

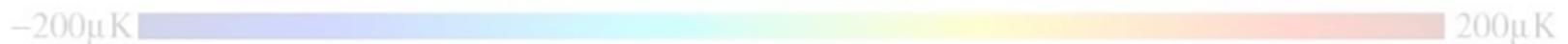


# COSMOLOGIA - II

## além do modelo padrão

Carlos Alexandre Wuensche

ca.wuensche@inpe.br



E O QUE TEMOS, ALÉM DO MPC?



# Problemas...

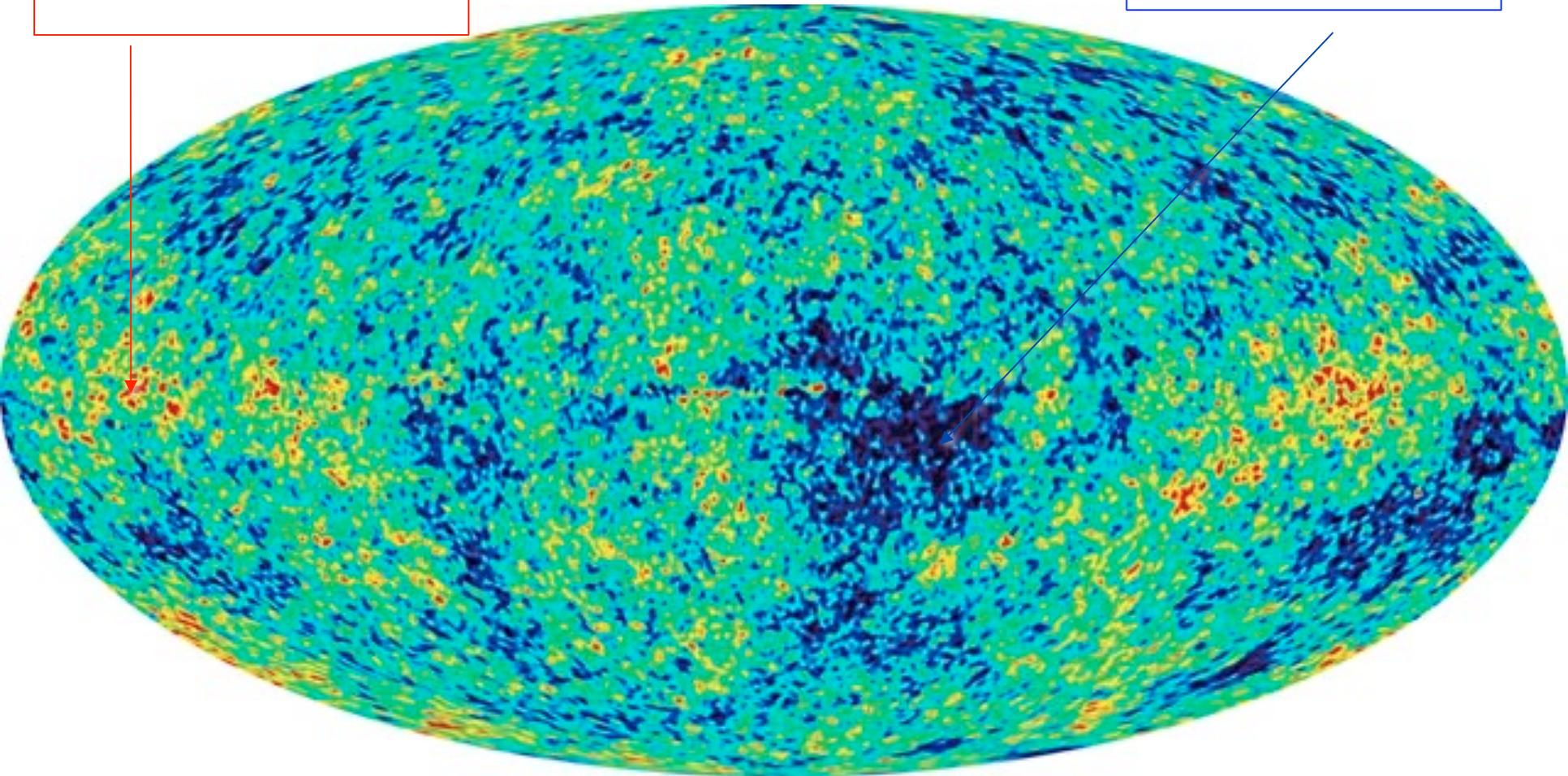
- ☑ O MCP não é capaz de explicar:
  - Homogeneidade e isotropia (o horizonte...)
  - A geometria
  - A formação de estruturas
  - A composição do Universo
  
- ☑ E ainda...
  - A assimetria fóton-bárion ( $n_{\text{fót}}/n_{\text{bar}} \sim 10^9$ )
  - A assimetria matéria-antimatéria...



# Homogeneidade/Isotropia

Regiões mais quentes  
e mais densas

Regiões mais frias  
e menos densas

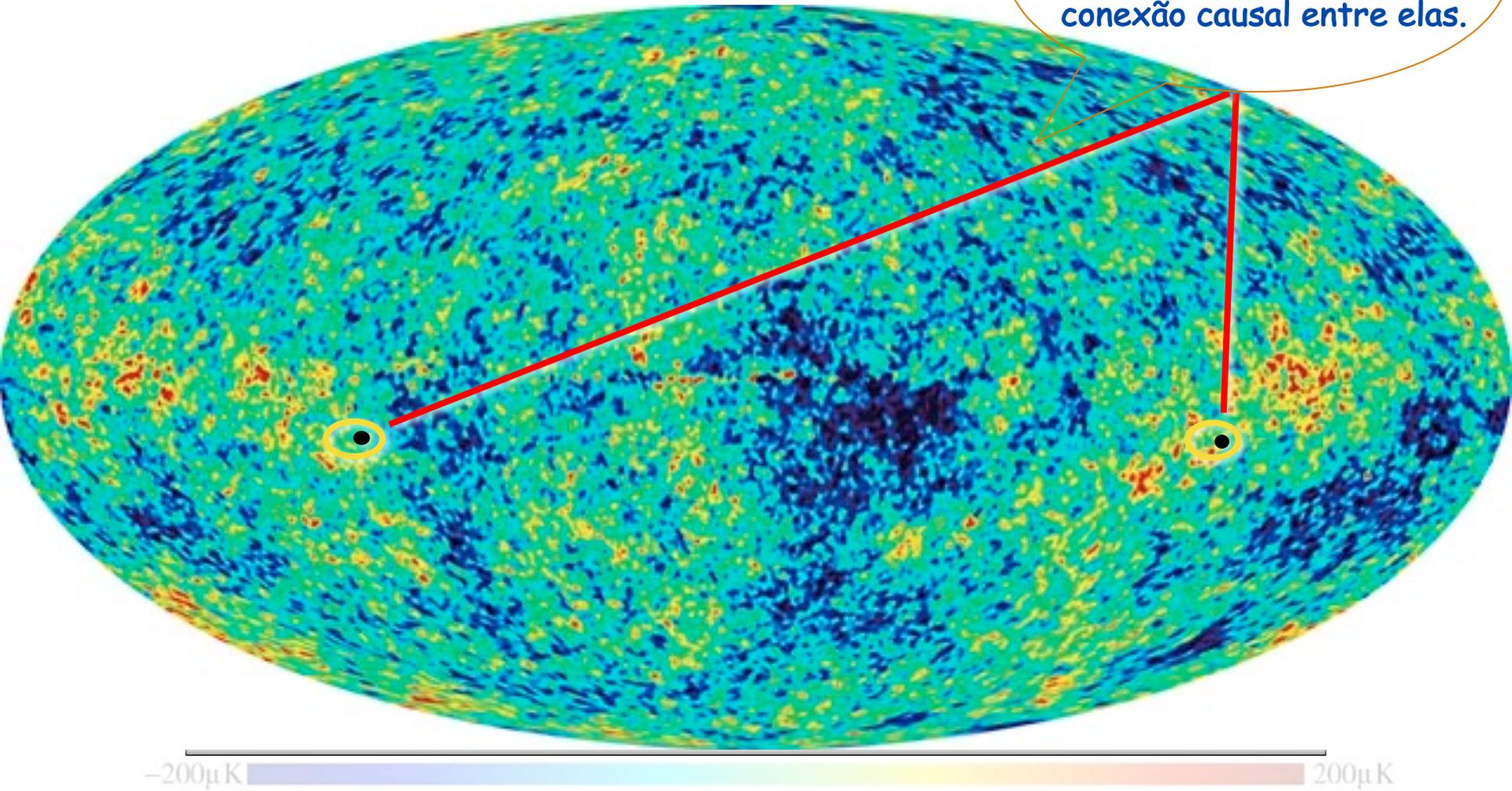


Escalas angulares de 4 minutos de arco

200  $\mu$ K

# Problema de horizonte ou isotropia

Limite de influência  $< 2^\circ$   
As 2 regiões não possuem  
conexão causal entre elas.

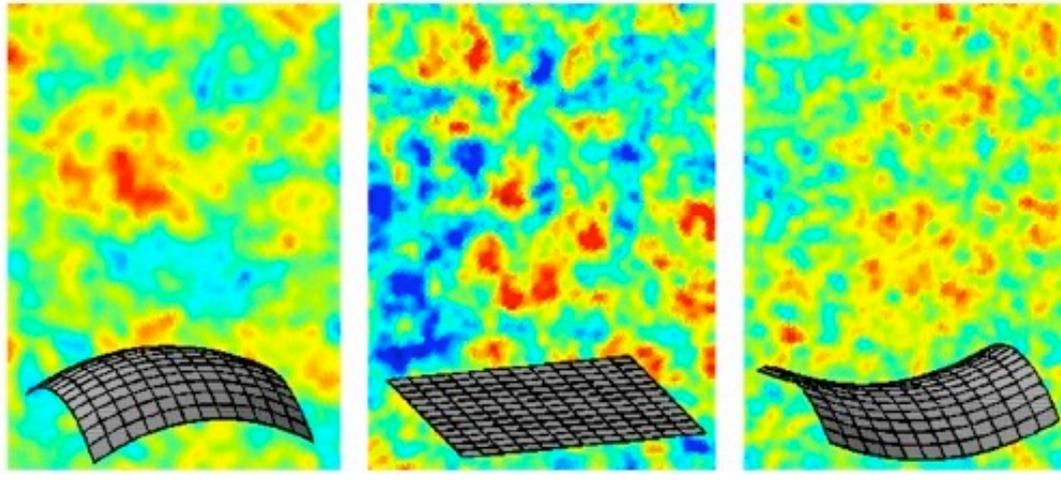
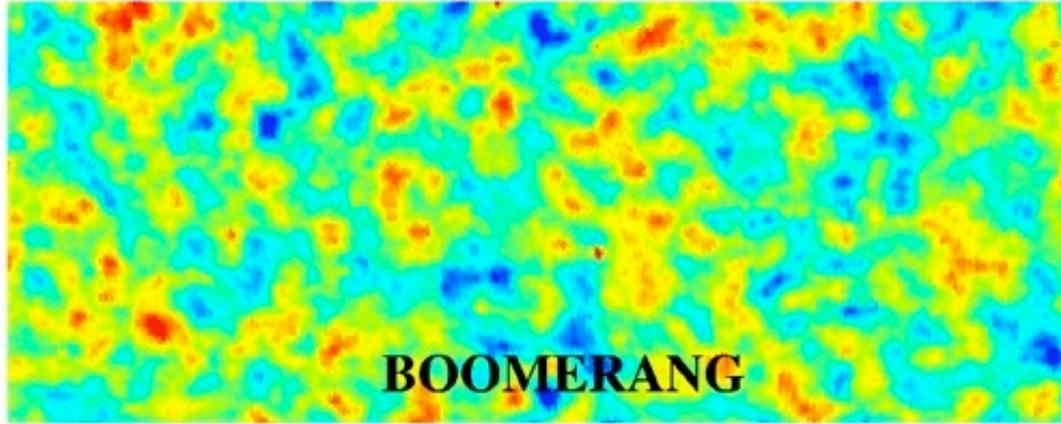




# A geometria do Universo



25°



K=1

K=0

K=-1

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

-200μK

200μK



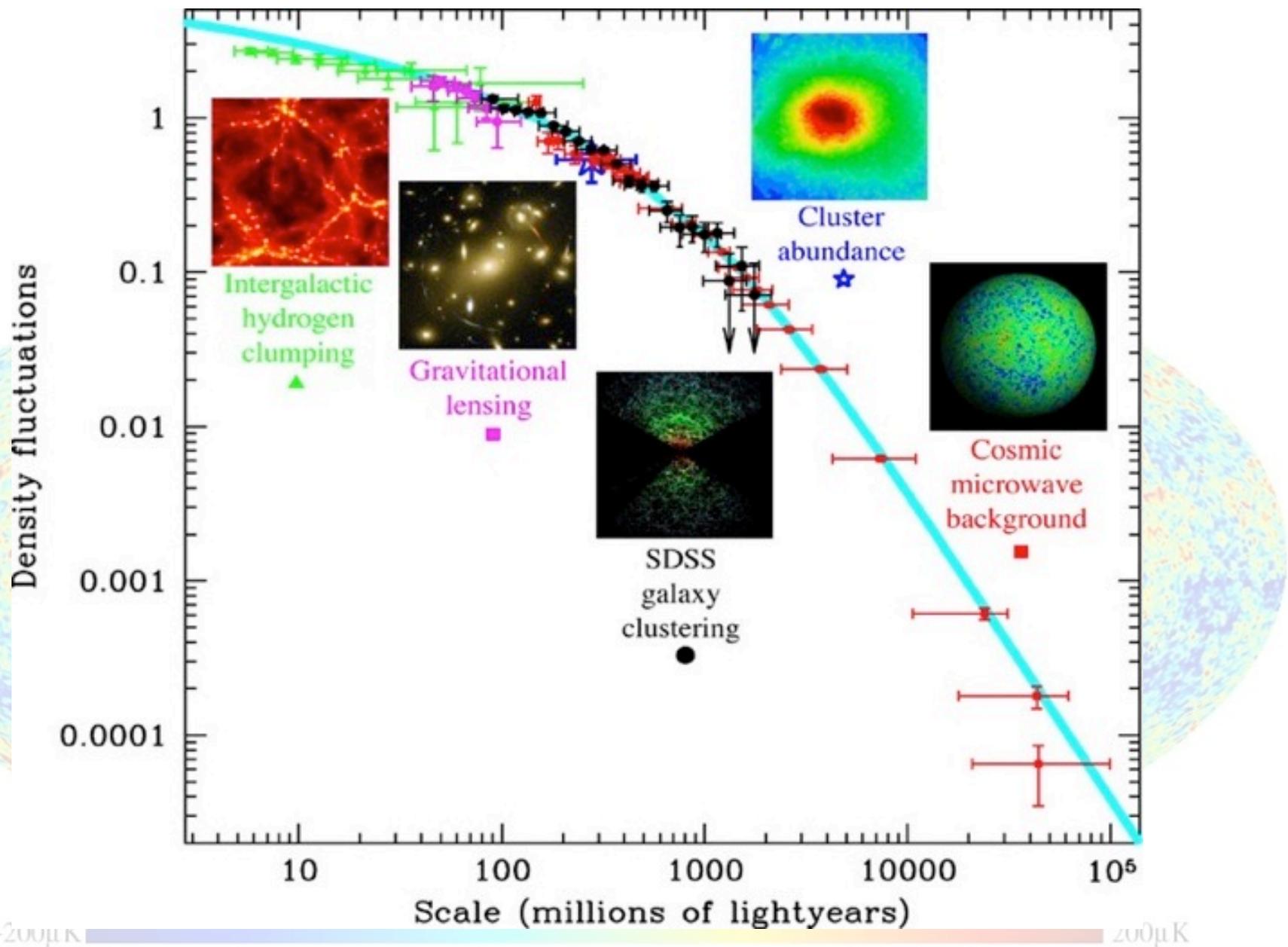
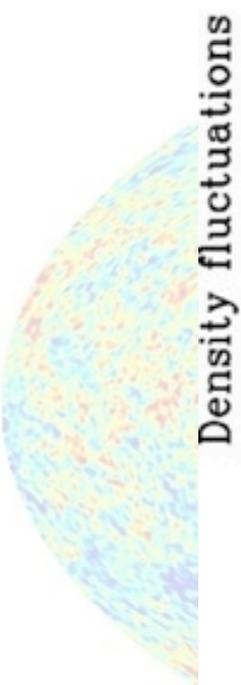
# A formação de estruturas

- ☑ Galáxias, aglomerados, superaglomerados e “paredes” e filamentos são **ESTRUTURAS**.
- ☑ Irregularidades na distribuição primordial de matéria e radiação constituem centros de atração gravitacional
- ☑ As galáxias se formam nos locais onde o efeito da gravitação suplanta a força de expansão do Universo e condensa nuvens primordiais de Hidrogênio
- ☑ Grupos e aglomerados de galáxias se formam posteriormente, da mesma maneira.

-200 $\mu$ K

<https://www.youtube.com/watch?v=xT-6jDIOfy0>

200 $\mu$ K





# A composição do Universo

- Embora o suporte observacional do MCP (**expansão do Universo, nucleossíntese primordial e RCF**) seja bastante sólido, existem algumas observações que não são explicadas à luz de algo conhecido
  - ✓ evidências de que a quantidade de bariões existente no Universo não é suficiente para explicar a dinâmica do Universo em grande escala ⇒ **MATÉRIA ESCURA**
  - ✓ evidências de que a expansão do Universo está sendo acelerada, ao invés de retardada ⇒ **ENERGIA ESCURA**



- Fótons
- Bárions
- Neutrinos



things you know

things you don't know

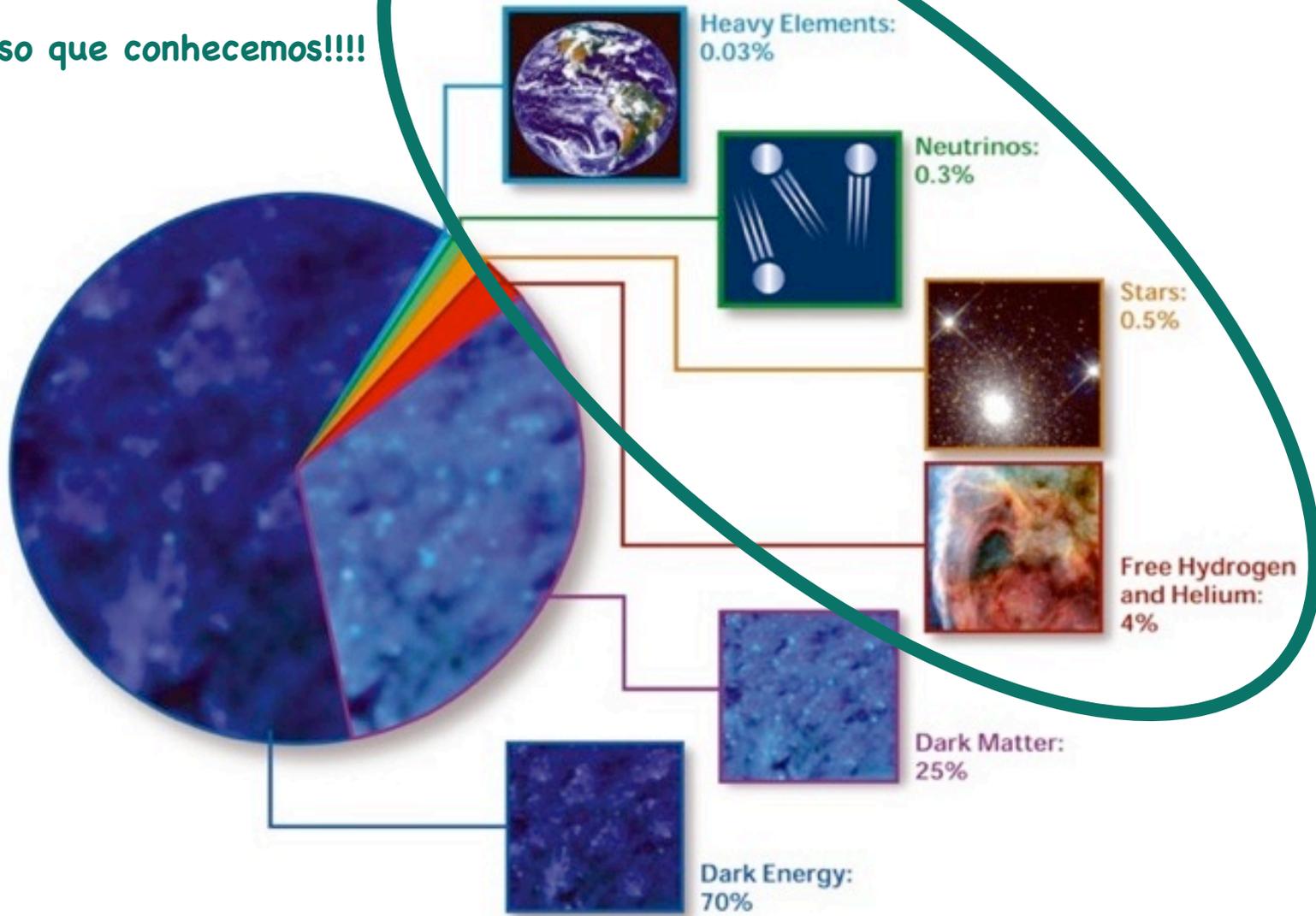
follow @amazingsciencez

things you don't know  
you don't know

-200 $\mu$ K 

# COMPOSITION OF THE COSMOS

É isso que conhecemos!!!!



# Matéria ESCURA

- ☑ F. Zwicky, V. Rubin e diversos outros astrônomos perceberam, em suas observações, efeitos gravitacionais que não tinham correspondência na matéria luminosa observada
- ☑ Efeito evidente em:
  - curvas de rotação de galáxias espirais
  - aglomerados de galáxias
  - fluxo de matéria em grande escala





# Matéria ESCURA

- ✓ Não pode ser detectada pela “luz” (radiação eletromagnética) – provavelmente não são bárions....
- ✓ Percebida através de efeitos gravitacionais
- ✓ Do ponto de vista da cosmologia => efeitos na formação de estruturas no Universo
  - Hot, Cold, Warm, Self-interacting, Fuzzy **DARK MATTER**
- ✓ Do ponto de vista da física de partículas => objetos que interagem via modelo padrão
  - neutralinos, gravitinos, QCD axions, partículas semelhantes a axions (ALPs), neutrinos estéreis, neutrinos padrão e buracos negros primordiais

-200μK

200μK

# DARK MATTER

## INVISIBLE



Dark matter doesn't emit, absorb or reflect light, so it's impossible to 'see'.

## IMPORTANT



Scientists think dark matter helps hold the universe together.

Planets, stars, the stuff we can see makes up just



of the universe.

## DARK MATTER is EVERYWHERE



Normal 5%

The other is a mystery

95%



## MYSTERIOUS

It's been many decades since we first theorised the existence of dark matter but we still haven't PROVEN it!

## A PARTICLE?

OR



## GRAVITY

Most scientists think dark matter might be a strange type of particle. Others think it could be an undiscovered property of gravity.

Advanced detectors help us to



**SEARCH**

for dark matter

**DARK MATTER**  
**BENDS**  
**LIGHT**

That's how we know it exists.

**DARK MATTER**

**IS OUT THERE**



**1933**

Swiss astronomer Fritz Zwicky theorises the existence of a mysterious substance he calls 'dark matter'.



**1970's**

Vera Rubin discovers evidence to support the existence of dark matter.



**1990's onwards**

Scientists begin running dark matter particle detectors in deep underground labs.



**2000 onwards**

Space-based detectors launched to search for indirect evidence of dark matter fragments.

Present day

**THE SEARCH GOES ON**



# Matéria escura

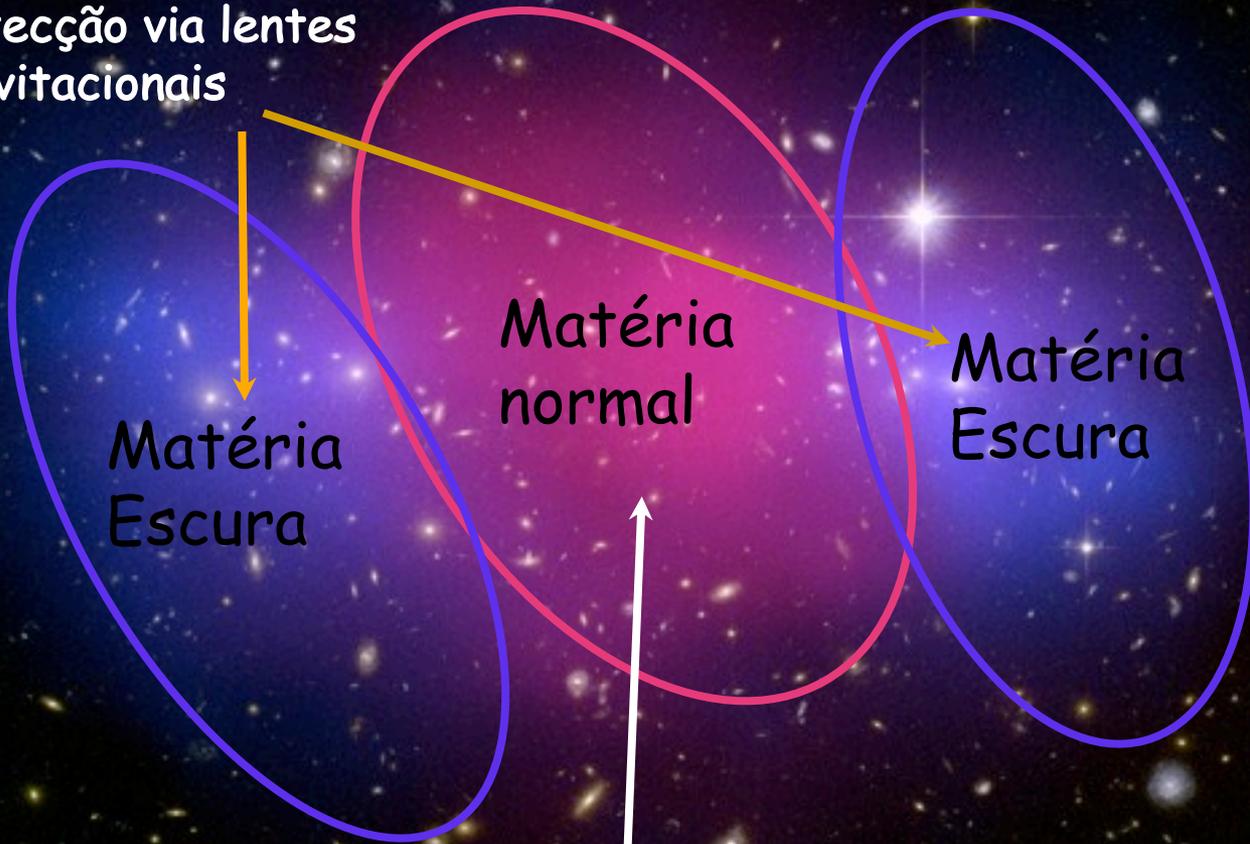
- ✓ Do ponto de vista da cosmologia, a presença da matéria escura é fundamental para produzir a aglutinação de matéria bariônica que deu origem às grandes estruturas, ainda antes da formação da RCFM
- ✓ Do ponto de vista da RCFM, a existência de partículas especiais que poderiam exercer o papel de ME deveriam causar distorções no espectro de corpo negro da RCFM – isso não é observado...

$$\delta_{b,RCFM} = \frac{\delta\rho_b}{\rho_p} \lesssim 10^{-4}$$
$$\delta_{b,0} = \frac{\delta\rho_b}{\rho_p} \sim 10$$



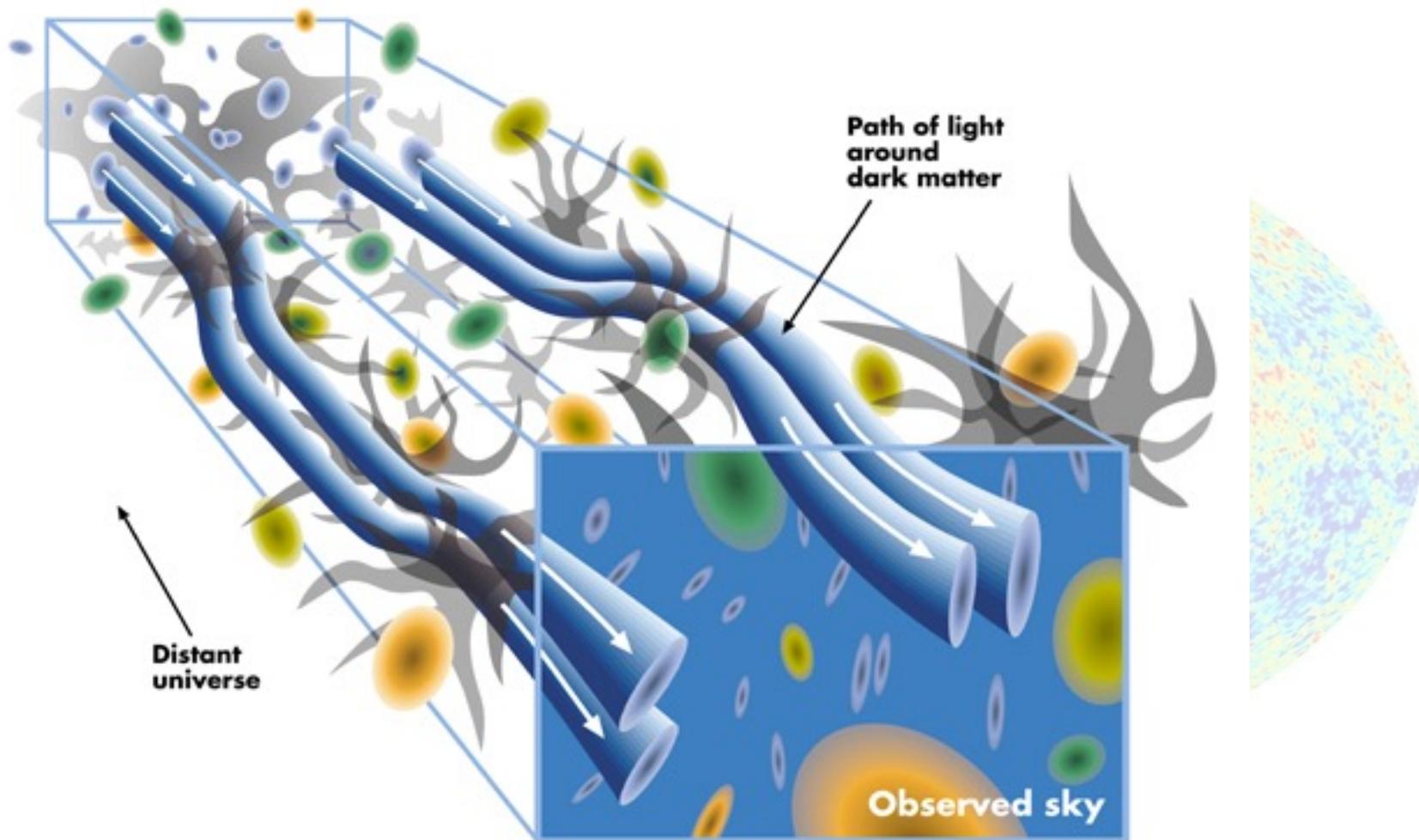
# MASCJ0025 - O Aglomerado da Bala

Detecção via lentes gravitacionais



Chandra + Hubble Space Telescope

# O Caminho da luz através da matéria escura





# Energia ESCURA

- ✓ Observações de supernovas (SN) Ia sugerem que o Universo passou a se expandir mais rápido há uns 5 bilhões de anos
- ✓ E O FREIAMENTO DEVIDO À GRAVIDADE????
- ✓ Relatividade Geral prevê uma “substância” com pressão negativa que, ao invés de comprimir a matéria, a repele (a chamada constante cosmológica)
- ✓ Se ela for mais abundante que a matéria que gera gravidade, o Universo vai se “repelir”, ao invés de contrair...

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K



# Energia ESCURA

- ☑ Ainda é desconhecida... É necessário postular algo desconhecido e exótico para explicar algo observado 😞
- ☑ Observações da RCF sugerem um Universo plano e a composição conhecida do Universo só explica (+/-...) cerca de 30% da matéria necessária para que isso ocorra



# Cosmologia de precisão...

- ✓ Universo em expansão acelerada:  $\Delta H_0 < 1\%$  
- ✓ Existência de uma quantidade de matéria e energia escura várias vezes superior à matéria normal:  $\Delta \Omega_M < 1\%$ ,  $\Delta \Omega_\Lambda \sim 3\%$  
- ✓ A RCF, a síntese de elementos leves e a expansão acelerada das galáxias são uma ótima evidência observacional para o MCP:  $\Delta RCF < 0.001\%$ ,  $\Delta X_{\text{He}}$  e  $\Delta X_{\text{H}} < 5\%$  
- ✓ Flutuações de densidade são o melhor e mais simples caminho para explicar as estruturas observadas no céu, simuladas computacionalmente com grande precisão... 

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K



# O "receituário" da Cosmologia de precisão

$\tau$	$0,17 \pm 0,04$	$t_{dec}$	$379 \times 10^5$ anos	$\Omega_{\Lambda}$	$0,69 \pm 0,04$	$H_0$	$68 \pm 0,09$
$t_{reion}$	$180 \times 10^6$ anos	$z_{dec}$	$1089 \pm 1$	$\Omega_b$	$0,045 \pm$ $0,0018$	CQ	4,4% bár. 22% DM 73% DE
$t_0$	$13,8$ $\times 10^9$ anos	$\Omega_T$	$1,02 \pm 0,02$	$\Omega_m$	$0,26 \pm 0,04$	$s_8$	$0,84 \pm 0,04$



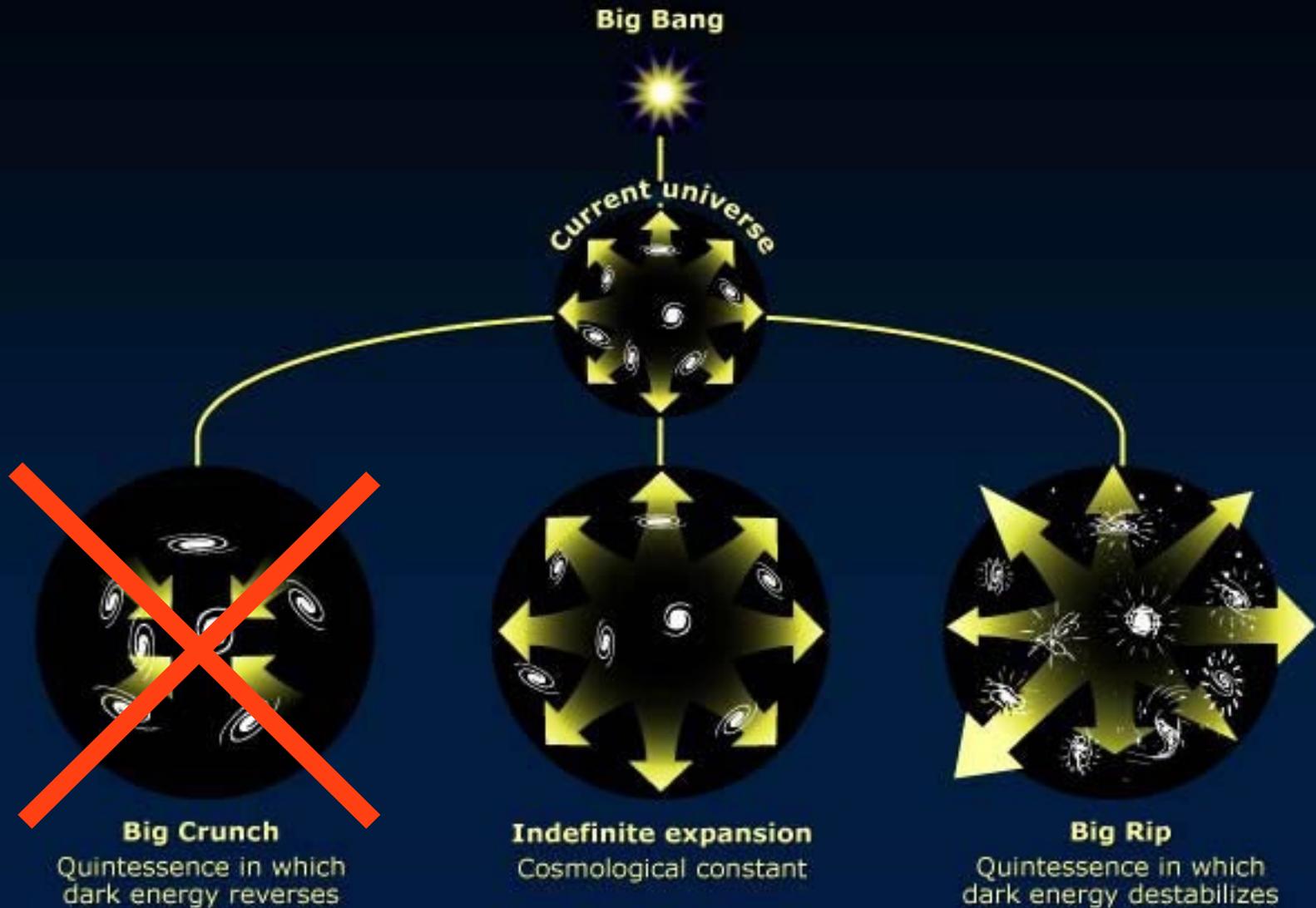


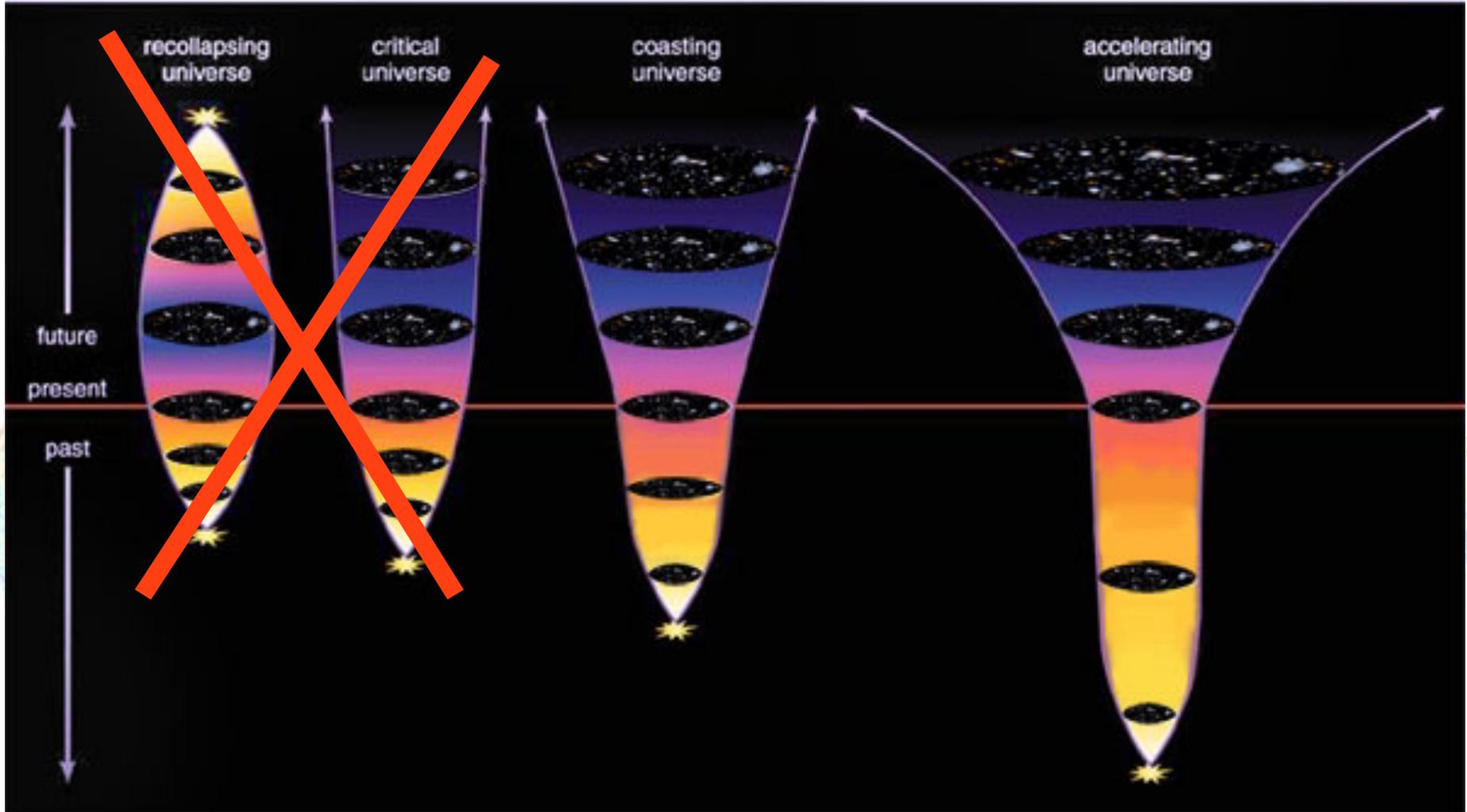
# O destino do Universo

- Densidade de matéria/energia  $\Rightarrow$  geometria + expansão  $\Rightarrow$  destino do Universo.
- A combinação da matéria comum, matéria escura e energia escura indica que:
  - ✓ o Universo está em expansão acelerada.
  - ✓ sua curvatura espacial é nula.
- Atualmente os dados indicam que, com as evidências de matéria e energia escura, haverá uma expansão eterna, descartando modelos cíclicos ou mais exóticos

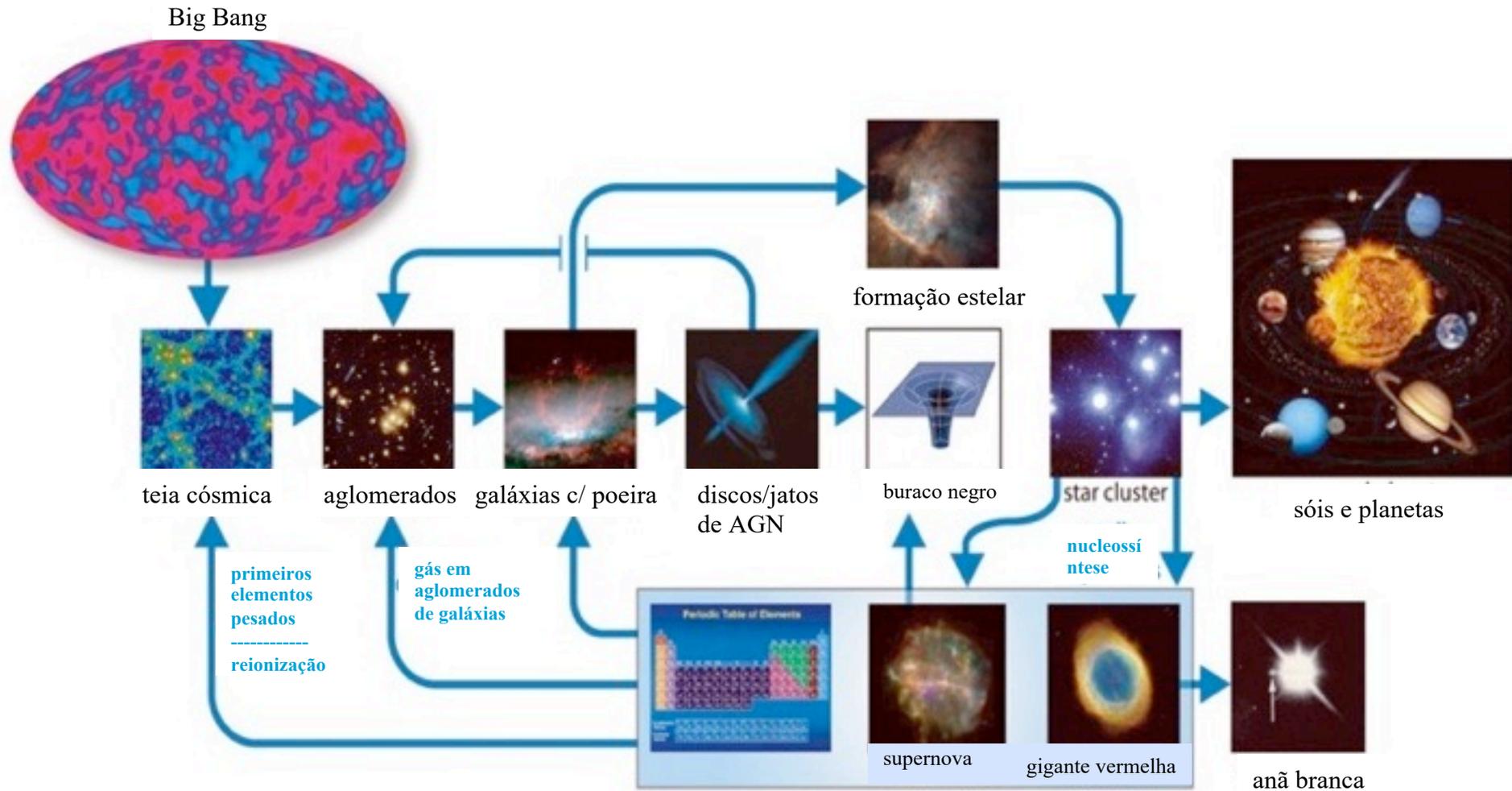


# Future fates of the dark-energy universe





# CICLOS DE MATÉRIA E ENERGIA





# O que sabemos em 2021?

- Que o Universo está em expansão acelerada...
- Que existe uma quantidade de matéria e energia escura várias vezes superior à matéria normal...
- Que existem alguns sérios candidatos a representar o papel de matéria escura, mas que o mesmo não acontece com a energia escura...
- Que a RCF, a síntese de elementos leves e a expansão das galáxias são uma evidência forte de que o Universo começou num "BIG BANG"...
- Que flutuações de densidade são o melhor e mais simples caminho para explicar as estruturas observadas no céu...

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K

# E o que ainda não sabemos?

• Entre outras questões:

- ☑ Qual a origem e a natureza exata da matéria escura e da energia escura?
- ☑ Supondo uma expansão eterna, qual será o aspecto do Universo daqui a, digamos,  $10^{100}$  anos...
- ☑ Quais as origens da assimetria matéria-antimatéria e assimetria fóton-bárion?
- ☑ Quais são os detalhes do processo de formação das primeiras estruturas, da hierarquia observada no Universo e de sua posterior evolução?
- ☑ Quais as condições iniciais do Universo?

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K



# O que devemos lembrar - I

- O Sol é uma estrela “comum”, de tamanho médio, localizado perto da borda de uma Galáxia em forma de disco, com braços espirais.
- O disco dessa Galáxia pode ser visto como uma faixa clara atravessada no céu, numa noite clara
- O Universo contém muitos bilhões de galáxias e cada galáxia contém muitos bilhões de estrelas
- Elementos químicos são criados por reações nucleares estelares ou explosões de supernovas.





# O que devemos lembrar - II

- A gravidade é o principal mecanismo que atua no Universo e que mantém galáxias, sistemas estelares e solares ligados de forma coerente
- A idade do Universo é de  $\sim 13,9$  bilhões de anos
- O modelo cosmológico padrão é o chamado "BIG BANG", que pode ser **entendido como a criação do espaço-tempo** e, por extensão, do próprio Universo
- Desde o Big Bang o Universo vem se expandindo, a partir de um estado caótico, denso e quente

-200 $\mu$ K

200 $\mu$ K



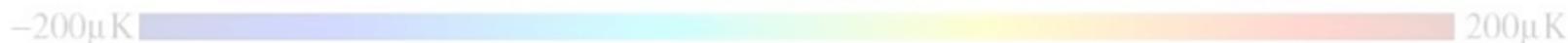
# O que devemos lembrar - III

- Todas as afirmativas anteriores e o restante do curso baseiam-se em:
- **Teoria: extrapolação das leis físicas que conhecemos no laboratório para o Universo.**
- **Observação: medidas da radiação eletromagnética emitida por (QUASE) todos os objetos existentes no Universo**



# Conclusão

- Os principais problemas existentes hoje na Cosmologia são bem formulados, mas muitas das soluções tem permanecido obscuras por décadas (**ME, por exemplo**)
- Solução das questões atuais dependem fortemente do avanço teórico, tecnológico e computacional
- Novos instrumentos, como o LHC, os satélites Euclid e GLAST, os telescópios JWST e SKA e o detector Pierre Auger talvez tragam as respostas a algumas dessas questões...





OBRIGADO!!!!



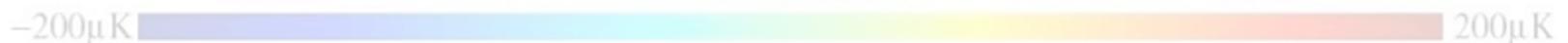
# A densidade do Universo

- ☉ Densidade crítica: valor para interromper, em algum momento futuro, a expansão cósmica
- ☉ Um universo com a densidade igual à crítica é dito “plano” ou EUCLIDIANO ( $\Omega=1$ )
- ☉ Densidades diferentes levariam a um colapso ou à expansão eterna ( $\Omega>1$  ou  $\Omega<1$ )

$$\rho_{total} = \rho_{barions} + \rho_{ME} + \rho_{EE} + \rho_{curv}$$

$$\Omega_{total} = \frac{\rho_b}{\rho_{crit}} + \frac{\rho_{ME}}{\rho_{crit}} + \frac{\rho_{EE}}{\rho_{crit}} + \frac{\rho_{curv}}{\rho_{crit}}$$

$$\Omega_{total} = \Omega_b + \Omega_{ME} + \Omega_{EE} + \Omega_{curv}$$



# Os parâmetros de densidade

- Parâmetro de densidade:  $\Omega = \rho / \rho_{crit}$ , descreve as diversas componentes que contribuem para a dinâmica do Universo.

➤ **Bárions**

➤ **radiação**

➤ **neutrinos**

☑ **matéria escura**

☑ **energia escura**

☑  $\rho_{crit} = 1,88 \times 10^{-29} \text{ h}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (densidade crítica)

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{crit}}, \quad \text{em que} \quad \rho_{crit} = \frac{8\pi G}{3H^2}$$

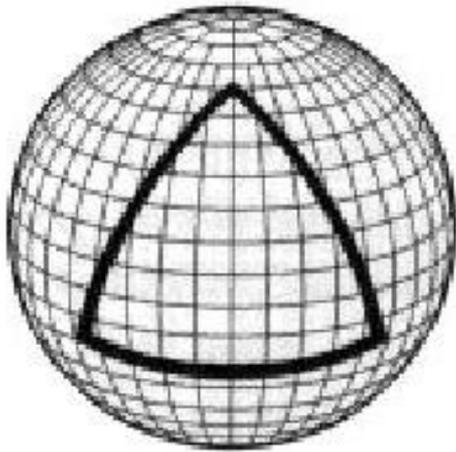
$$\Omega_{total} = \sum \Omega_i$$

Universo "Euclidiano" (plano)

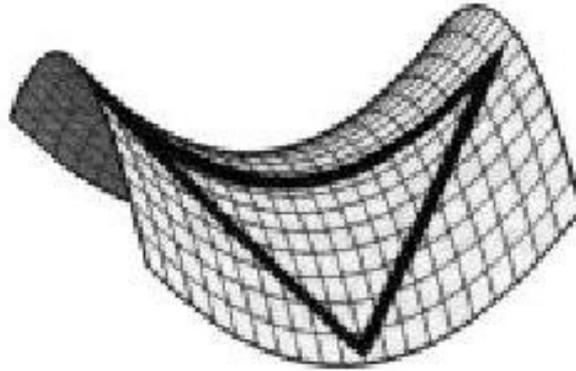
$$\Omega_0 = \frac{\rho_{total}}{\rho_{crit}} = \frac{8\pi G \rho}{3H_0^2} = 1$$

-200 $\mu$ K

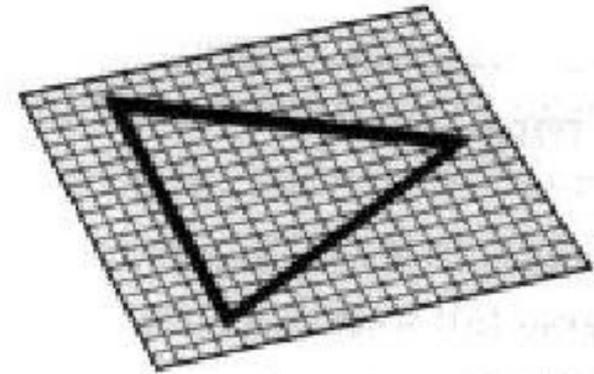
# Geometria e topologia



Geometria fechada



Geometria aberta



Geometria plana

Curvatura  
espacial  
positiva

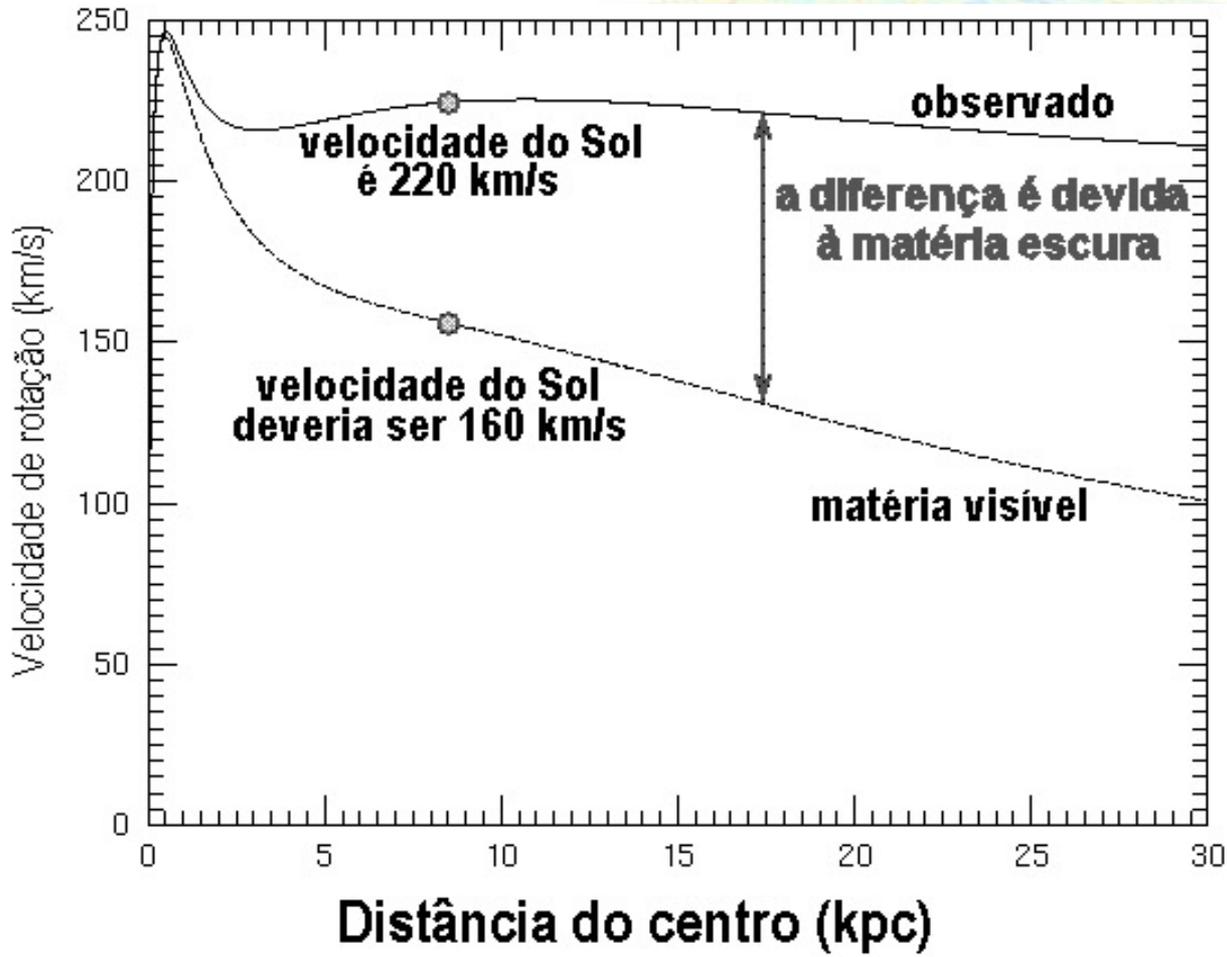
Curvatura  
espacial  
nula

Curvatura  
espacial  
negativa



# De onde veio essa idéia estranha?

Das curvas de rotação de galáxias!!!



Estimativa simples:

$$G \frac{mM}{r^2} = m \frac{V^2}{r}$$
$$M = \frac{V^2 R}{G}$$

200 μK

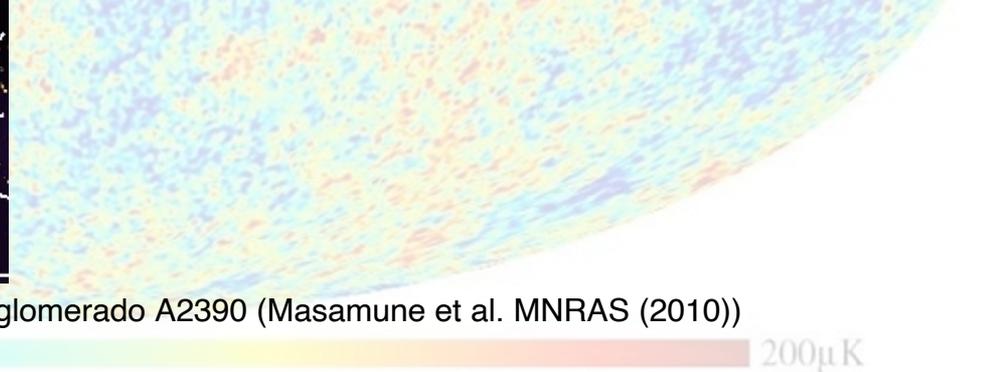
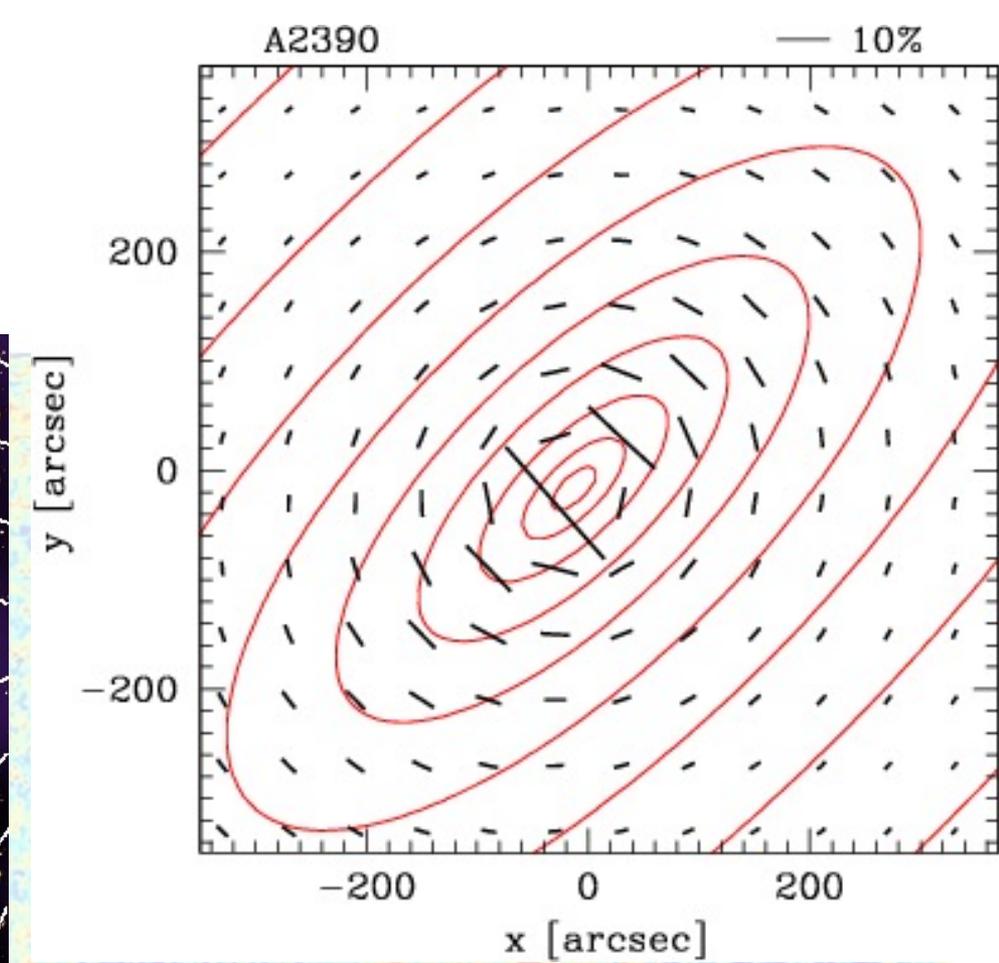
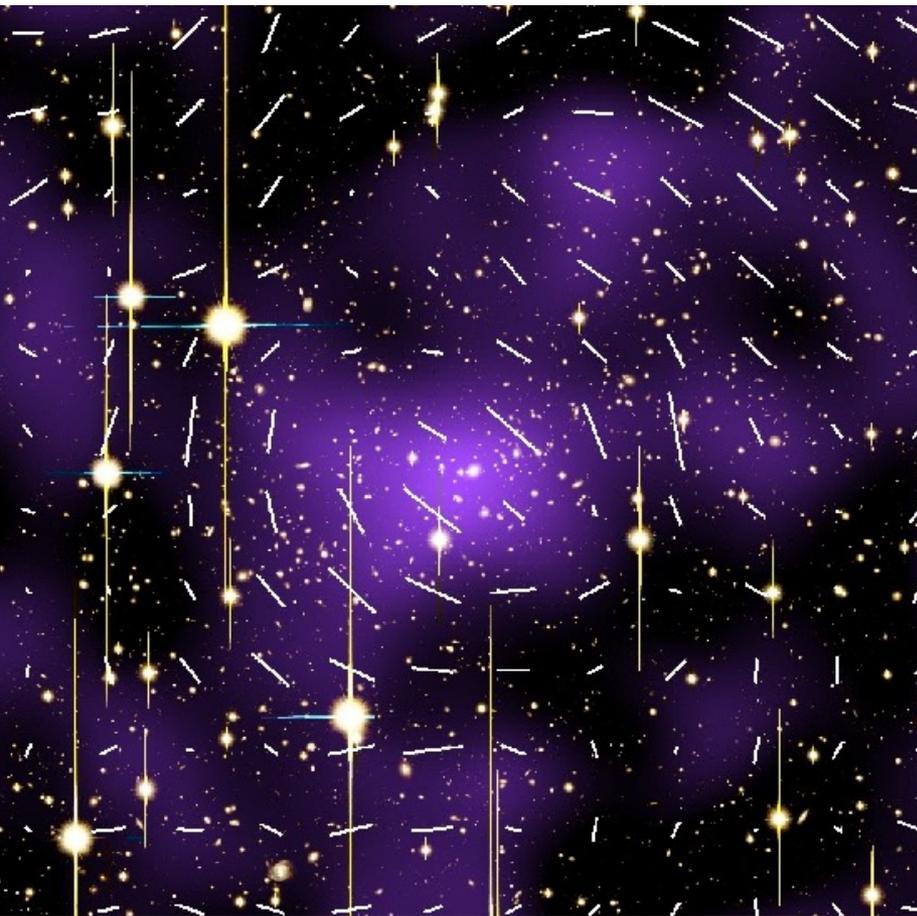
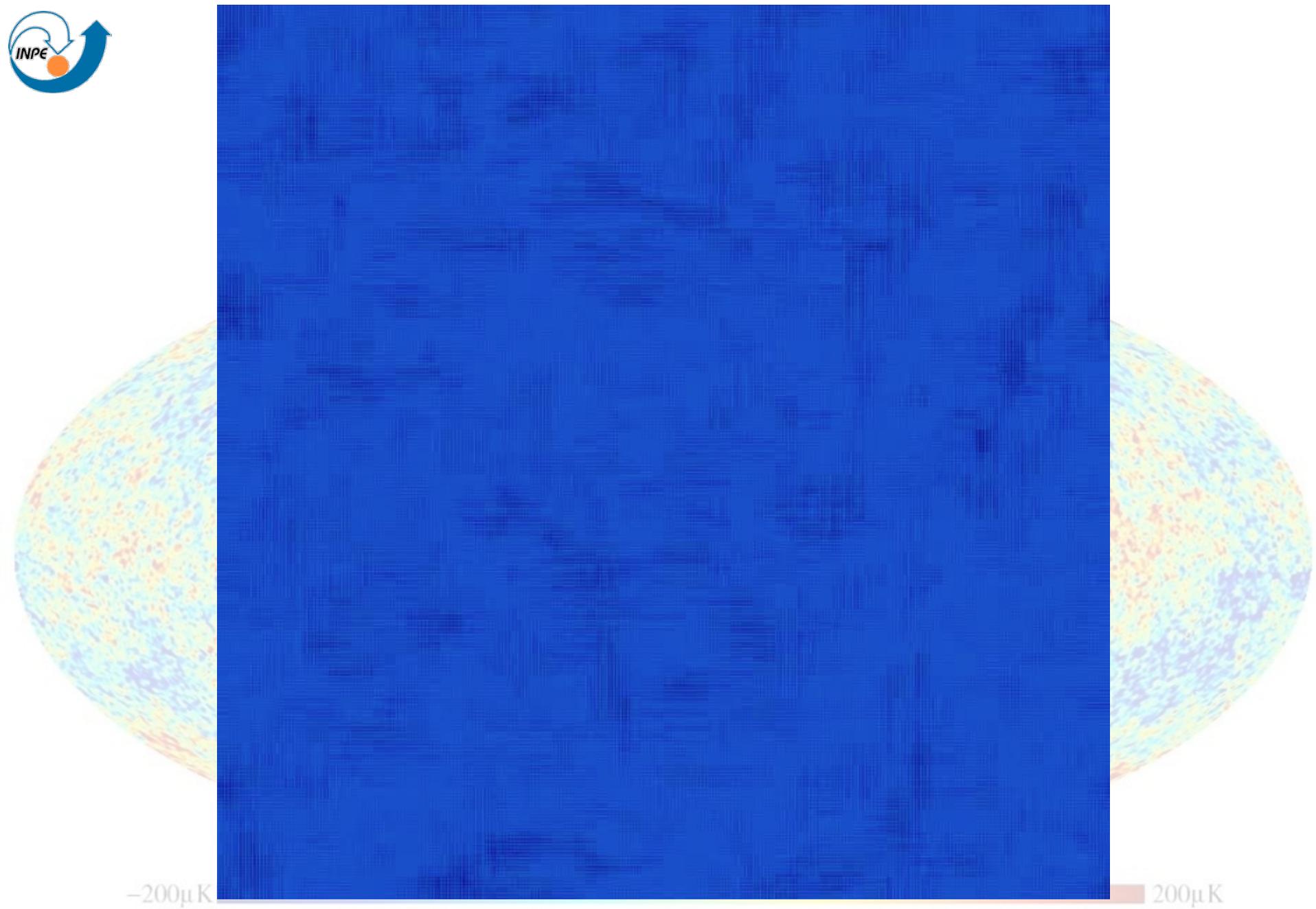
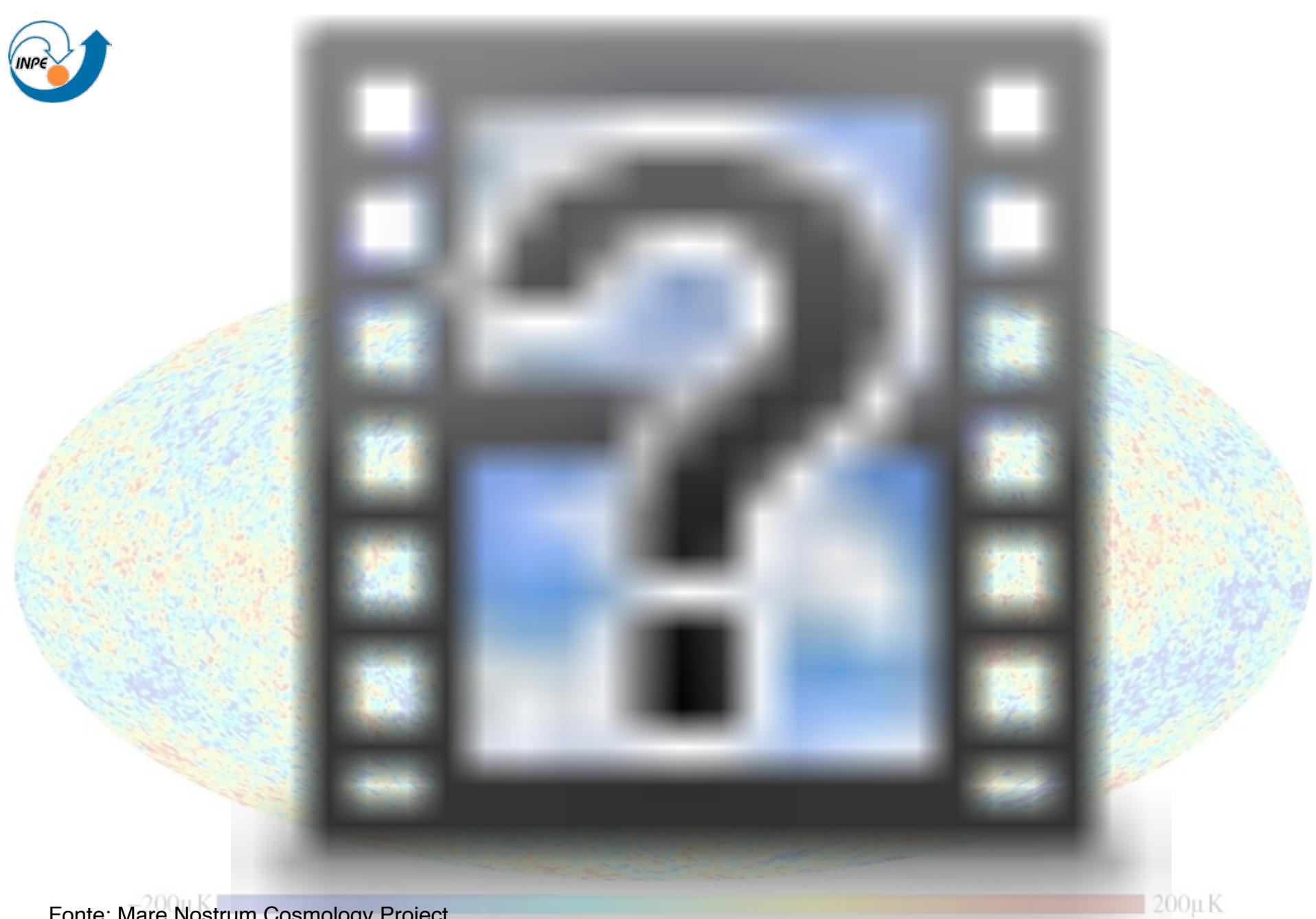


Imagem e mapa de contorno de densidade do aglomerado A2390 (Masamune et al. MNRAS (2010))

-200  $\mu\text{K}$   200  $\mu\text{K}$





Fonte: Mare Nostrum Cosmology Project  
<http://astro.ft.uam.es/marenostrum/index.html>



Fonte: Mare Nostrum Cosmology Project  
<http://astro.ft.uam.es/marenostrum/index.html>

C.A. Wuensche (CIAA 2021)

