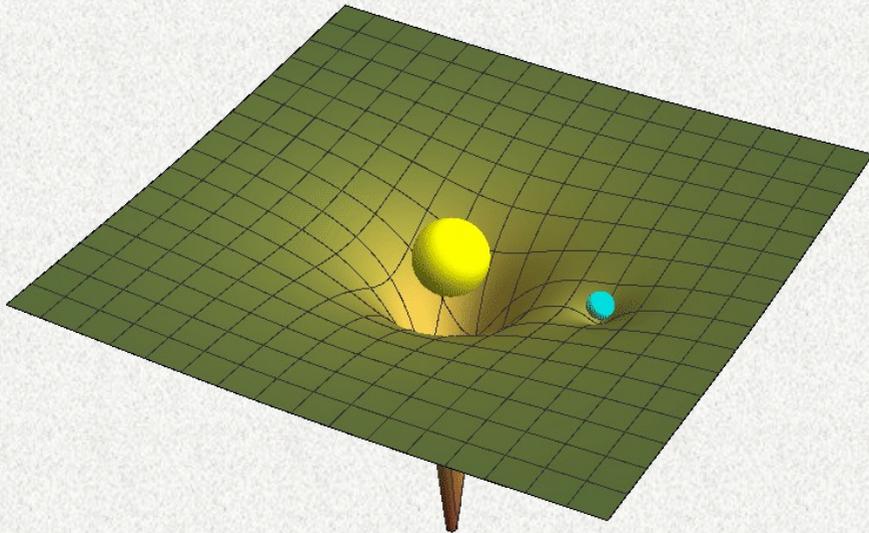
Isotrópico (no centro), mas não homogêneo



Homogêneo e isotrópico (em grande escala)

Base teórica da cosmologia

- **Relatividade Geral** (Einstein, 1915) → **Gravitação**.
- Gravitação é a força relevante para a descrição da evolução do universo.
- Geometria do espaço-tempo \leftrightarrow conteúdo de matéria/energia.
→ **Curvatura do Universo**.



Matéria e energia deformam o espaço-tempo.

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

Pilares observacionais da Cosmologia

- Expansão do Universo
 - (Hubble, Lemaître, 1927, 1929)
- Abundância de elementos leves (He, D, Li)
 - Gamow; Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle [B²FH] (1940s,1950s)
- Radiação cósmica de fundo (CMB)
 - Penzias e Wilson (1964)

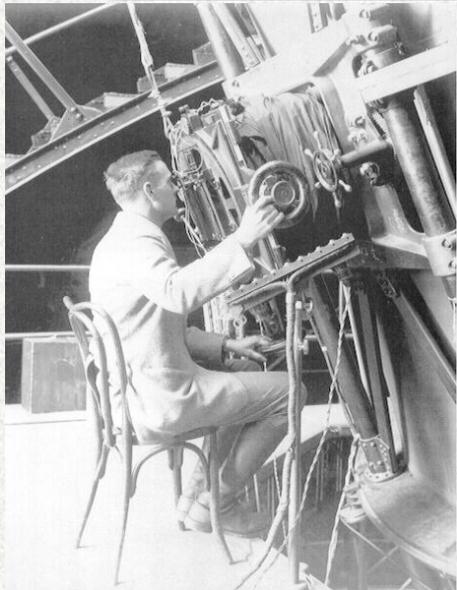


Expansão do Universo

- Seguindo os trabalhos de **Henrietta Leavitt** e **Vesto Slipher**, **Edwin Hubble** mostra em 1929 que o Universo está expandindo.
- Dois anos antes, **George Lemaître** tinha chegado nesta conclusão, mas seu trabalho estava em uma publicação obscura belga.
- Lei de Hubble-Lemaître: quanto **mais distante** está uma galáxia, mais **rapidamente ela se afasta** de nós:

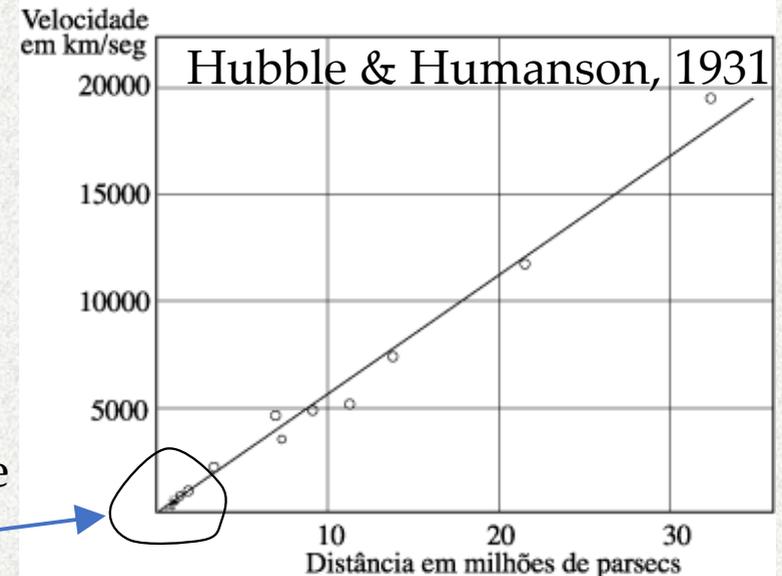
Lei de Hubble-Lemaître: $v = H_0 D$

$H_0 \rightarrow$ “Constante” de Hubble



Edwin Hubble
(1899–1953) no
Monte Wilson.

Trabalho original de
Hubble em 1929

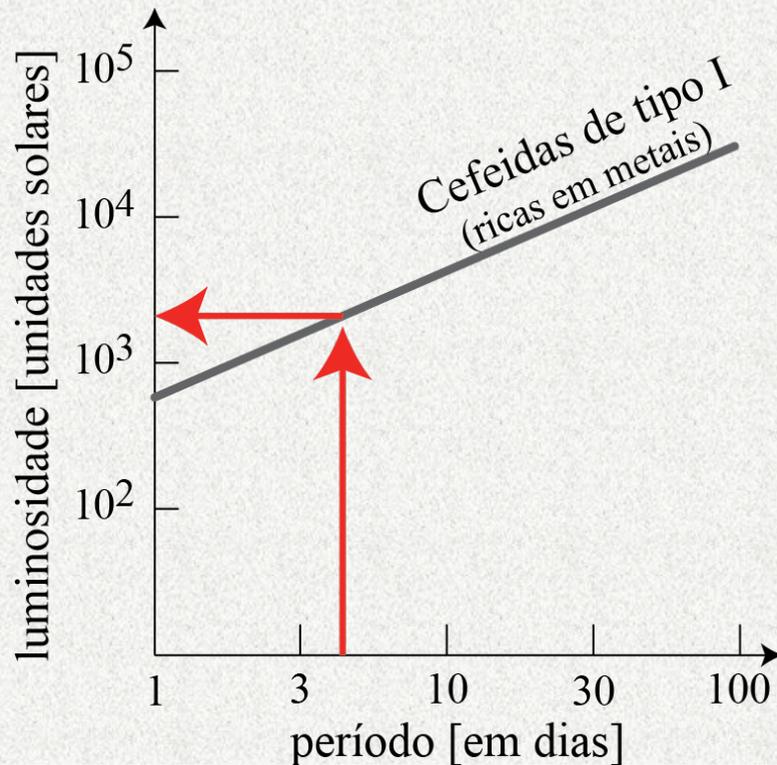


Medindo a velocidade e distância de galáxias

- Em 1912, Henrietta Leavitt descobre a relação **Período-Luminosidade** de estrelas variáveis de tipo Cefeida.
- Com isto, é possível obter a luminosidade da estrela através da **medida do período de variação** e, conseqüentemente, a **distância**:



Henrietta Leavitt



$$\text{fluxo} = \frac{\text{luminosidade}}{4\pi D^2}$$

medido nas imagens

distância

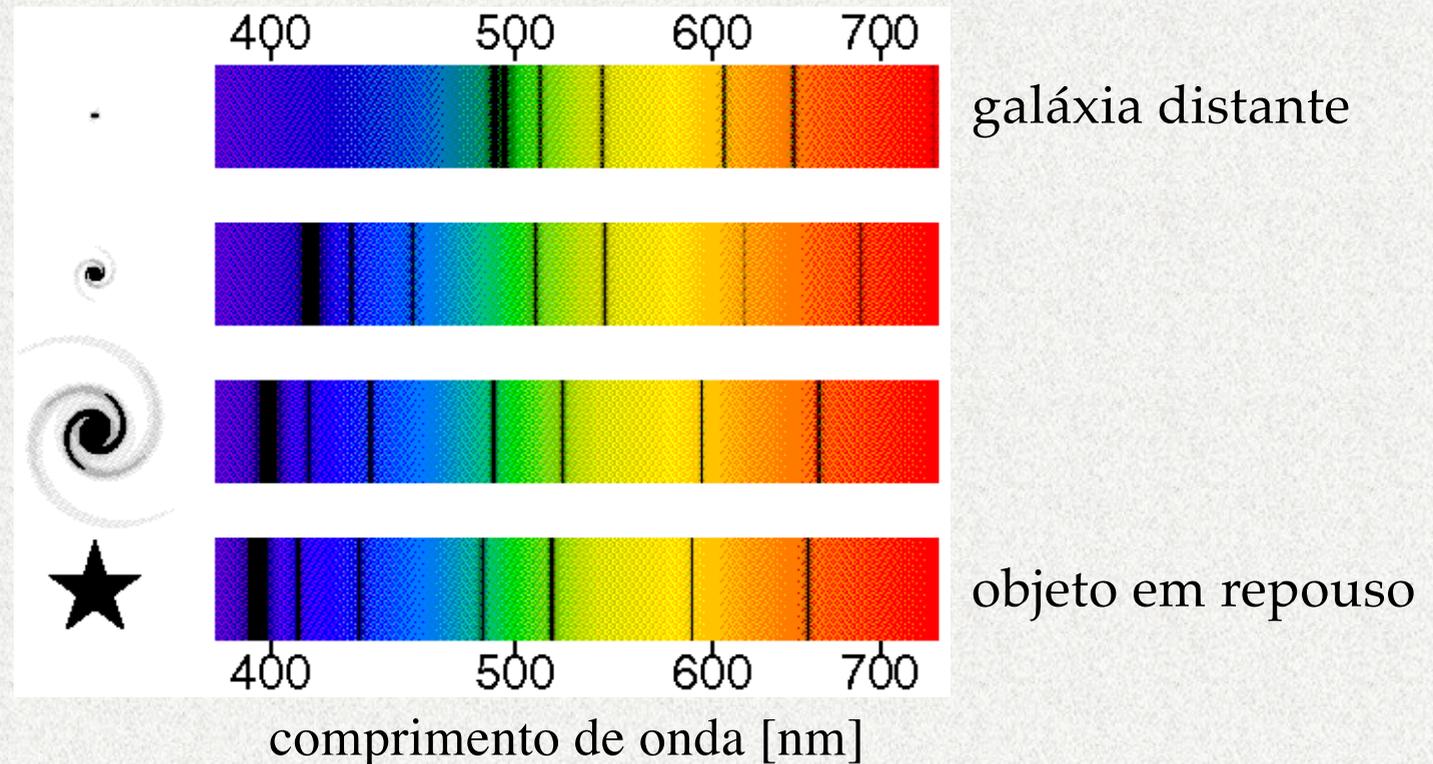
Medindo a velocidade e distância de galáxias

- A expansão do Universo tem um efeito semelhante ao efeito Doppler → objetos se afastando de nós têm sua luz “desviada para o vermelho”, o *redshift* (z).
- Medindo o espectro de galáxias, obtemos sua velocidade em relação a nós:

$$c z = v \quad [v \ll c]$$

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

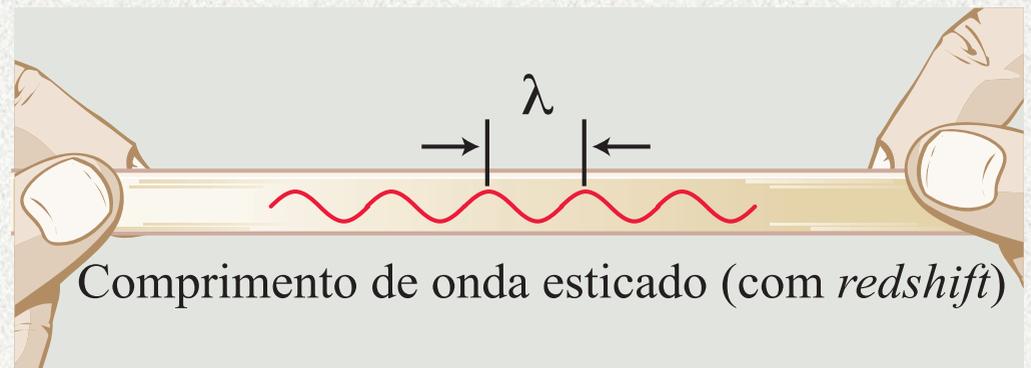
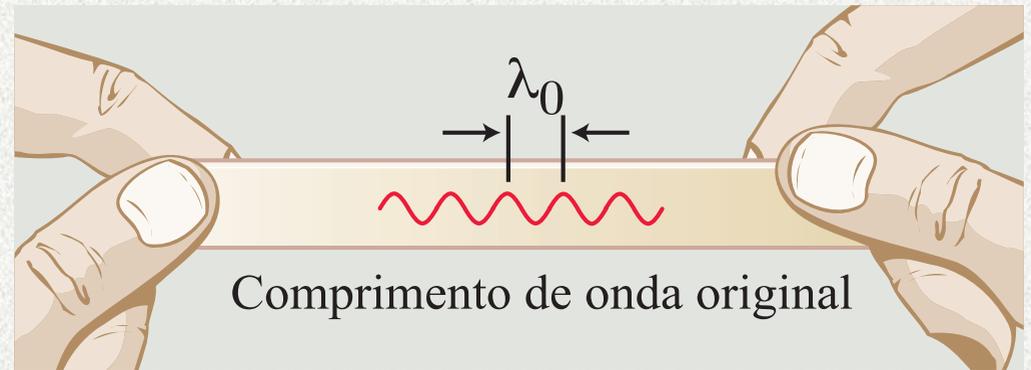
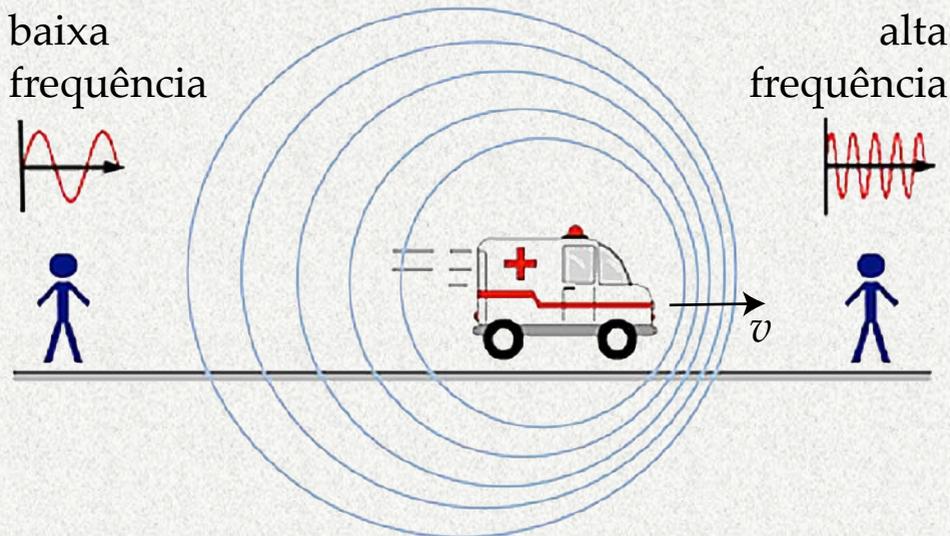

redshift



Redshift e a 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.**

- Efeito semelhante ao efeito Doppler



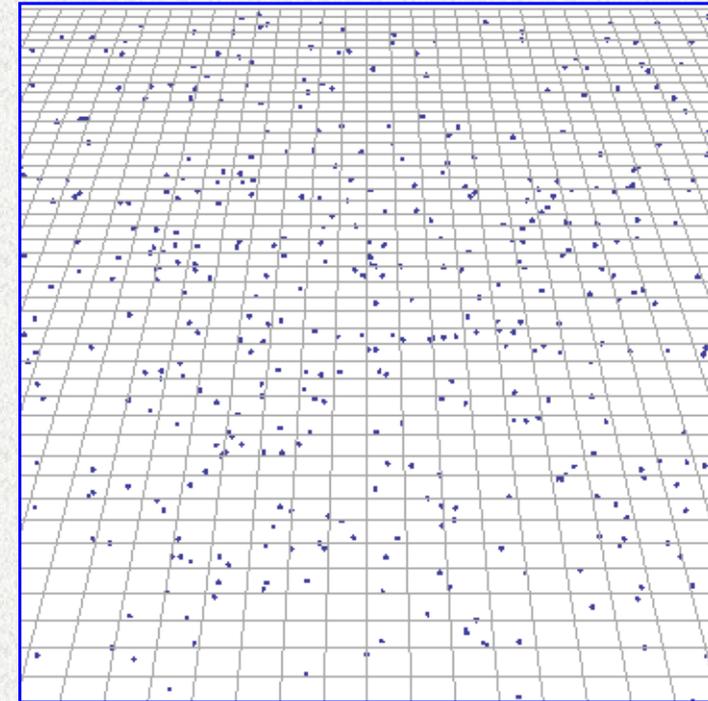
Expansão do Universo

- Lei de Hubble-Lemaître: $velocidade = H_0 \times distância$.
- Quanto tempo levou para uma galáxia estar a uma certa distância de nós?
- $Tempo = distância / velocidade = dist / (H_0 \times dist) = 1 / H_0$.
→ Independente da distância da galáxia!
- Extrapolando a expansão para o passado, há cerca de 14 bilhões de anos todo o Universo estava concentrado em um ponto.
→ Uma **singularidade**.

Big Bang

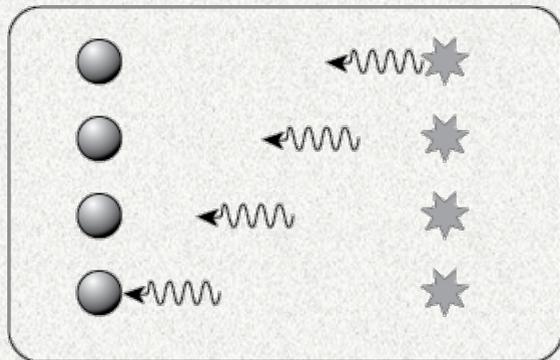
Big Bang, o Universo em expansão

- Existe um tempo no passado no qual todo o universo esteve em um mesmo ponto: o BIG BANG
- O espaço está expandindo e levando as galáxias.
- A expansão NÃO tem centro; NÃO foi uma explosão.
- 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.

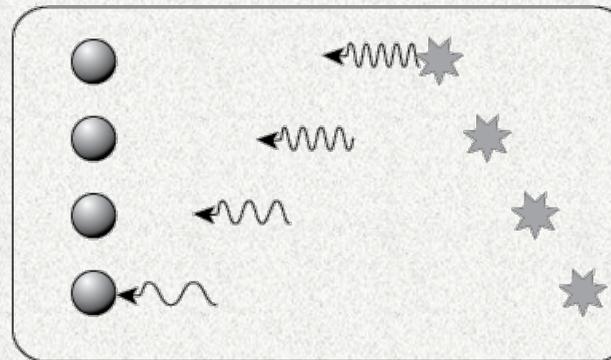


Por que a noite é escura?

- Se o universo é **eterno e infinito**, sempre haverá pelo menos uma estrela em qualquer direção observada.
- **Paradoxo de Olbers** (1826): o brilho do céu noturno deveria ser infinito, contudo a noite é escura.
- **Solução:** o Universo não é eterno, tem uma idade finita: $1/H_0$.
- Só podemos observar os astros de onde a luz teve tempo para chegar até nós.



universo estático

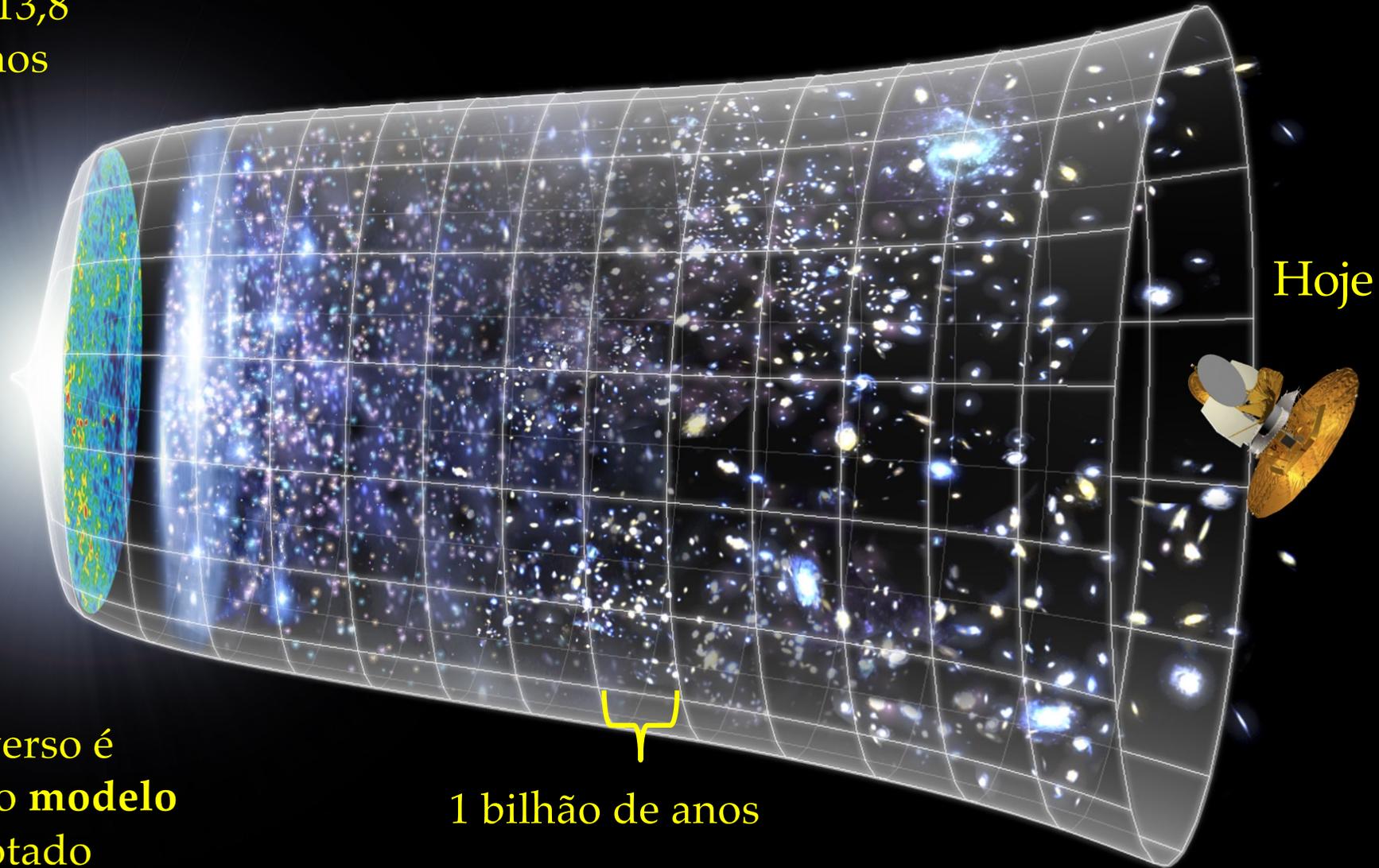


universo em expansão

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

História do Universo

Big Bang há 13,8
bilhões de anos



História do Universo

- Os modelos cosmológicos são definidos por constantes determinadas pelas observações: **parâmetros cosmológicos**.
- Constante de Hubble-Lemaître: H_0 .
 - Taxa de expansão do Universo
- Densidade de matéria do Universo (matéria escura e normal)
- Densidade de radiação (principalmente a radiação cósmica de fundo)
- Densidade de energia escura.

Parâmetros cosmológicos são determinados **observacionalmente**

Parâmetros Cosmológicos

- Em 1998, medidas com supernovas distantes chegaram à surpreendente conclusão que a principal componente do universo é a **energia escura**.
- A energia escura tem uma **pressão negativa** que age de forma oposta à gravitação → **acelera** a expansão do Universo.

Prêmio Nobel física 2011



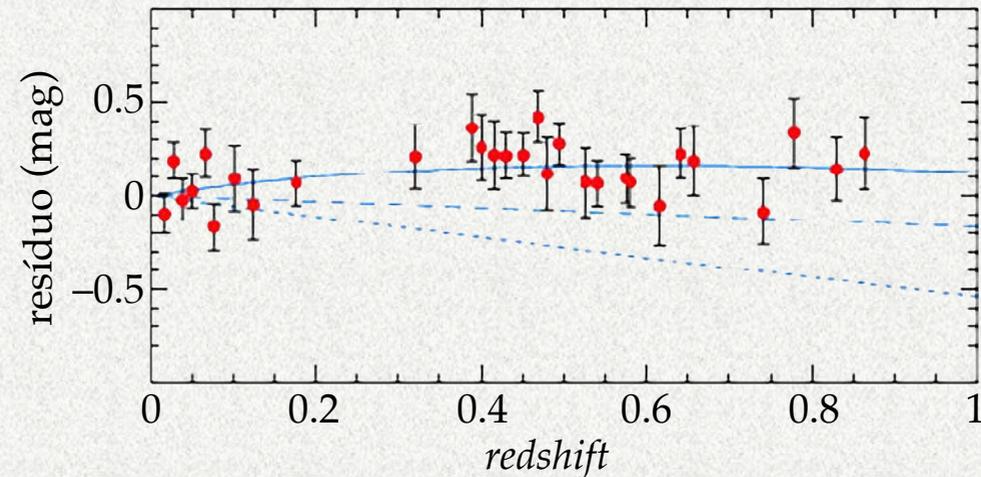
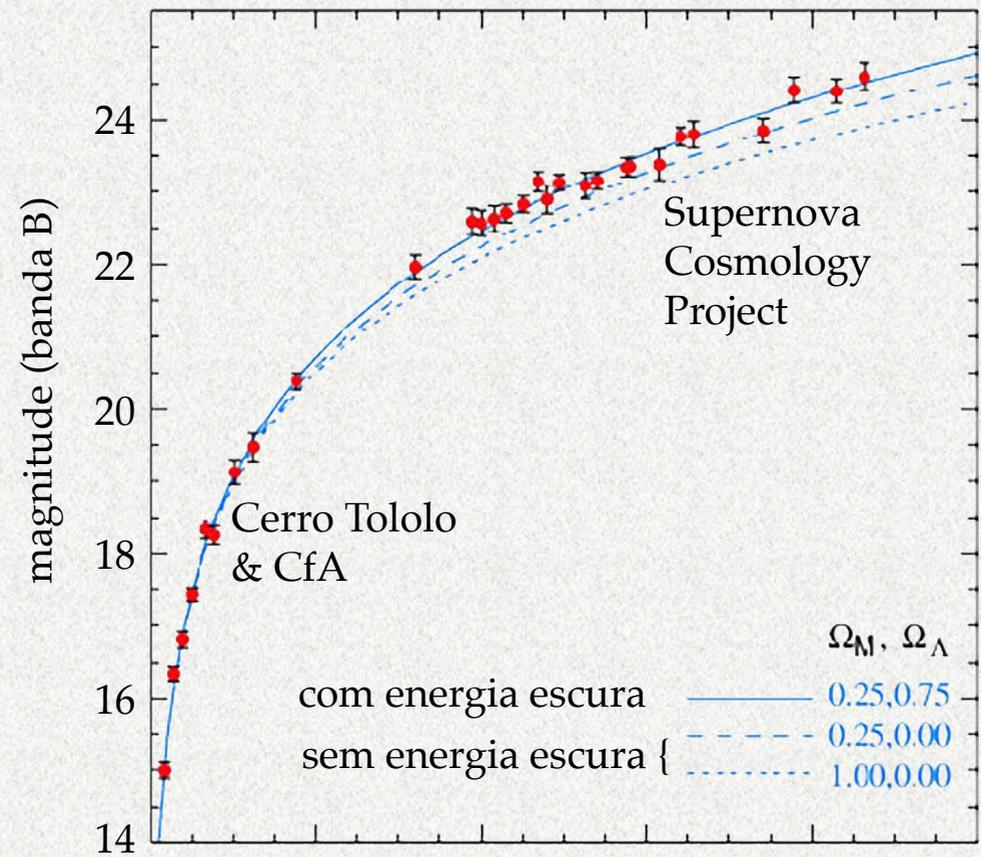
Saul Perlmutter



Brian Schmidt

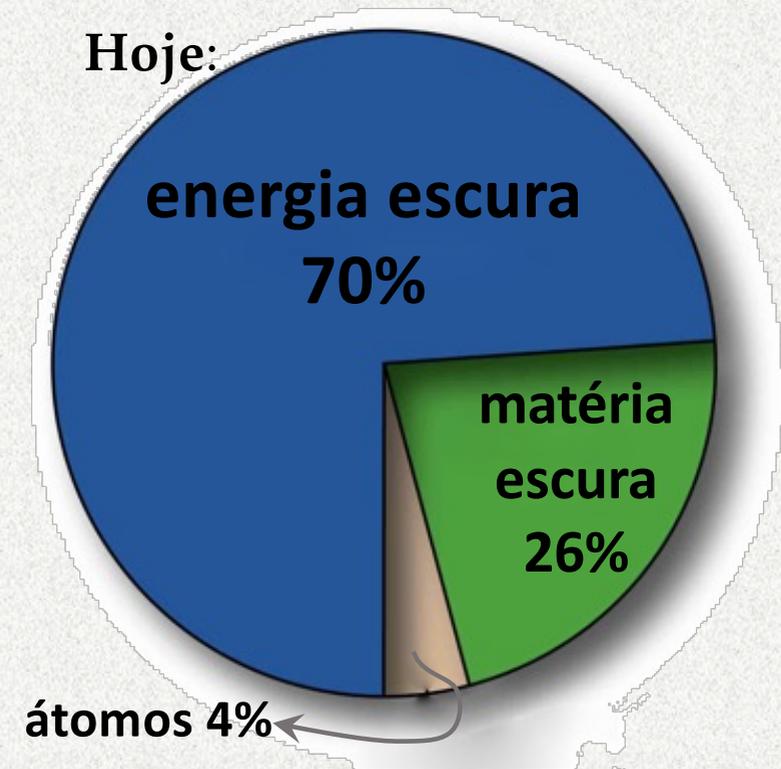


Adam Riess



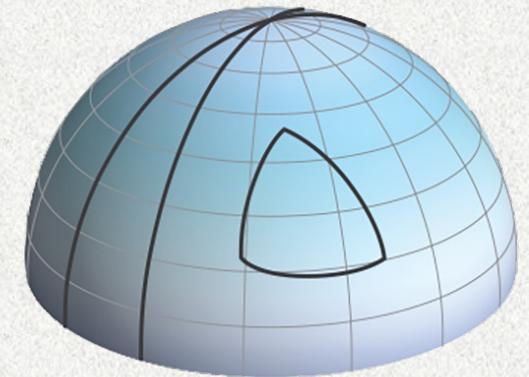
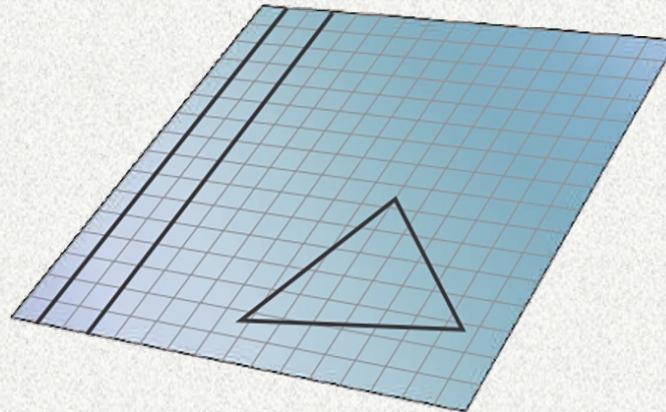
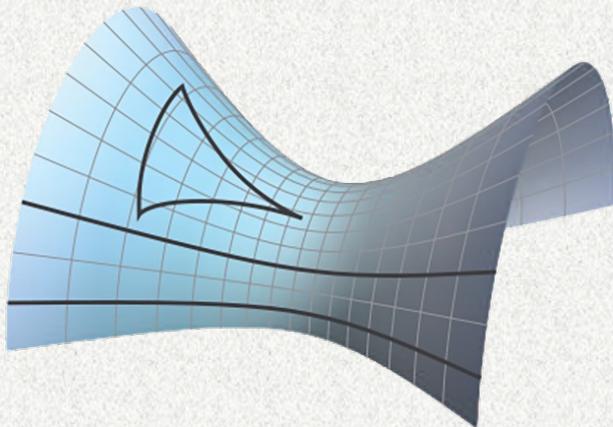
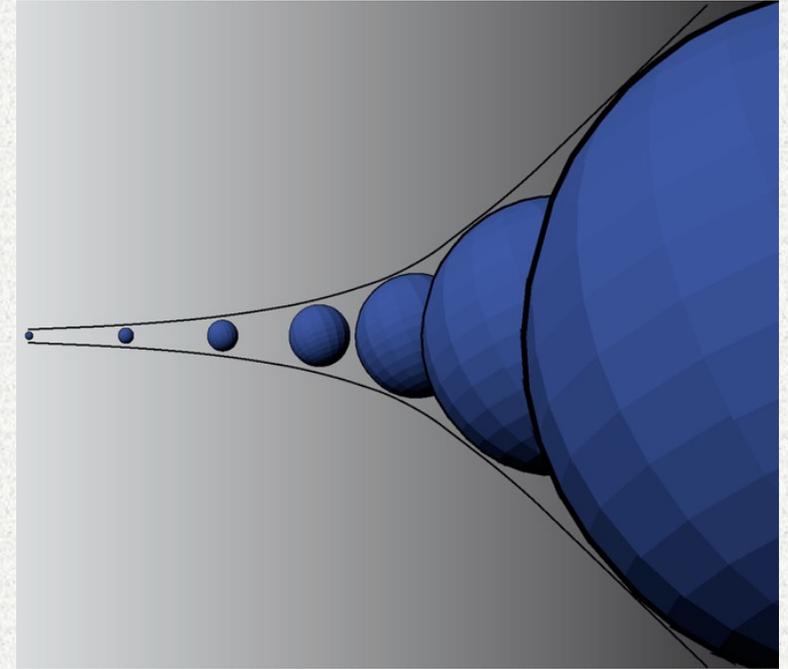
Parâmetros Cosmológico

- A história do Big Bang é determinada pelos chamados **parâmetros cosmológicos** que descrevem a quantidade de matéria e energia do Universo:
 - **Radiação:** fótons, neutrinos
 - **Matéria:**
“normal” (prótons e nêutron)
escura ou não-bariônica
 - **Energia escura** (seja lá o que for 😬)



Época da inflação cósmica

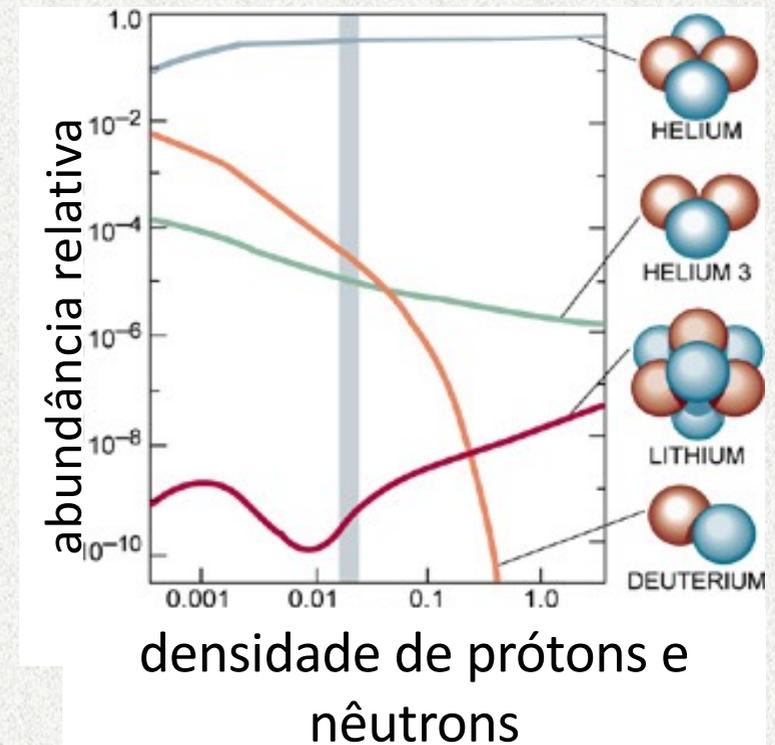
- O Universo primordial expande exponencialmente durante 10^{-32} segundos.
- O espaço-tempo deixa de ser caótico e a curvatura do universo se torna plana (ou praticamente plana).



Geometrias possíveis do Universo (representação em 2 dimensões)

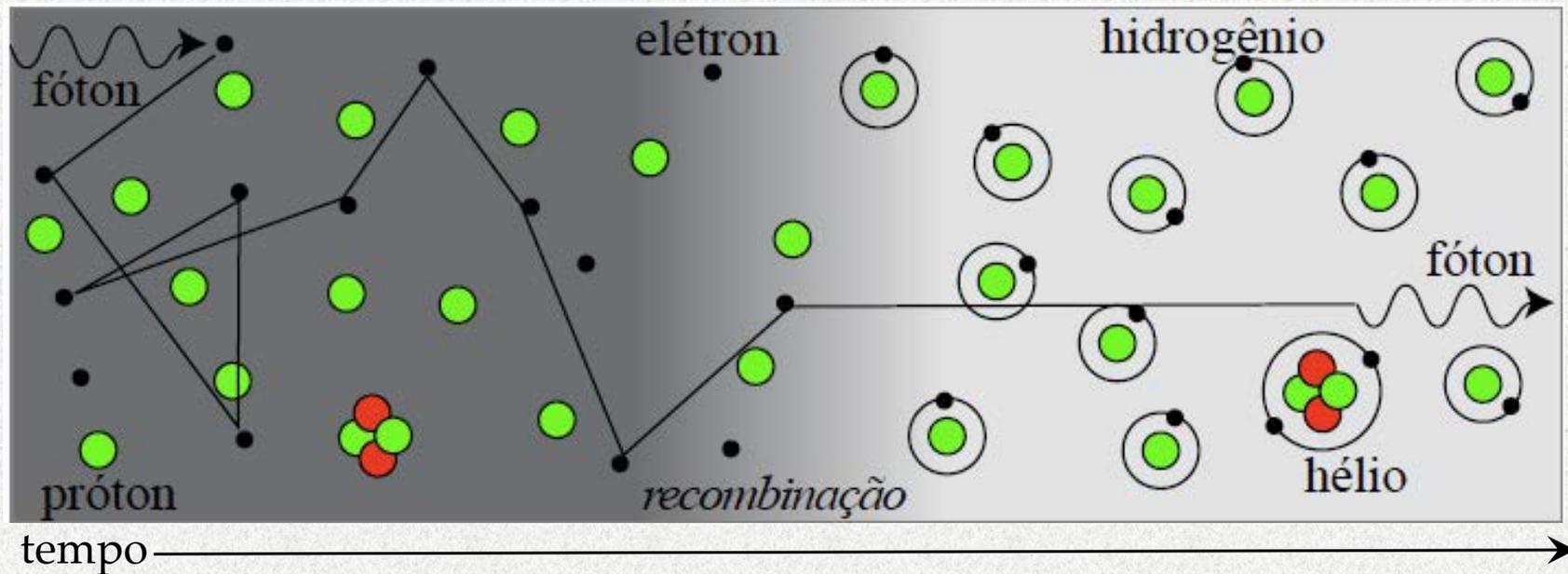
Nucleossíntese primordial

- Nos primeiros 5 minutos após o Big Bang são produzidos os elementos leve: **Deutério, Hélio e Lítio**.
- Cerca de 25% da massa dos átomos está na forma de Hélio.
- Não é possível produzir toda esta quantidade de Hélio através da nucleossíntese estelar.
- A abundância de elementos leves produzidos nos 5 primeiros minutos depende da densidade de prótons e nêutrons no Universo.
- A quantidade observada destes elementos é uma das maiores evidências da teoria do Big Bang.



Formação dos átomos neutros

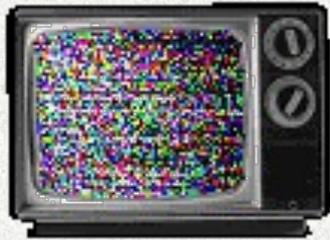
- Durante os primeiros 400 mil anos após o Big Bang, o Universo é tão quente que os átomos estão **ionizados**.



- O Universo era opaco e se torna transparente: **Recombinação**
- É produzida uma radiação isotrópica chamada **Radiação Cósmica de Fundo**, que observamos hoje em rádio e microondas

Radiação Cósmica de Fundo

- Hoje, a radiação cósmica de fundo tem uma temperatura de 2,725K. Quando foi produzida sua temperatura era de 3000K.
- Foi prevista nos anos 1950.
- Observada em 1964
 - Prêmio Nobel em 1978 para Arno A. Penzias e Robert W. Wilson.



~%1 do ruído vem
da Radiação
Cósmica de Fundo.



Radiação Cósmica de Fundo

- A radiação cósmica de fundo (RCF) é um “retrato” do Universo há 13,7 bilhão de anos atrás.
- A RCF mostra como o Universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas (tem as mesmas propriedades em todas as direções).
- Pequenas variações de temperatura observadas correspondem a variações de densidade de matéria quando o Universo tinha 400 mil anos.

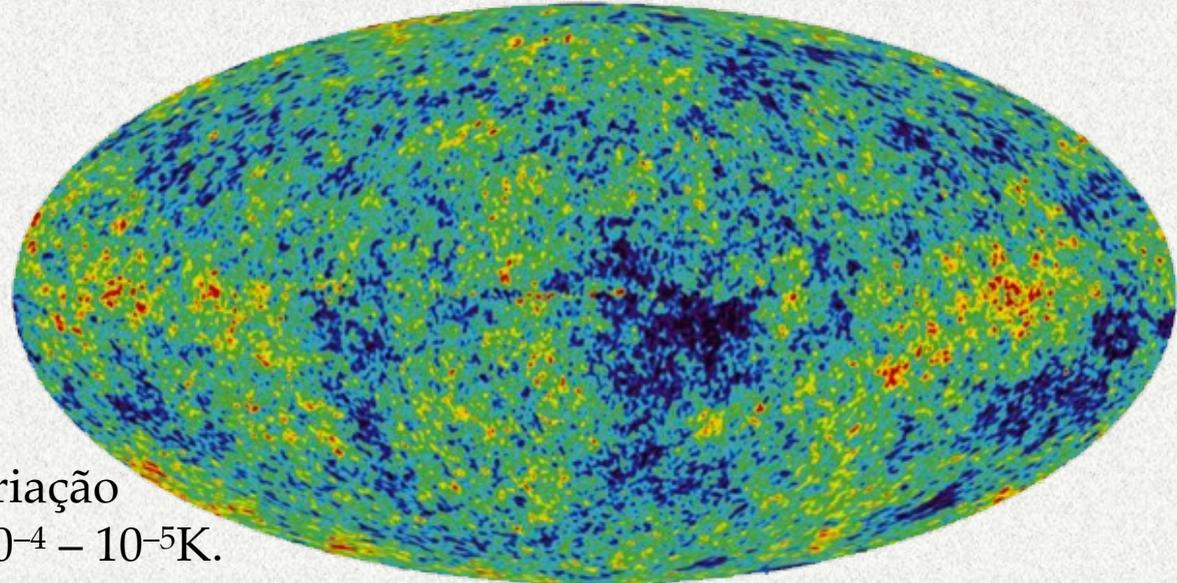


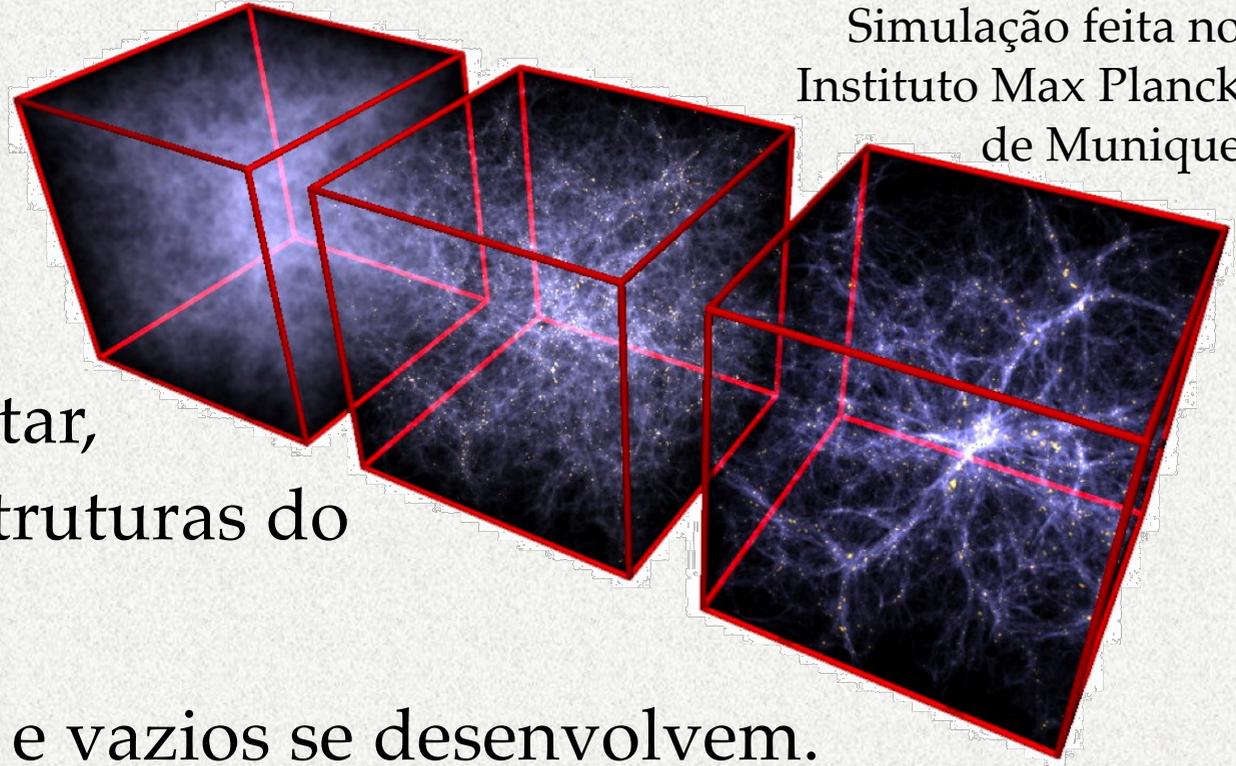
Imagem do satélite WMAP de todo céu. A variação de temperatura (cor azul e vermelha) é de $\sim 10^{-4} - 10^{-5} \text{K}$.

Idade das trevas

- Depois da recombinação não há nenhuma fonte de luz durante os próximos 250 milhões de anos.
 - Há apenas a Radiação Cósmica de Fundo se propagando livremente pelo Universo.
- A **Idade das Trevas** termina quando as primeiras fontes luminosas do Universo se formam: as **primeiras estrelas** e os **primeiros quasares**.
- A partir de então, durante os próximos 13 bilhões de anos as galáxias vão se formando e evoluindo.

Formação das grandes estruturas

Simulação feita no
Instituto Max Planck
de Munique



- A matéria tende a se juntar, formando as grandes estruturas do Universo.
- Uma rede de filamentos e vazios se desenvolvem.
- As galáxias vão se formando nos filamentos de matéria, a chamada “**Teia Cósmica**”.

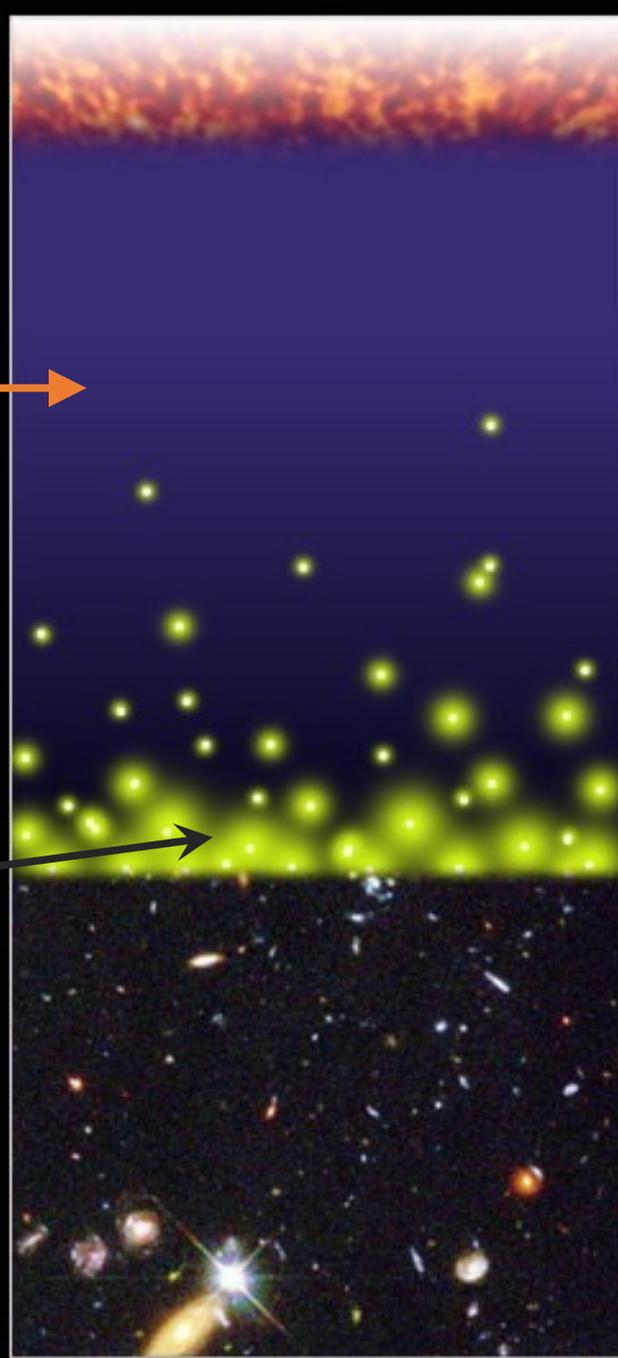
- Radiação cósmica de fundo se forma.

Telescópio espacial James Webb (JWST) está observando até estes objetos

- Quasares e galáxias conhecidos mais distantes.

Resumo

universo expande e esfria



Big Bang

Recombinação

400 mil de anos após o Big Bang

“Idade das trevas”

1^{as} estrelas e Quasares

250 milhões de anos

“Renascimento” cósmico

Fim da idade das trevas

universo reionizado

1 bilhão de anos

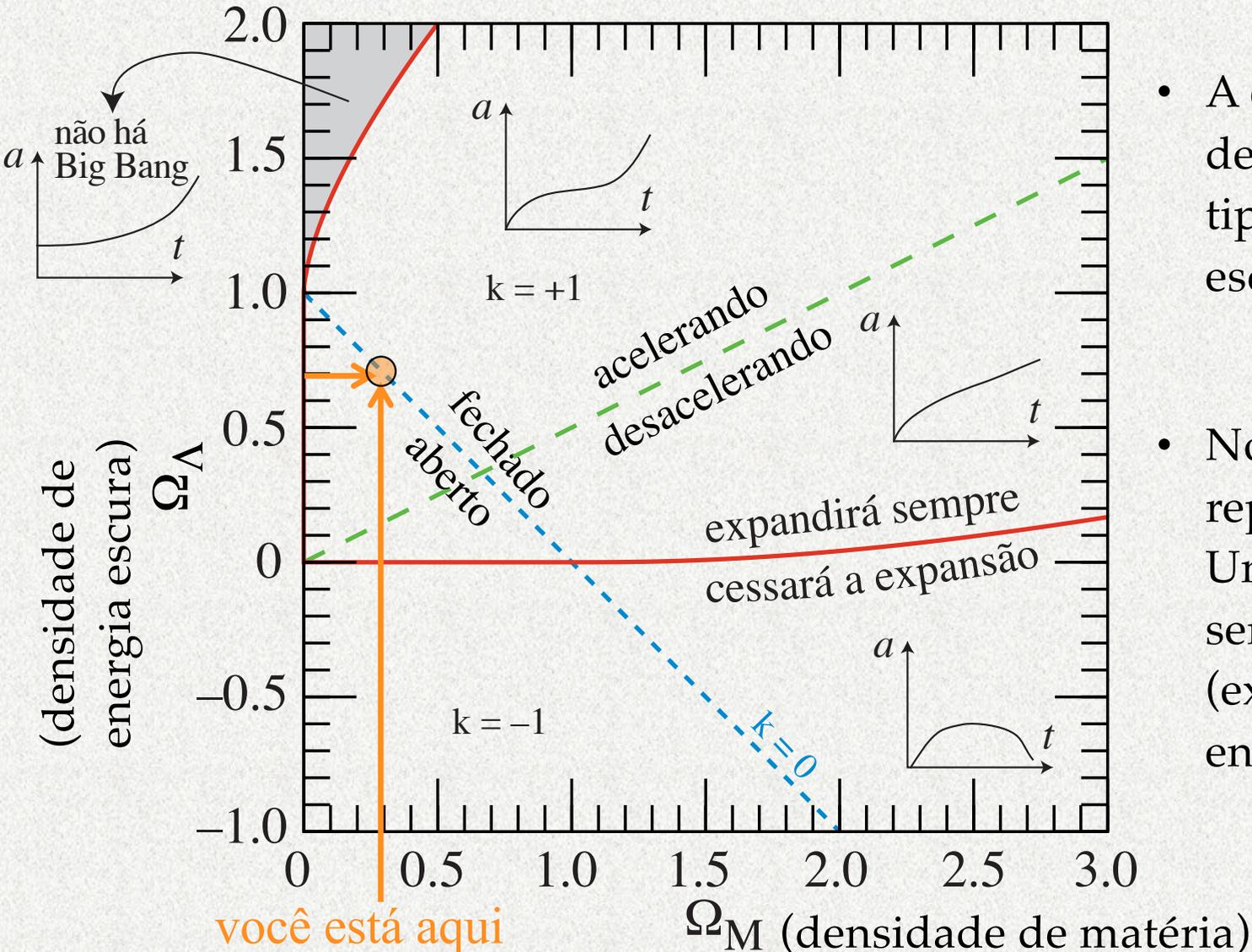
Galáxias evoluem

Sistema Solar se forma

9 bilhões de anos

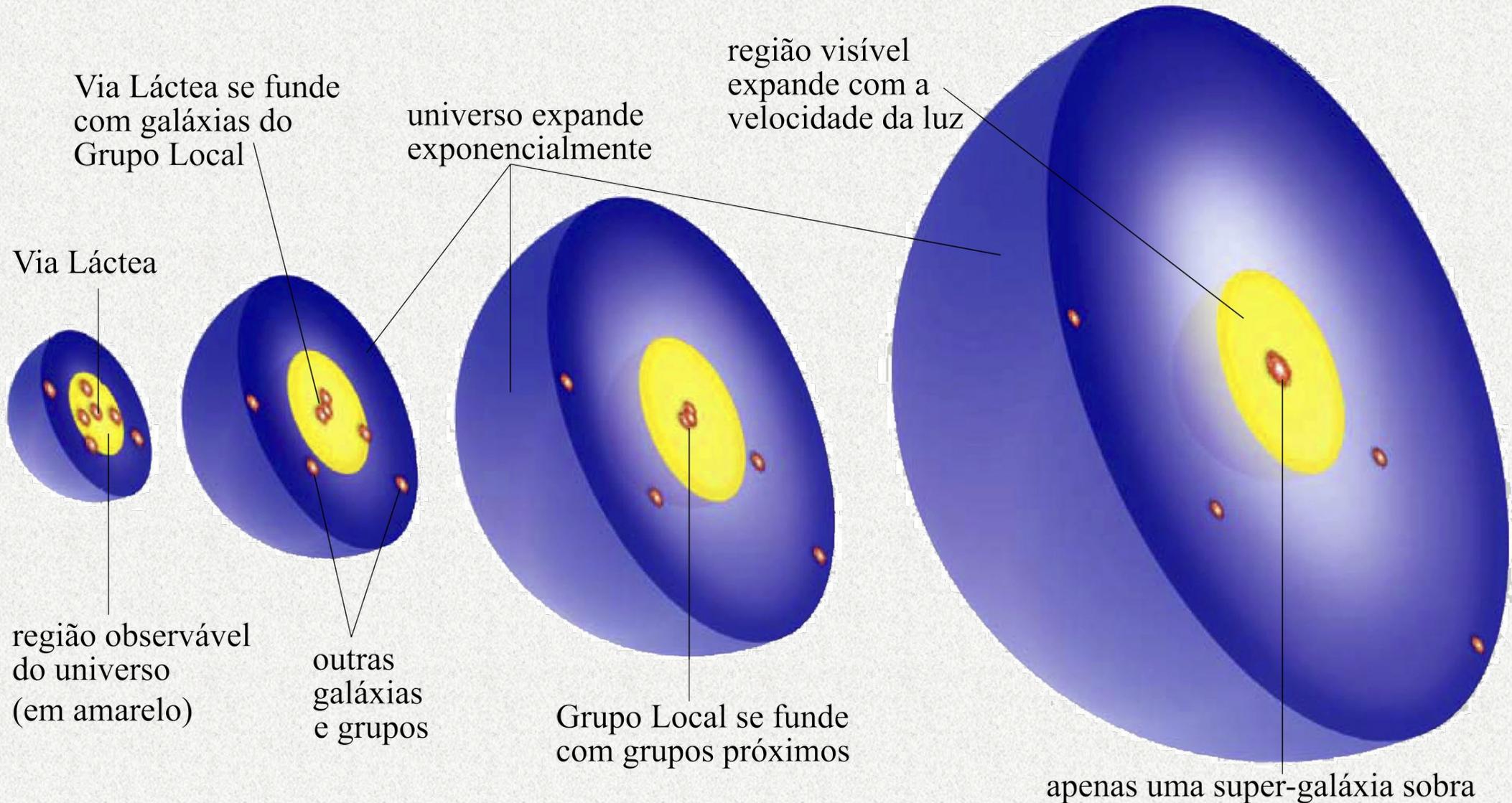
Nós, hoje 13,8 bilhões de anos

Evolução do Universo



- A evolução do Universo depende da quantidade (e tipo) de matéria e energia escura.
- No modelo que melhor representa as observações, o Universo expandirá para sempre, cada vez mais rápido (expansão acelerada devido à energia escura).

Futuro do Universo: trilhões de anos



Cosmologia

- A teoria que melhor explica nossas observações do Universo é a teoria do Big Bang, baseada na Física moderna.
- As maiores evidências para a teoria atual do Big Bang são:
 - Expansão do Universo.
 - Abundância do Hélio, Deutério e Lítio.
 - Temperatura e anisotropias da Radiação Cósmica de Fundo.
 - Aceleração da expansão do Universo.
- Contudo, ainda não podemos explicar:
 - O que ocorre no universo durante o Big Bang.
 - A natureza da Matéria Escura e (principalmente) da Energia Escura.
 - JWST: muitas galáxias evoluídas no Universo jovem.