

Cosmologia 2

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

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

História do universo

Big Bang a 13,8 bilhões de anos: início da grande expansão



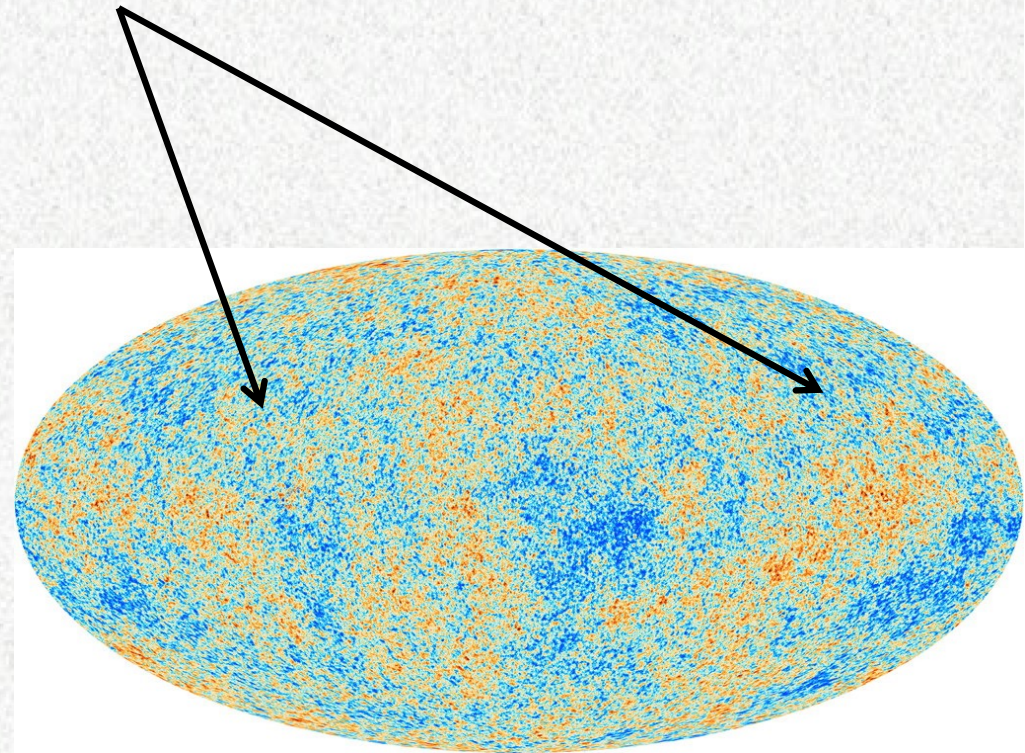
- O momento do Big Bang ainda não pode ser descrito pelas leis da física que conhecemos → densidade e temperatura tendem a infinitos: singularidade.
- Só podemos começar a descrever a história cósmica após um intervalo de tempo chamado tempo de Planck: 10^{-43} segundos e o Universo observável tem $\sim 3 \times 10^{26}$ cm.

Logo após a época de Planck

- Problemas com o modelo cosmológico clássico (pré 1980):
 - Observamos que a geometria do Universo é plana (ou praticamente plana). A teoria original prevê uma curvatura para o Universo.
 - O Universo é igual em todas as direções. Contudo, direções opostas, por exemplo, não tiveram tempo de interagir. Como pode ser tão igual?

A solução destes problemas foi a chamada **teoria da inflação**, proposta por Guth (1981) e Linde (1982).

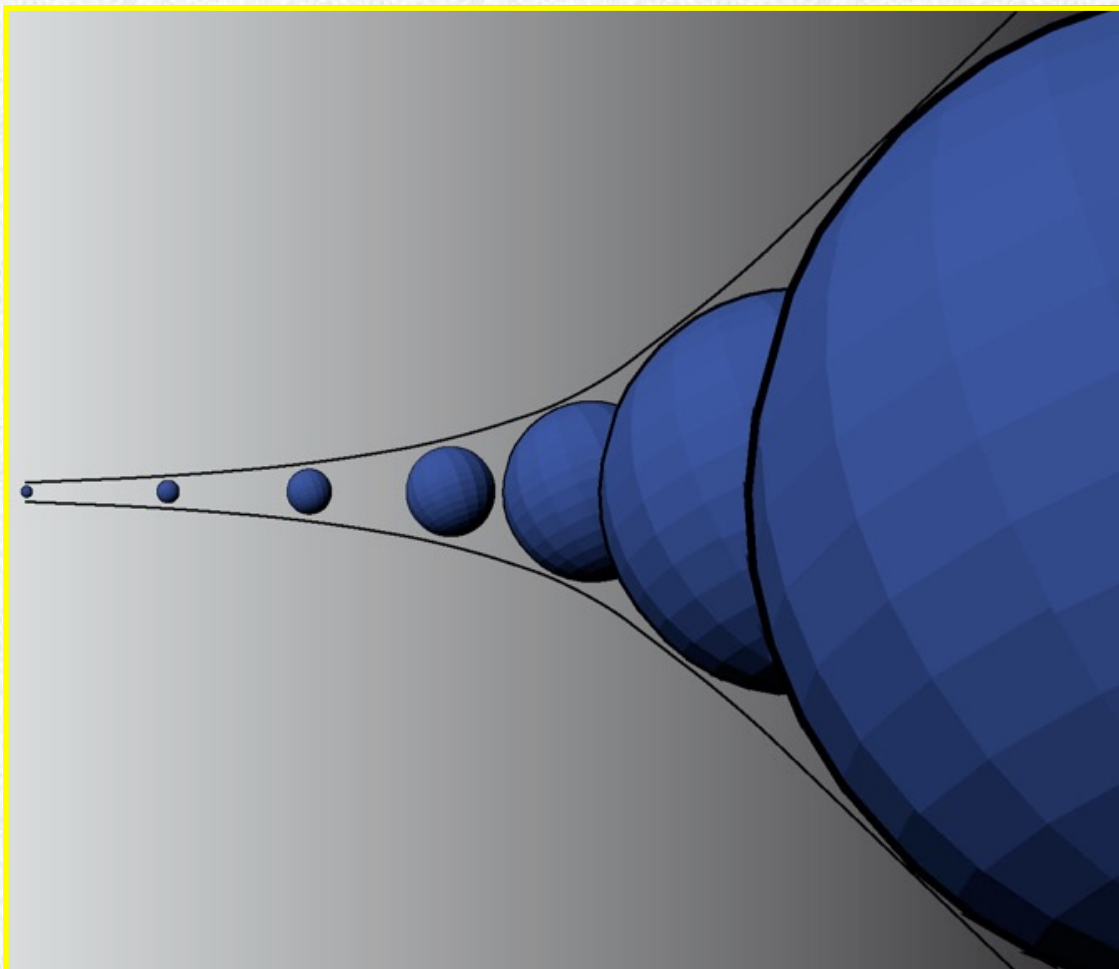
A **inflação do Universo** deve ocorrer entre $\sim 10^{-34}$ até 10^{-32} s.



Inflação

A temperatura cai abaixo de 10^{28} K e as forças básicas da natureza se reorganizam: o Universo, entra em um estado instável, de alta densidade de energia, e passa por uma transição de fase.

O espaço-tempo adquiriu uma pressão enorme, que temporariamente foi maior que a gravidade e acelerou a expansão do Universo a uma taxa altíssima.

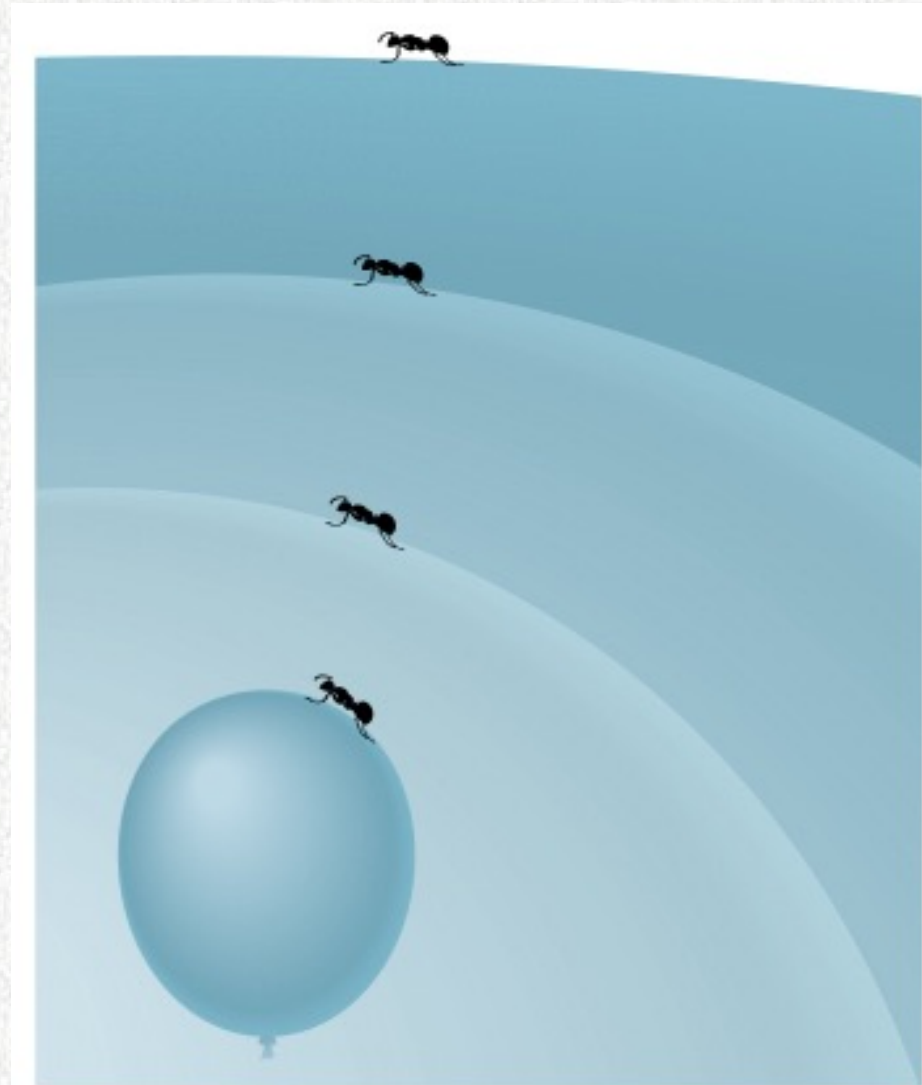


- 0,0000000000000000000000000000000000001 seg
(tem 33 zeros depois da vírgula)
- Universo ainda é MUITO quente e denso, mas o espaço-tempo se torna liso.

Inflação

Problemas com o modelo cosmológico clássico (pré 1980):

- **Universo plano:**
 - Hoje, observamos que o Universo é plano (ou praticamente plano).
 - Na teoria clássica, se o Universo não fosse plano ele teria evoluído para uma geometria aberta ou fechada.
 - O Universo expande tanto que, na região onde vivemos, ele é efetivamente plano.
 - Semelhante a descrever a curvatura da Terra dentro da sala de aula.

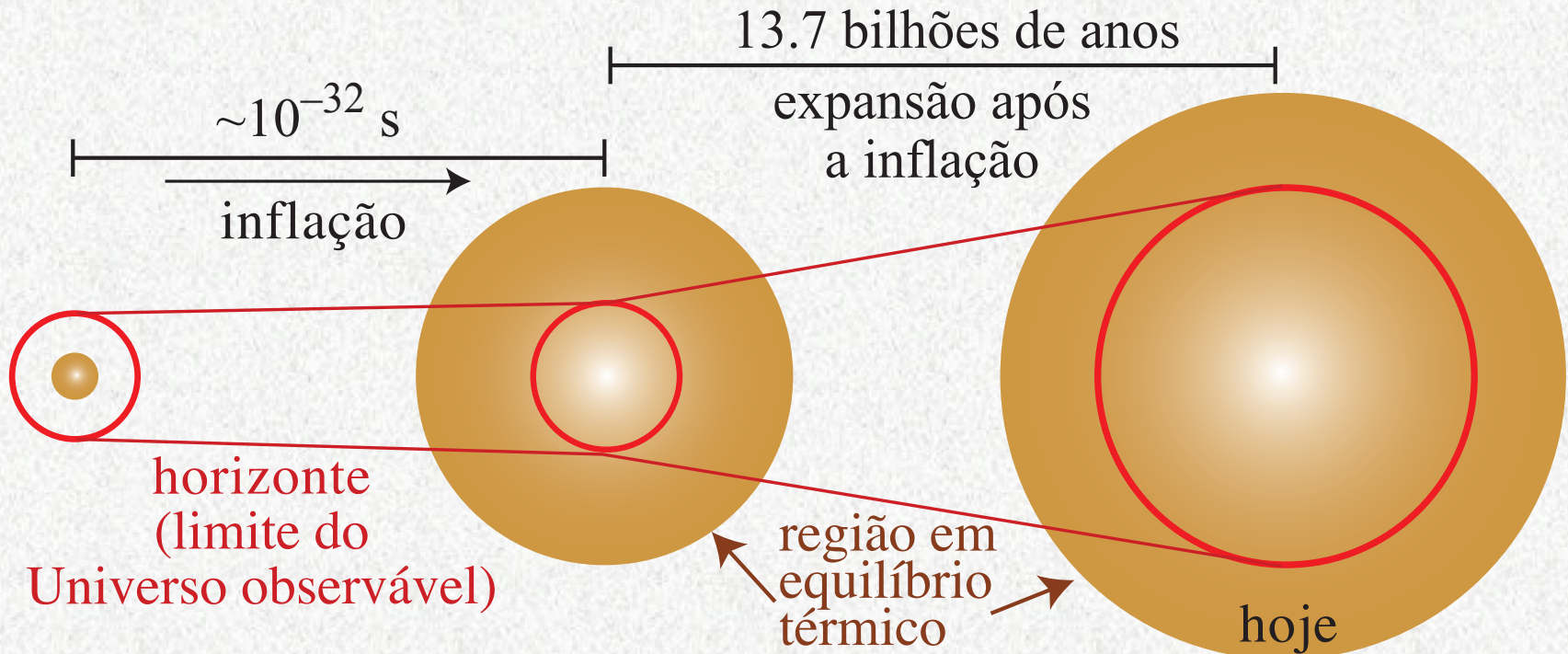


Inflação

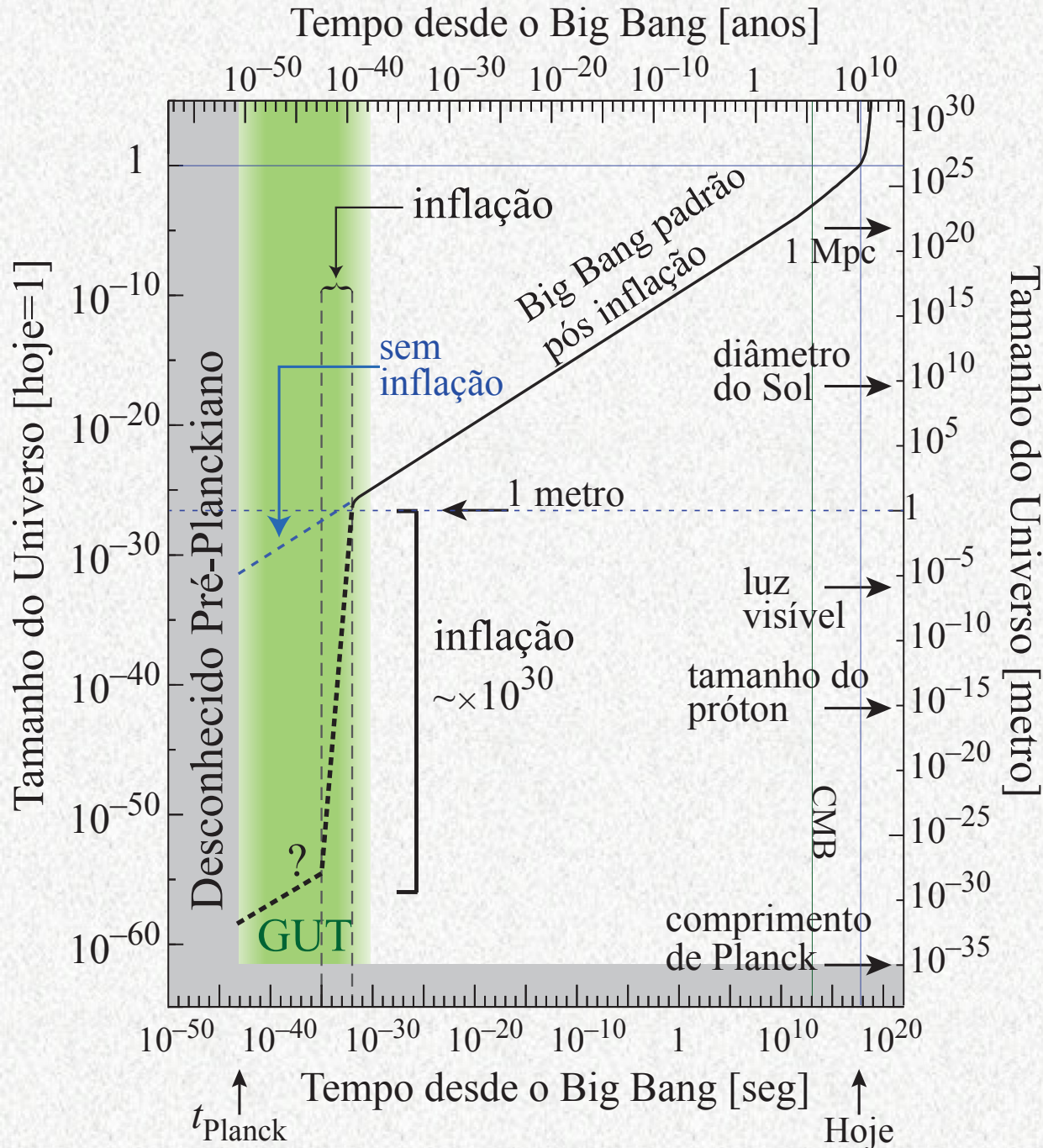
Problemas com o modelo cosmológico clássico (pré-1980):

- Horizonte

- 2 pontos separados por mais de $\sim 2^\circ$ não estariam em contato causal. Como o Universo pode ser tão uniforme em toda esfera celeste?



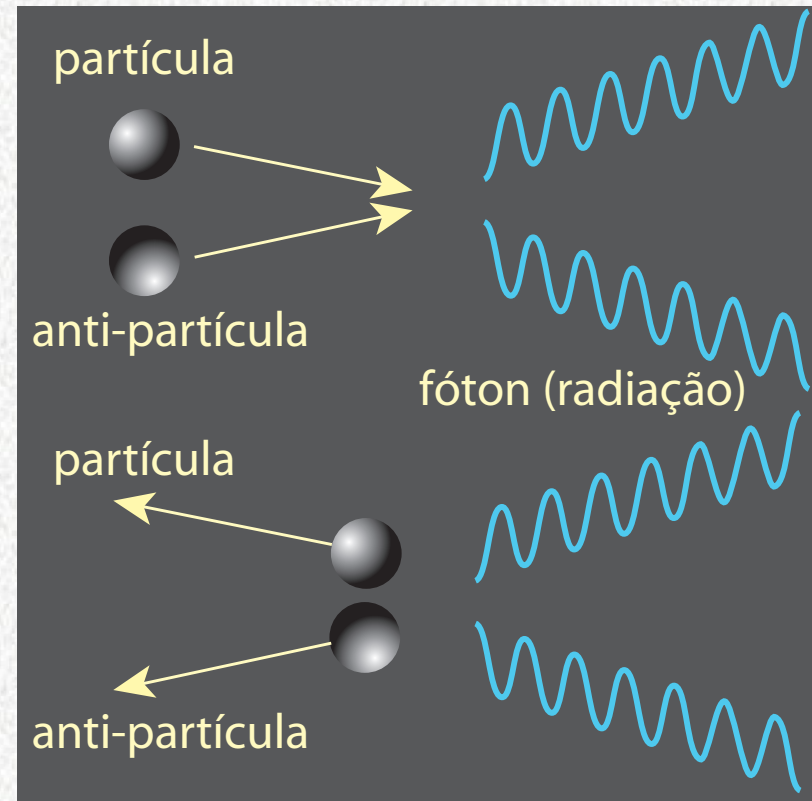
Fim da inflação



- Eventualmente, termina a transição de fase do Universo e a inflação para.
- O episódio inteiro durou somente $\sim 10^{-32}$ s, mas durante este tempo o Universo aumentou em tamanho por um fator de $\sim 10^{30}$.
- O Universo retomou sua expansão relativamente lenta, tendo seu movimento desacelerado pela gravidade.
- A inflação propõe que as galáxias teriam sido formadas a partir do que restou das flutuações do espaço-tempo, após a inflação.

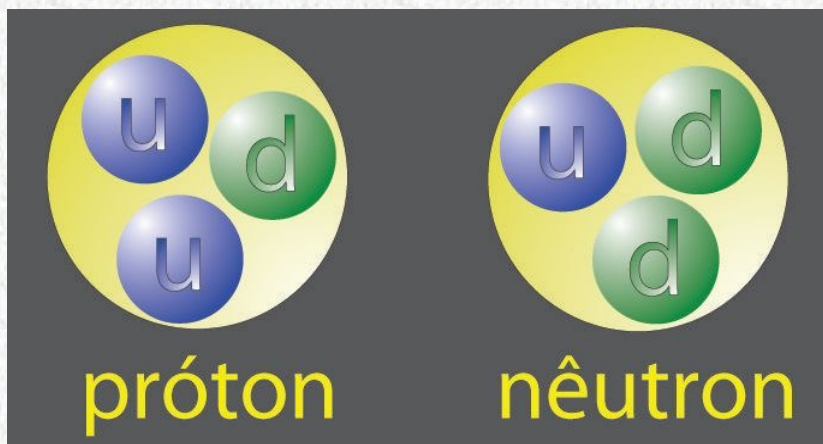
Aniquilação da anti-matéria

- Após a fase de inflação, o Universo continuou a expandir e a resfriar, mas em ritmo mais lento.
- Quando o Universo era muito quente e denso, os fótons podiam produzir um par de partículas de matéria e antimatéria que se aniquilavam e eram produzidos continuamente e tudo estava em equilíbrio.
- Sopa de partículas e antipartículas elementares.
- Quando o universo esfria o equilíbrio se perde e ocorre uma assimetria cujo resultado é que a antimatéria é virtualmente erradicada.
- De cada um bilhão de partículas, uma sobrevive.
 - 0,000000000001 seg (tem 9 zeros depois da vírgula)
 - Universo ainda é MUITO quente e denso



Bariogênese: formação dos bárions

- Quarks se juntam e formam os nêutrons e prótons



Hádrons: partículas compostas de quarks.

Bárions: partículas compostas de 3 quarks

Mésons: partículas compostas de 2 quarks.

- 0,00001 seg
(tem 4 zeros depois da vírgula)
- Universo ainda é MUITO quente e denso

Quarks

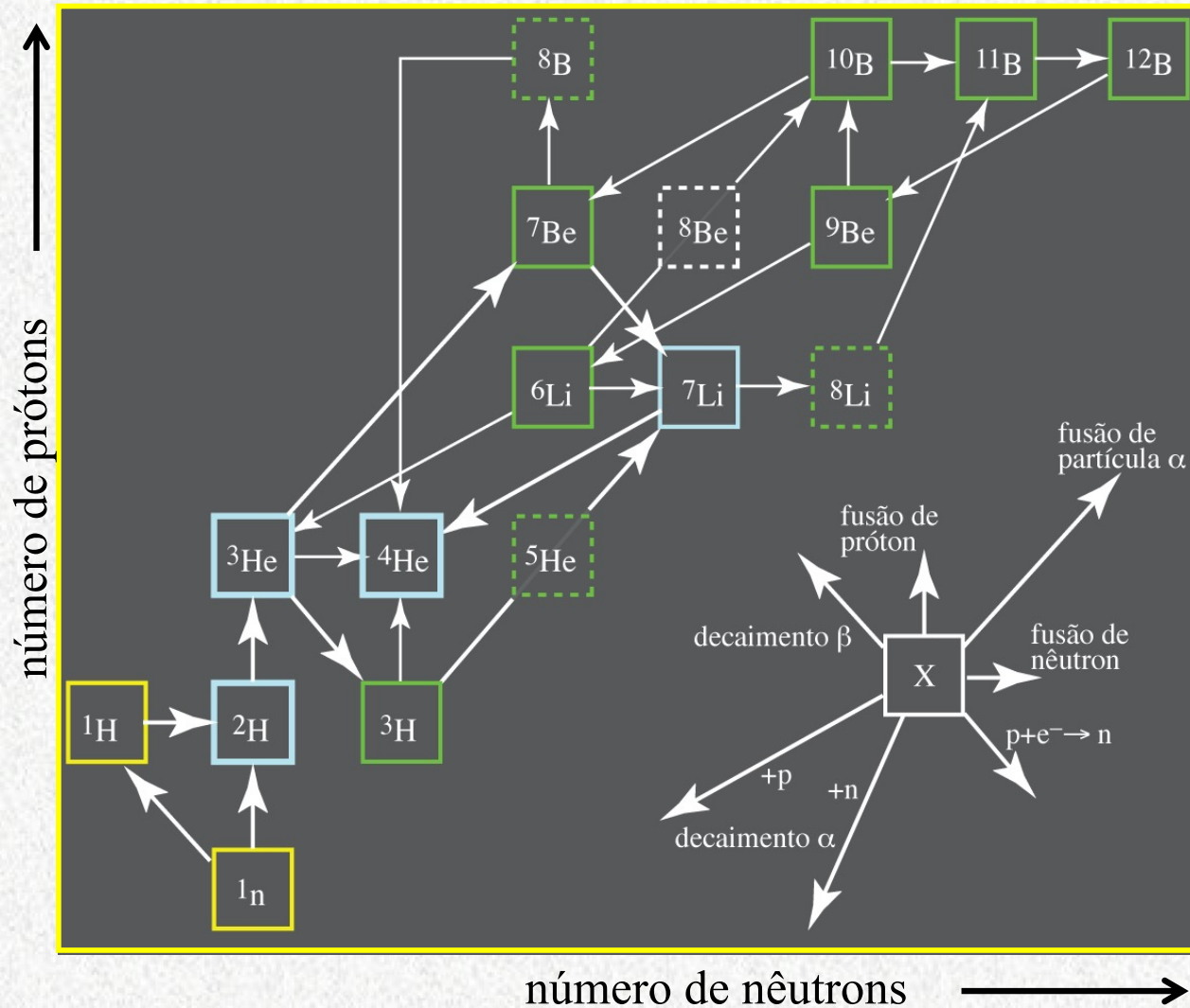
u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
e electron	μ muon	τ tau

Léptons

Exemplos de Lépton: o elétron e o neutrino

Nucleossíntese primordial

- Nucleossíntese significa produção de núcleos atômicos a partir da fusão termonuclear de núcleos mais leves.
- Formam-se os elementos leves através de reações nucleares: hélio, deutério, lítio, berílio e boro.



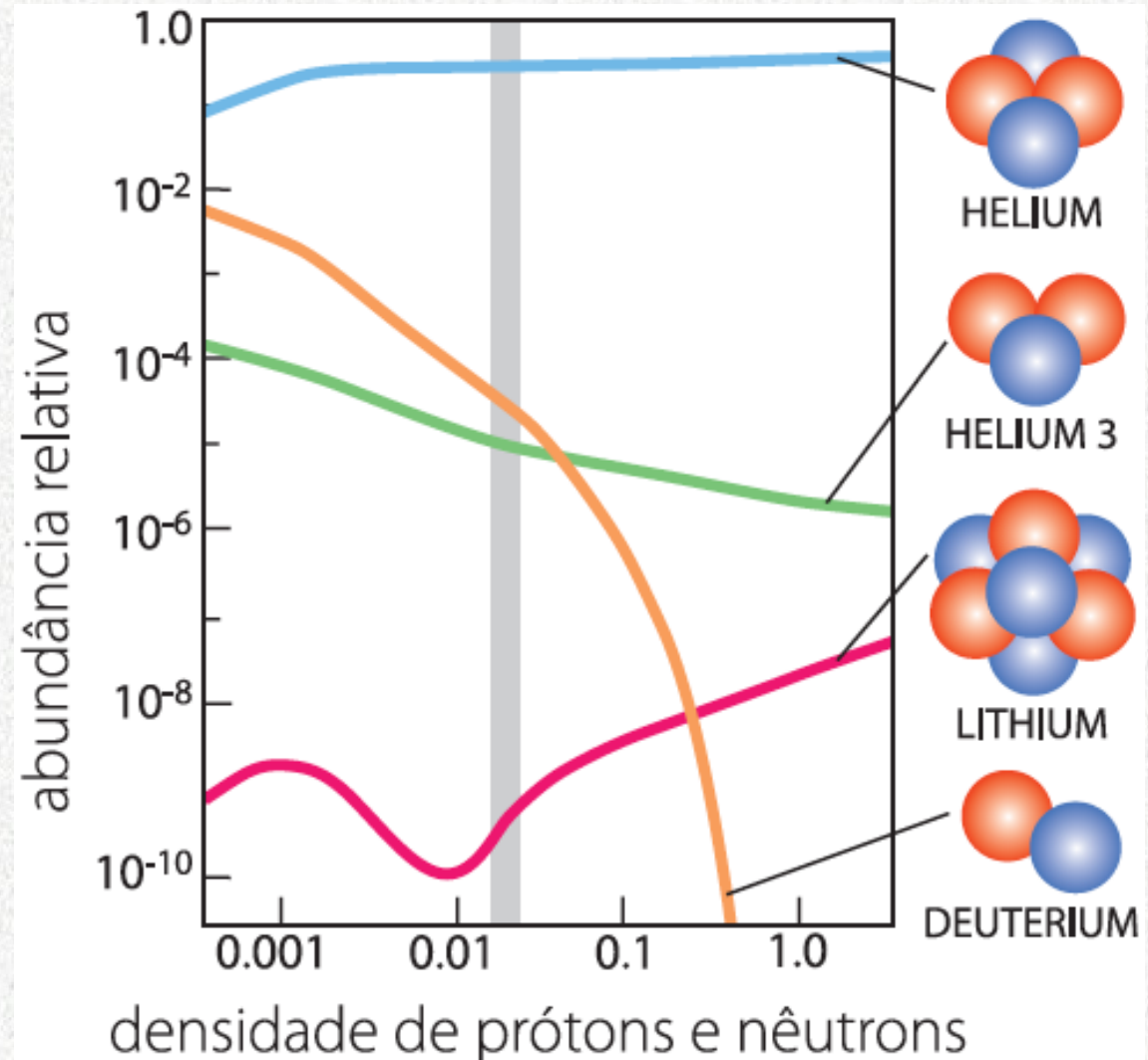
- Ocorre entre 1 segundo e 5 minutos
- Termina quando $T \sim 10$ bilhões de graus, densidade \sim água.

Nucleossíntese primordial

Previsão teórica
X
Observação

Medidas independentes da abundância de ^4He , Deutério, ^3He , e Lítio concordam entre si (ou quase...)

Apenas a nucleossíntese primordial pode produzir ~24% em massa (ou ~10% em átomos) de He.



Toda a produção ^4He em estrelas, durante toda a existência do Universo não produz a quantidade observada.

Formação dos átomos neutros

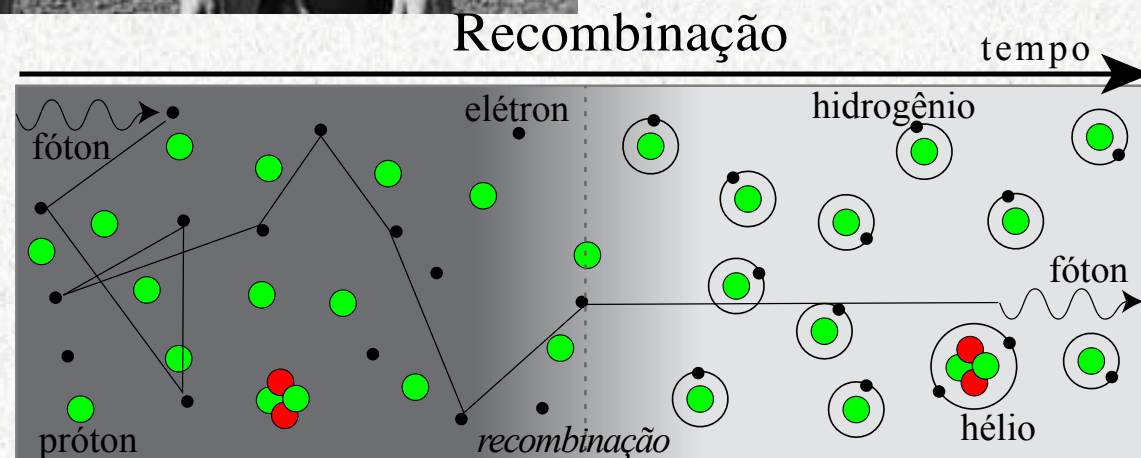
- Enquanto os átomos estão ionizados, o universo é opaco à radiação.
- Quando o universo se esfria, ele se torna transparente.
- Origem da **radiação cósmica de fundo**, hoje, com 2,725K.



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

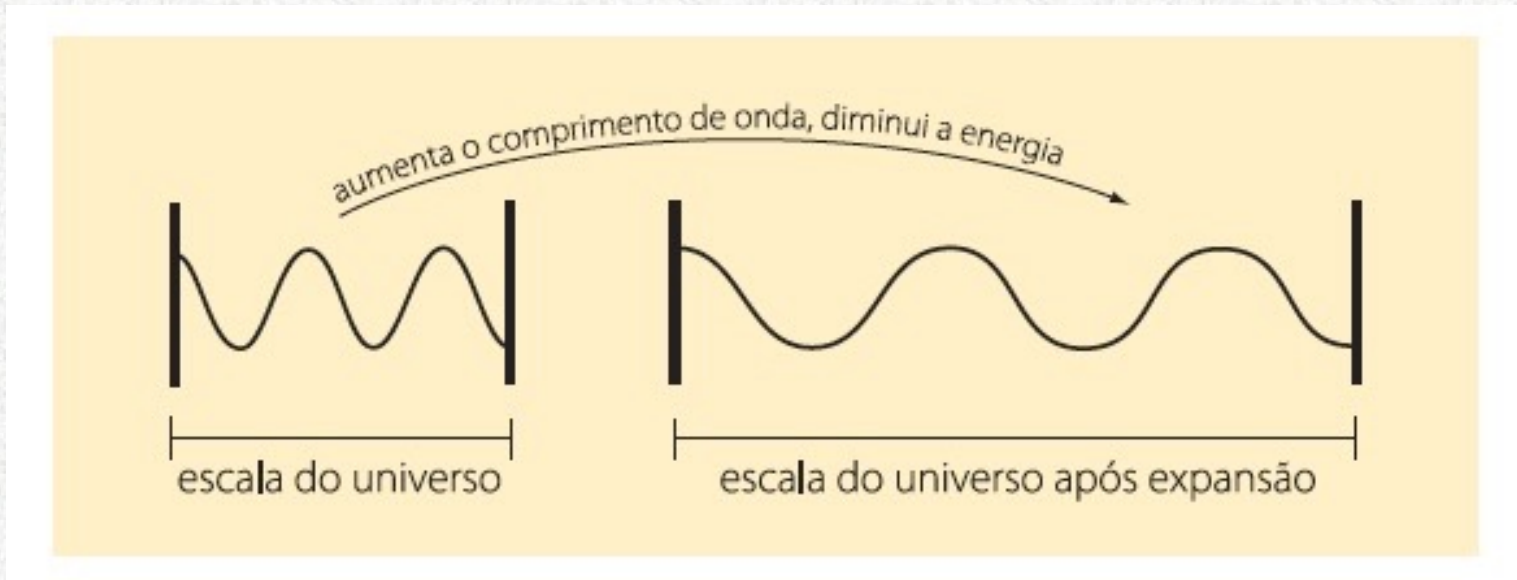
- Prevista desde os anos 1950;
- Observada em 1964:
 - Prêmio Nobel em 1978 para Arno A. Penzias e Robert W. Wilson.

- 400.000 anos
- $T \sim 3000$ graus, densidade ~ 10.000 átomos/cm³



Redshift Cosmológico

- O universo se torna transparente
- Origem da **radiação cósmica de fundo**, hoje, com 2,725K
- Efeito da expansão do universo na radiação cósmica de fundo:



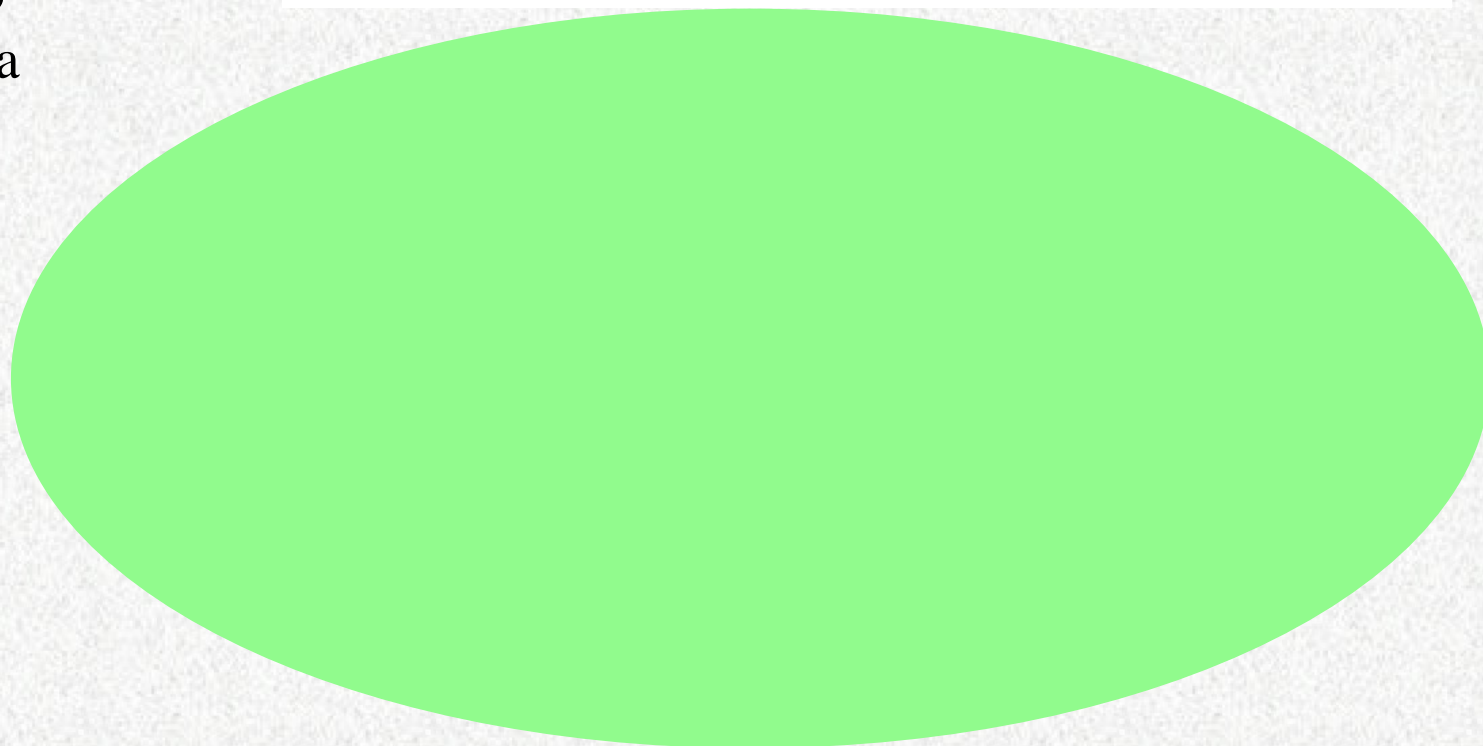
- O comprimento de onda da radiação eletromagnética aumenta proporcionalmente à expansão do Universo.
- Este fenômeno dá origem ao desvio para o vermelho cosmológico. É semelhante, mas não é o efeito Doppler: *redshift* cosmológico.

Formação dos átomos neutros

- O universo se torna transparente
- Origem da **radiação cósmica de fundo**, hoje, com observado 2,725 K, como previsto pela teoria do Big Bang.

Mapa da temperatura da Radiação Cósmica de Fundo:
é realmente muito homogêneo!

- Radiação de corpo negro mais perfeita da natureza.

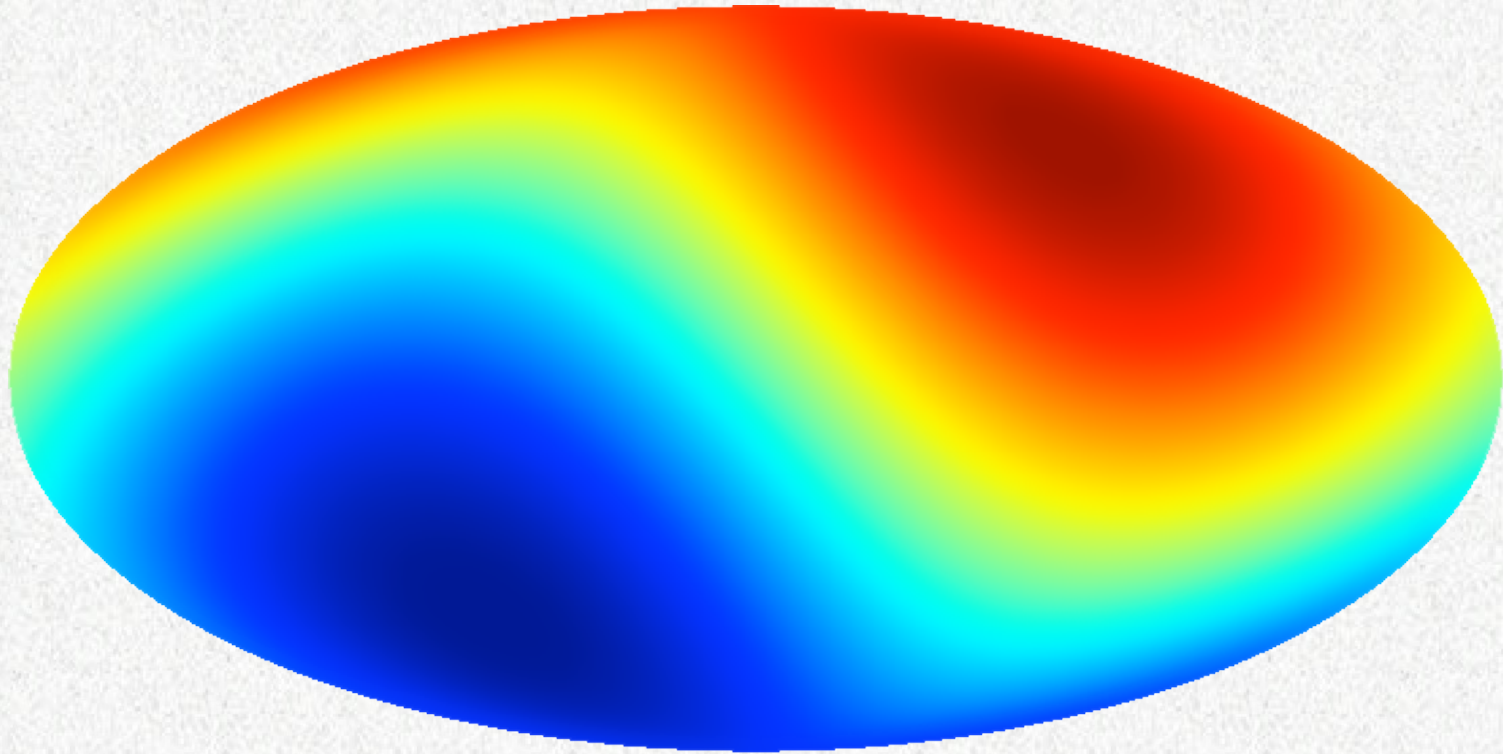



- 400.000 anos

2.72 K  2.73 K

- $T \sim 3000$ graus, densidade ~ 10.000 átomos/cm³

Dipolo da Radiação C3smica de Fundo

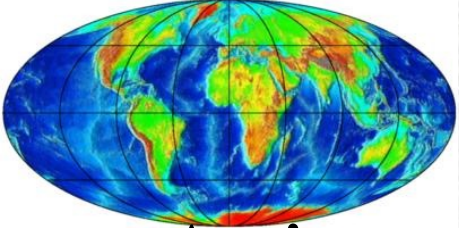


-3.35 mK  +3.35 mK

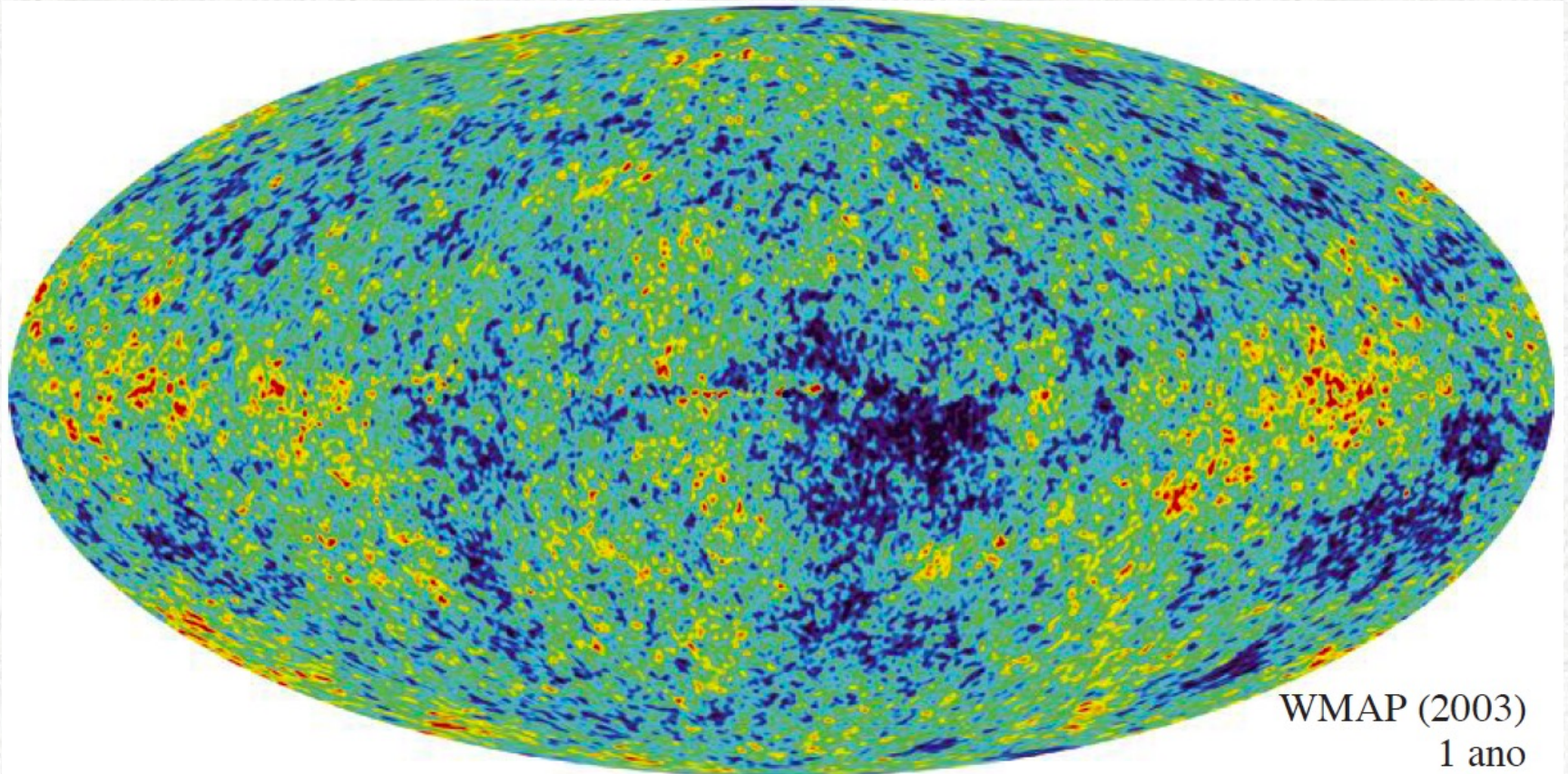
Mapa de temperatura, subtraindo a temperatura m3dia de 2,7 K. Dados: Sat3elite COBE

Origem do dipolo **cinemático**: Movimento do observador em rela33o 3 a Radia33o C3smica de Fundo ($\Delta T/T = 10^{-3}$).

- $\Delta T = 0,00337$ K, o que corresponde a uma velocidade de ~ 370 km/s.
- Esta velocidade 3 a composi33o (soma vetorial):
 - velocidade do Sol na Gal3xia
 - + velocidade da Gal3xia no Grupo Local
 - + velocidade do Grupo Local no Super-aglomerado Local.



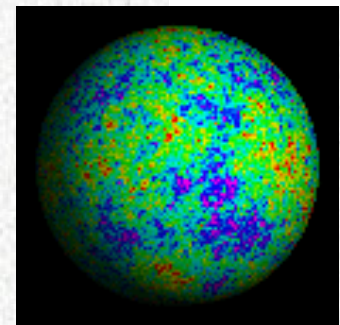
Anisotropia da Radiação C3smica de Fundo



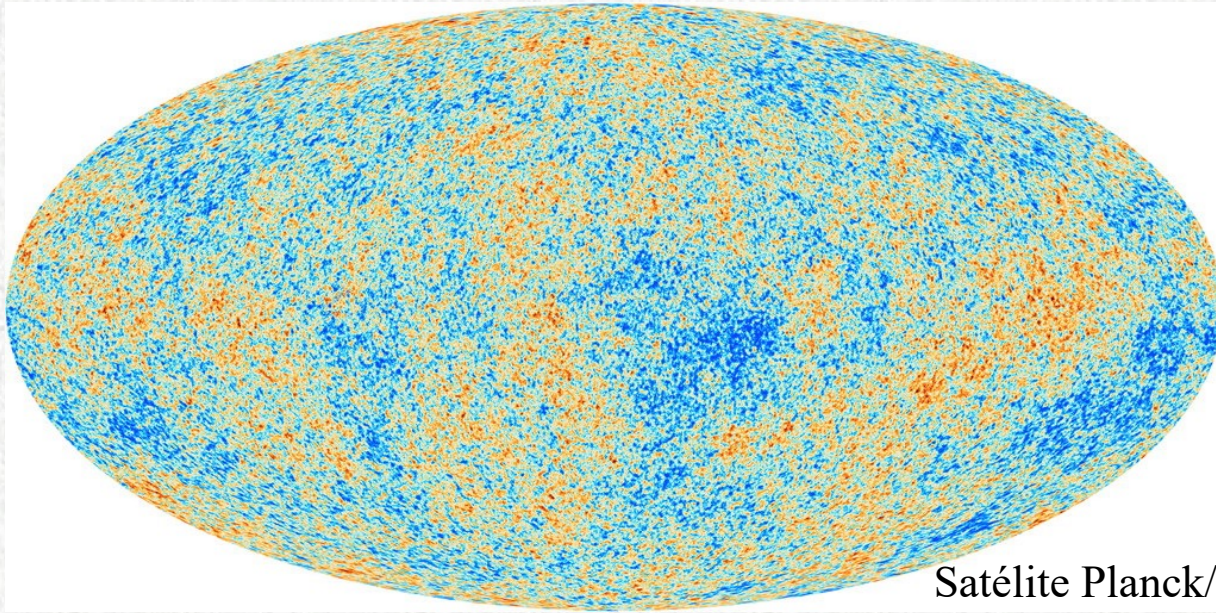
Mapa da varia33o de temperatura da radia33o c3smica de fundo, subtraindo a componente de dipolo cinem3tico.

$$\Delta T/T \sim 10^{-5} \approx \Delta \rho/\rho$$

Flutua33es de
densidade



Anisotropia da Radiação C3smica de Fundo



Sat3elite Planck/ESA (2013)

A RCF 3 uma impress3o digital do Universo h3 13,7 bilh3es de anos, quando o Universo tinha apenas 400 mil anos. As flutua3es observadas mostram regi3es mais ou menos densas que a m3dia. S3o muito pequenas da ordem de uma parte em cem mil.

Exemplo: uma bola perfeitamente lisa com 1 metro de di3metro. Se imaginarmos imperfei3es na mesma escala que a RCF, na superf3cie teremos eleva3es ou depress3es com cerca de 0,01 mil3metro.

$$\Delta T/T \sim 10^{-5} \approx \Delta \rho/\rho$$

Flutua3es de
densidade

Idade das trevas

- Passada a época da Recombinação, o Universo entrou em uma fase em que não havia qualquer fonte de luz, a chamada **Idade das Trevas**.

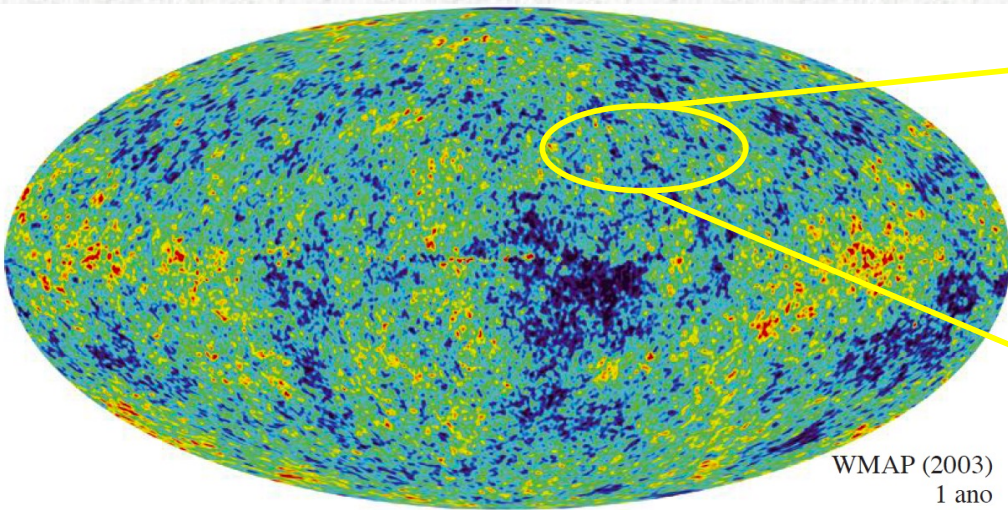
- Não há nenhuma fonte de luz (não há estrelas).
- Há apenas a **radiação cósmica de fundo, no infravermelho**



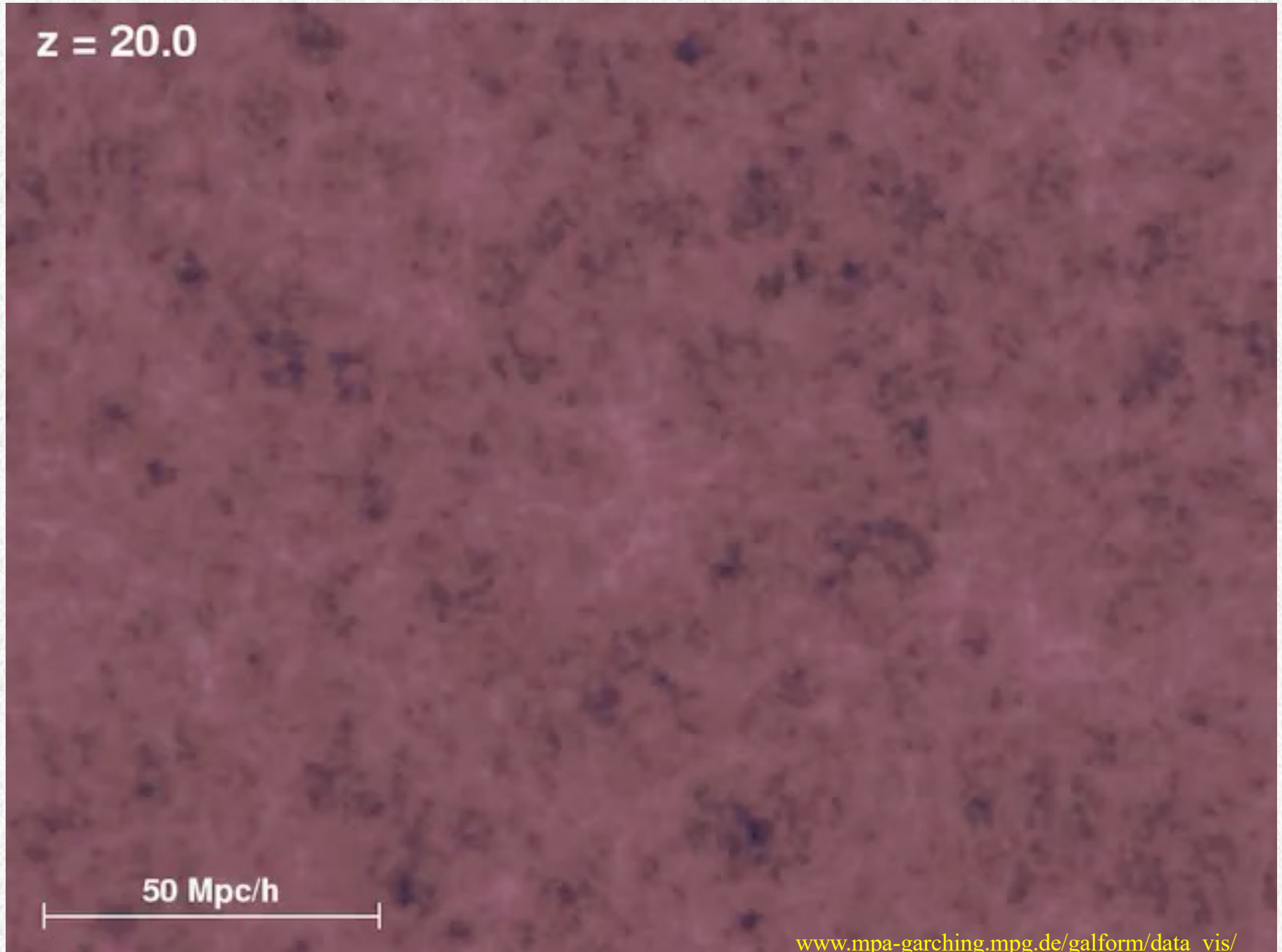
- Entre 400 mil e 400 milhões de anos
- Nesta época começa a formação da teia cósmica, traçada pela matéria escura.
- Fim da idade das trevas: $T \sim 30$ K, densidade ~ 10 átomos/litro

Radiação cósmica de fundo corresponde ao estado do universo com ~ 400.000 anos.

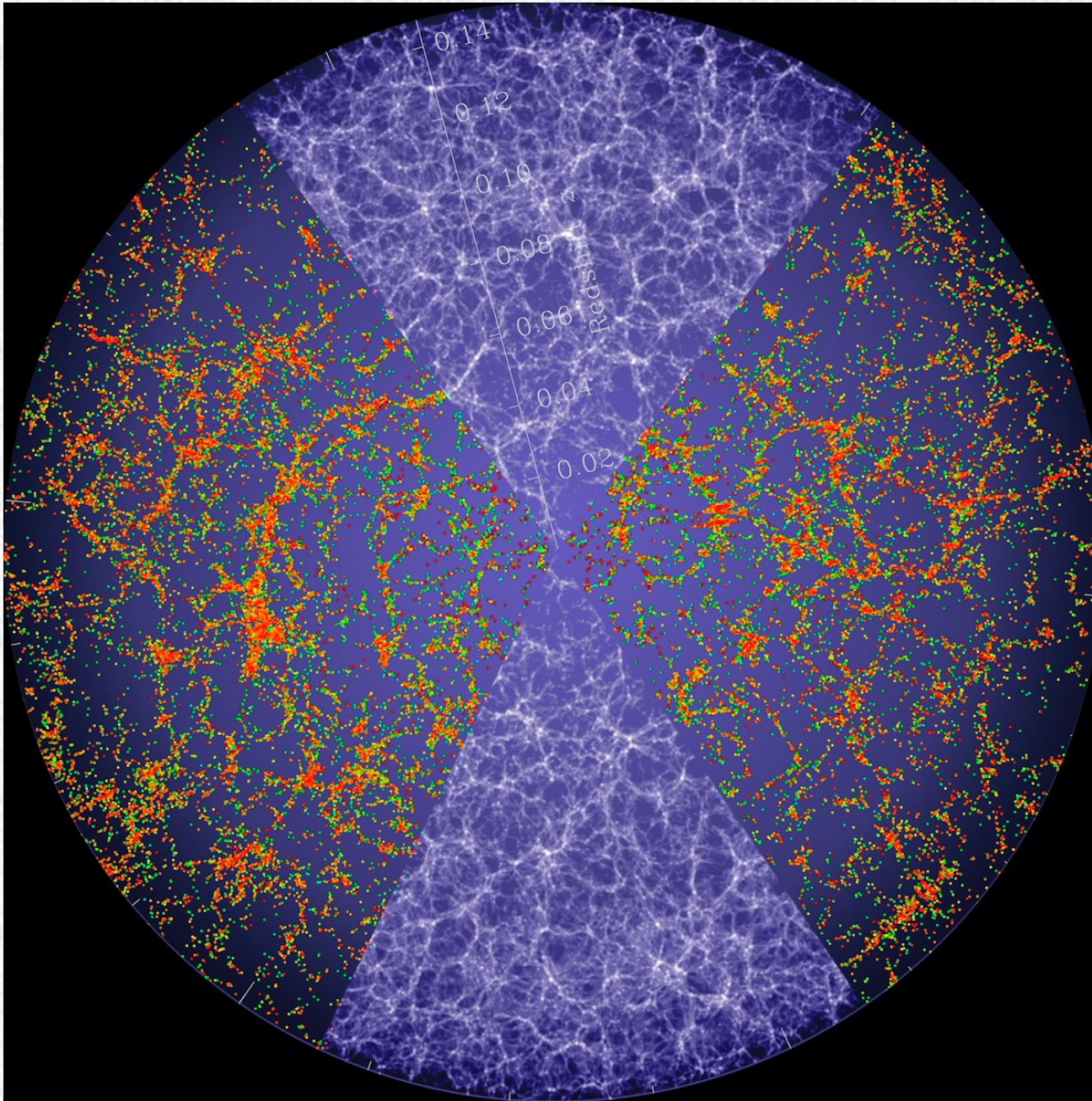
⇒ Evolução da distribuição de massa no universo nos últimos 13,7 bilhões de anos?



Formação de grandes estruturas



Universo em grande escala: observação X teoria



- Bom acordo entre modelo e observações na distribuição de matéria em grande escala.
- A distribuição de matéria no universo virtual é muito semelhante à distribuição no universo real.

Formação das estrelas, galáxias, planetas...

- Universo volta a se iluminar
- Radiação cósmica de fundo, em micro-ondas (200 GHz)

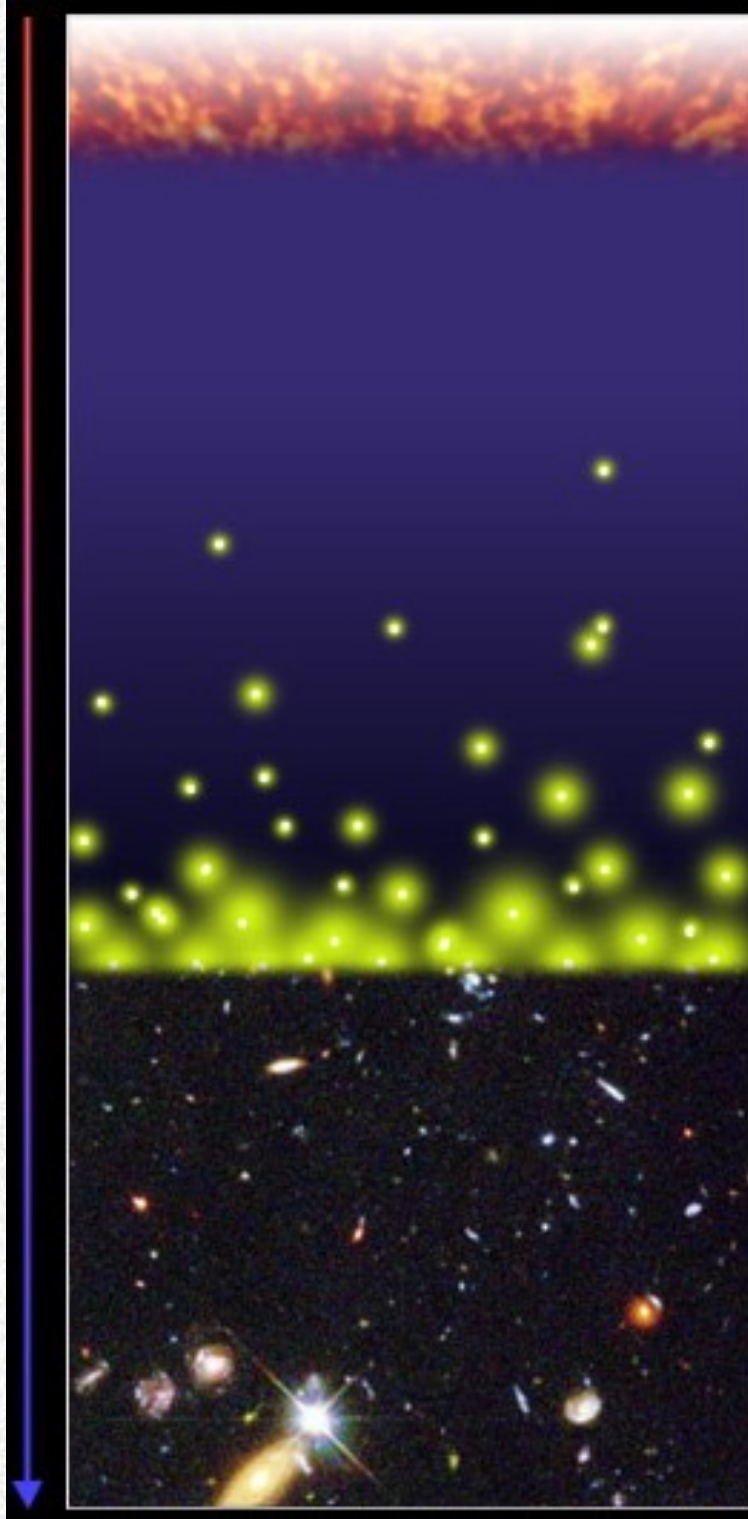


- entre 400 milhões (fim da idade das trevas) de anos até hoje
- $T \sim 2,7$ K, densidade ~ 1 átomo/ 1000 litros

- Radiação cósmica de fundo se forma.

- Quasares e galáxias conhecidos mais distantes.

Do
Big Bang
até hoje



Big Bang

Recombinação

400 mil de anos após o Big Bang

“Idade das trevas”

1^{as} estrelas e Quasares

400 milhões de anos

“Renascimento” cósmico

Fim da idade das trevas

universo reionizado

1 bilhão de anos

Galáxias evoluem

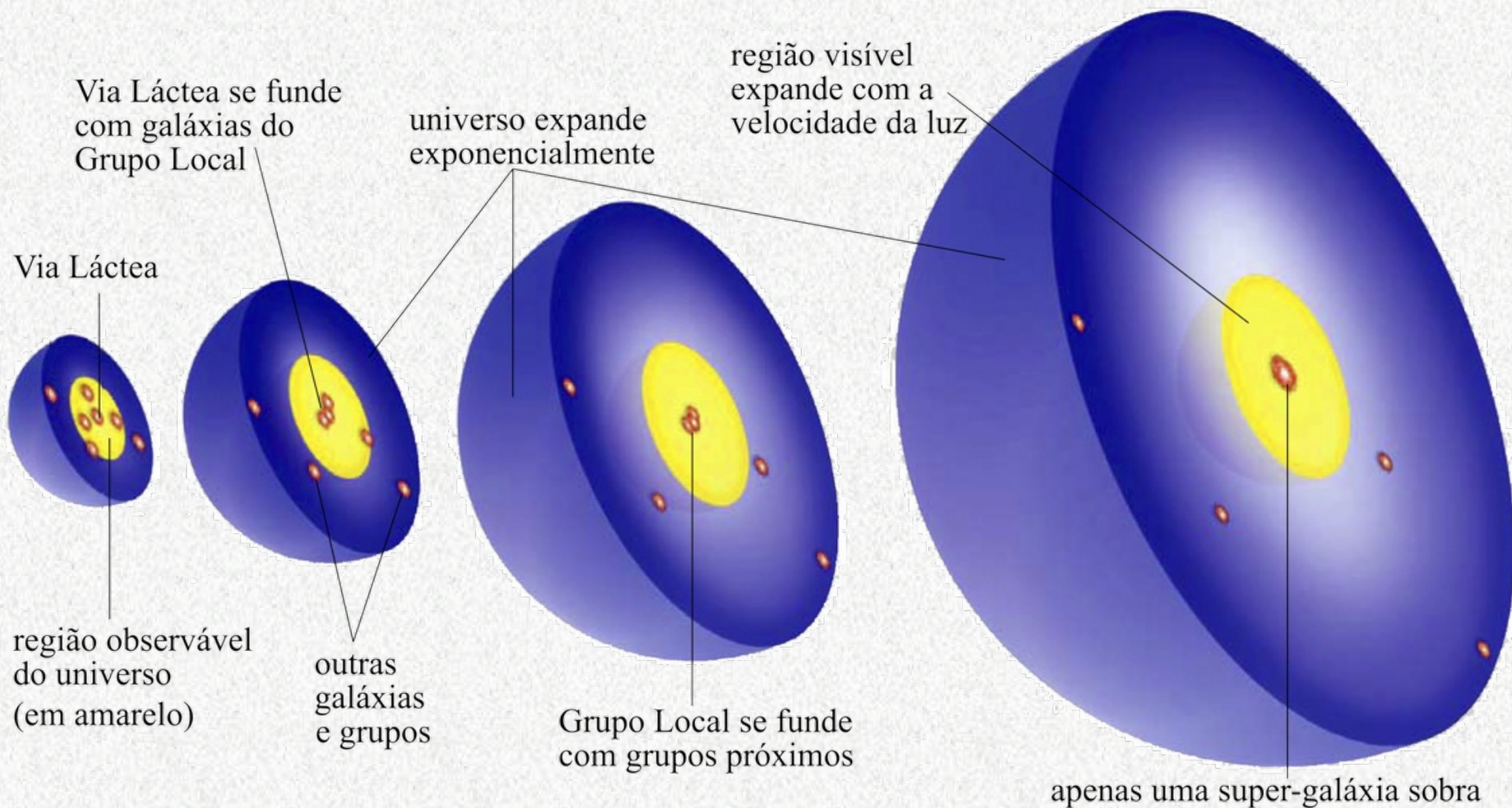
Sistema Solar se forma há

9 bilhões de anos

Nós, hoje 13,7 bilhões de anos

Futuro do Universo: trilhões de anos

Depende muito da natureza da energia escura



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.

Então já conhecemos a origem e destino do universo?

Não !

- O que acontece no Big Bang?
- Pode haver algo antes do Big Bang?
- Porque o universo é como ele é?
- Como se formaram e onde estão as primeiras estrelas?
- Como se formaram as galáxias?
- Qual será o destino do universo?
- O que é “matéria escura”?
- O que é “energia escura”?