

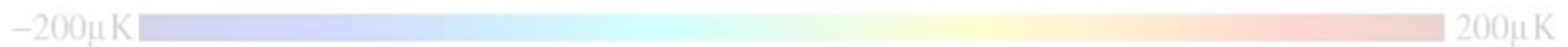


COSMOLOGIA - II

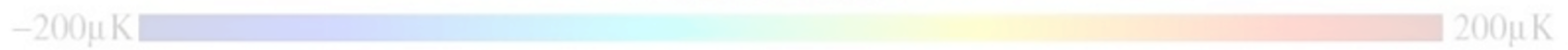
além do modelo padrão

Carlos Alexandre Wuensche

ca.wuensche@inpe.br



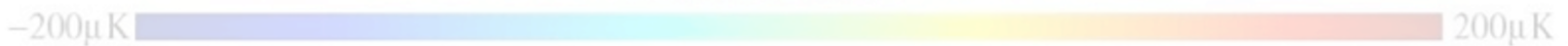
E O QUE TEMOS, ALÉM DO MPC?



Problemas...

- ☑ O MCP não é capaz de explicar:
 - Homogeneidade e isotropia (o horizonte...)
 - A geometria
 - A formação de estruturas
 - A composição do Universo

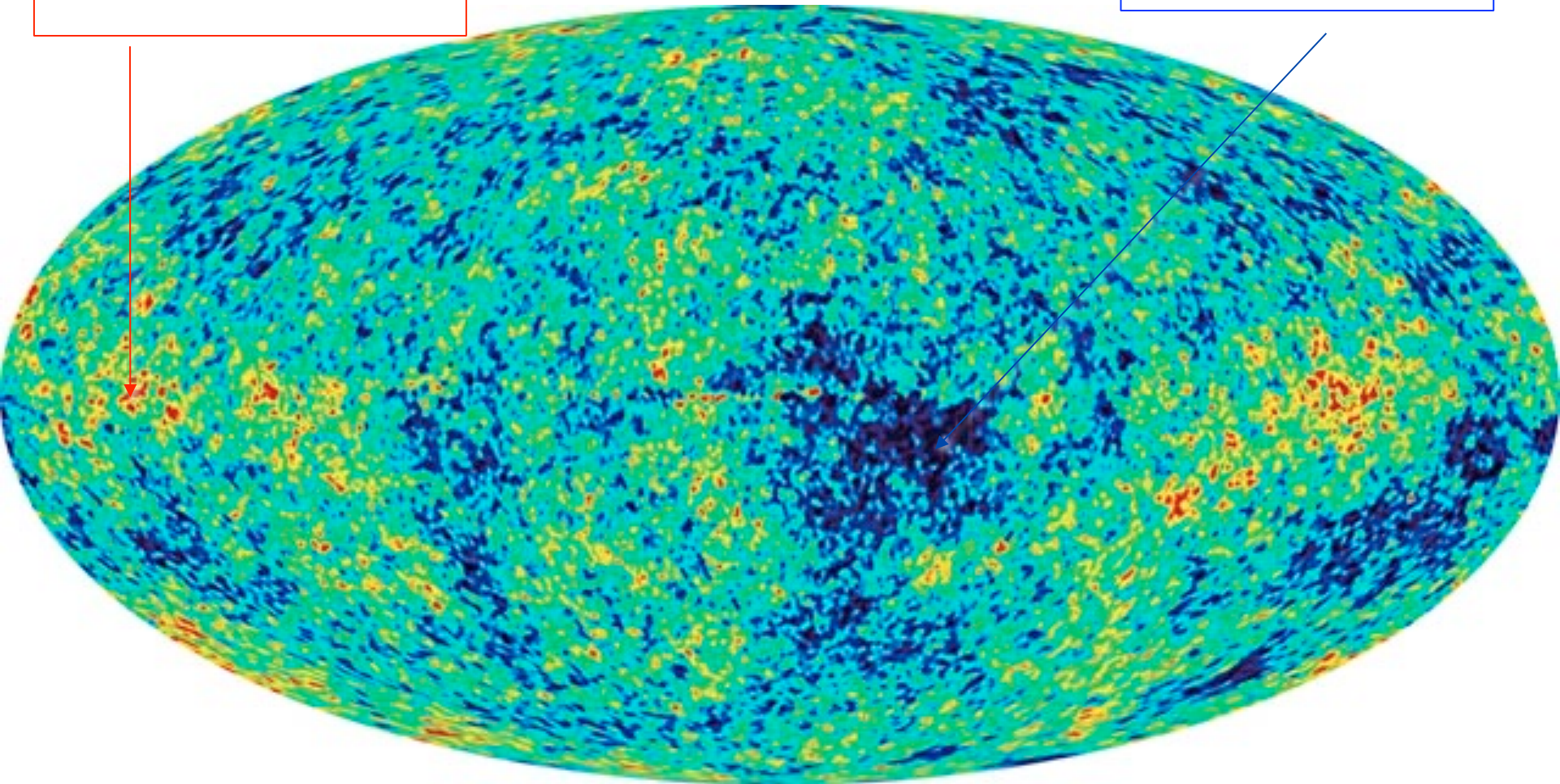
- ☑ E ainda...
 - A assimetria fóton-bárion ($n_{\text{fót}}/n_{\text{bar}} \sim 10^9$)
 - A assimetria matéria-antimatéria...



Homogeneidade/Isotropia

Regiões mais quentes
e mais densas

Regiões mais frias
e menos densas

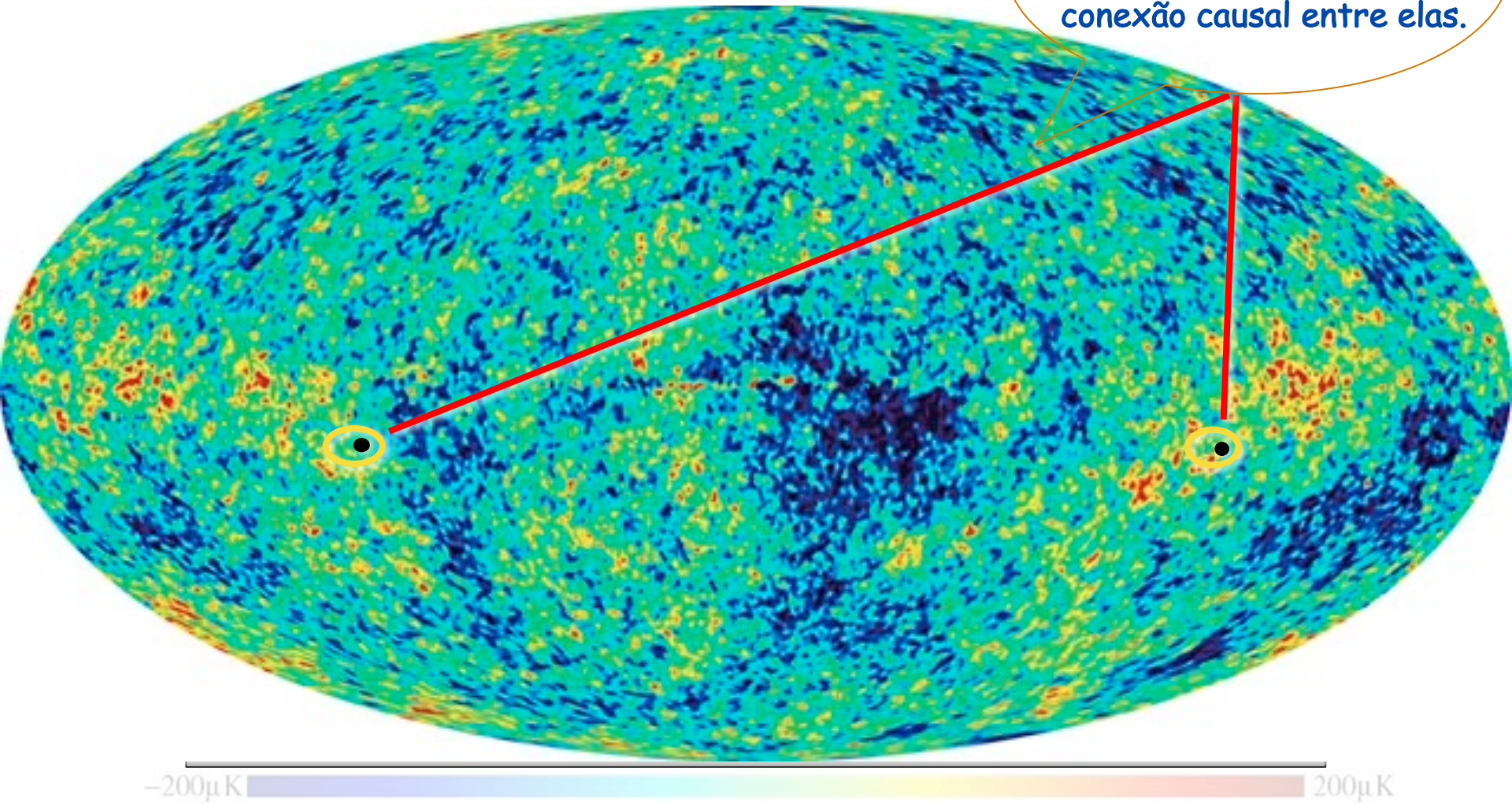


Escalas angulares de 4 minutos de arco

200 μ K

Problema de horizonte ou isotropia

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

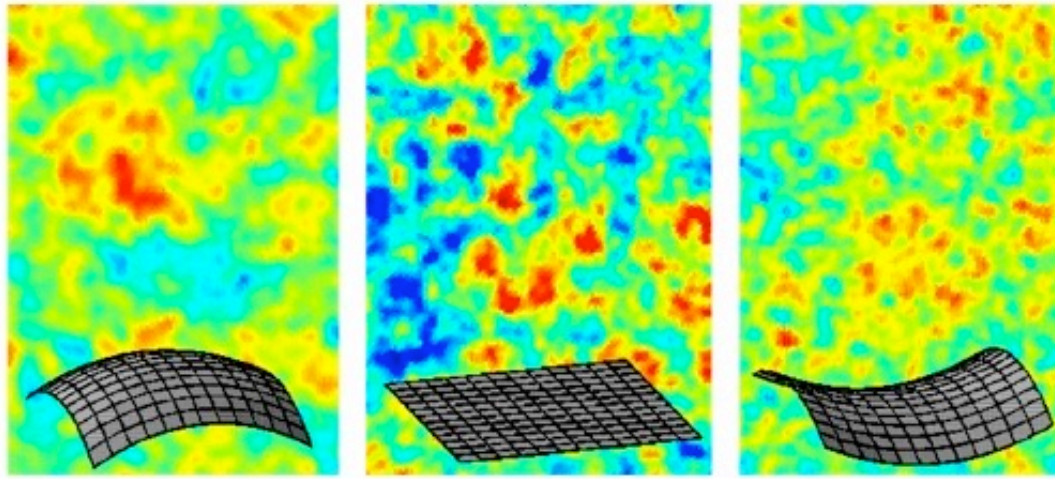
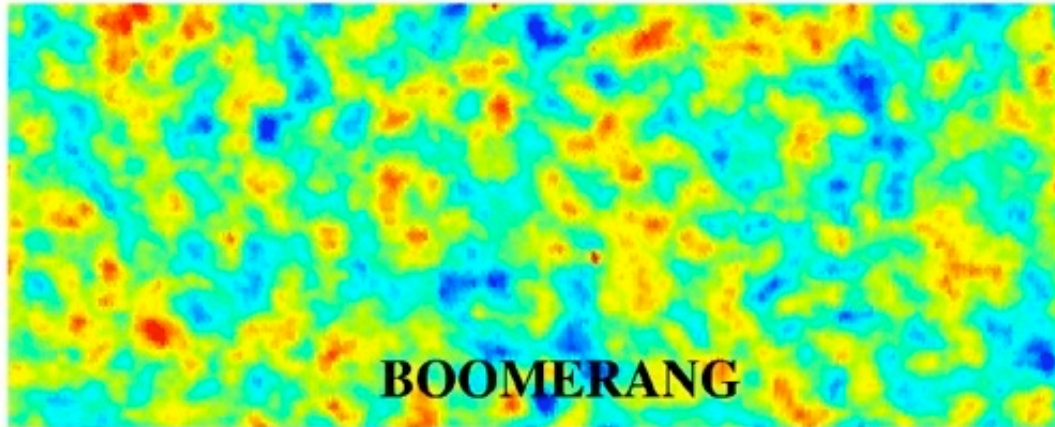




A geometria do Universo



25°



K=1

K=0

K=-1

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





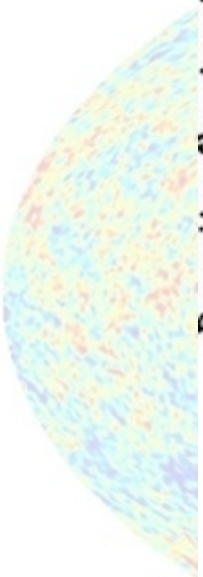
A formação de estruturas

- ☑ 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.

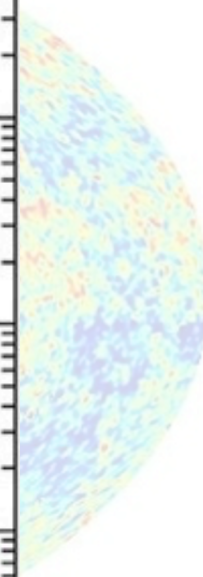
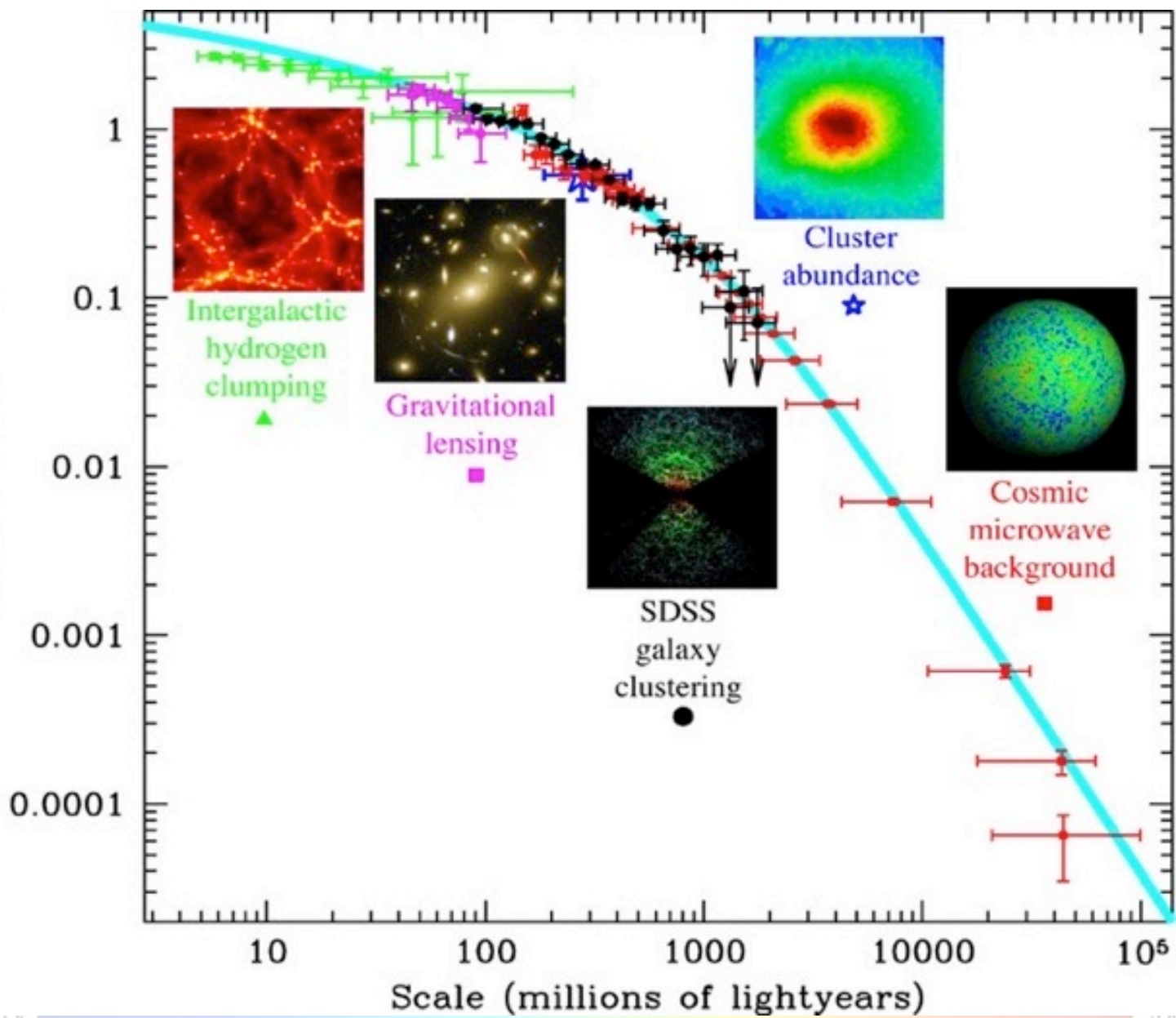
-200 μ K

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

200 μ K



Density fluctuations





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 bárions 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

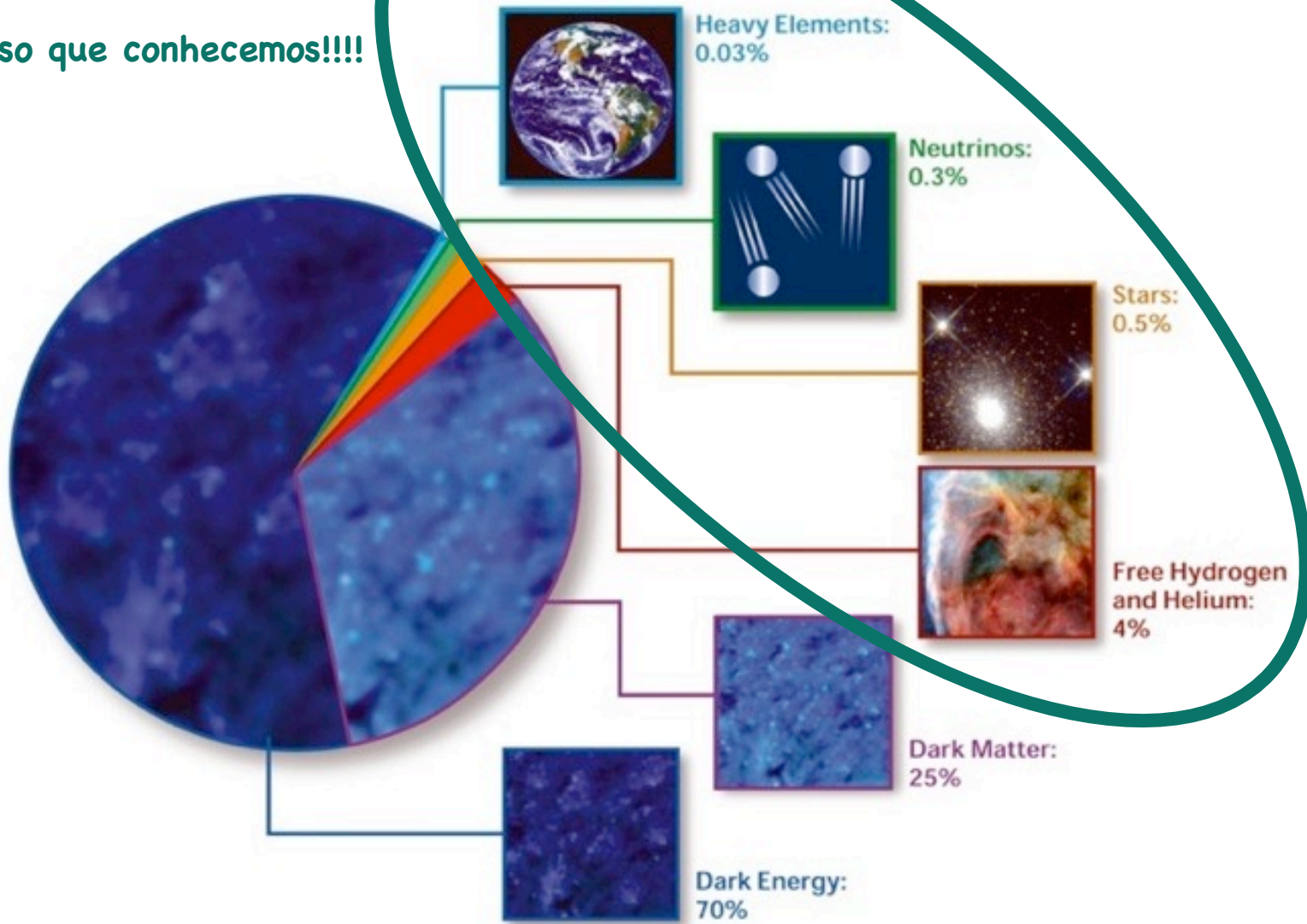
follow @amazingsciencez

things you don't know
you don't know

-200 μ 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

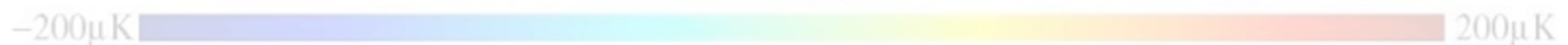
THE SEARCH GOES ON



Matéria escura

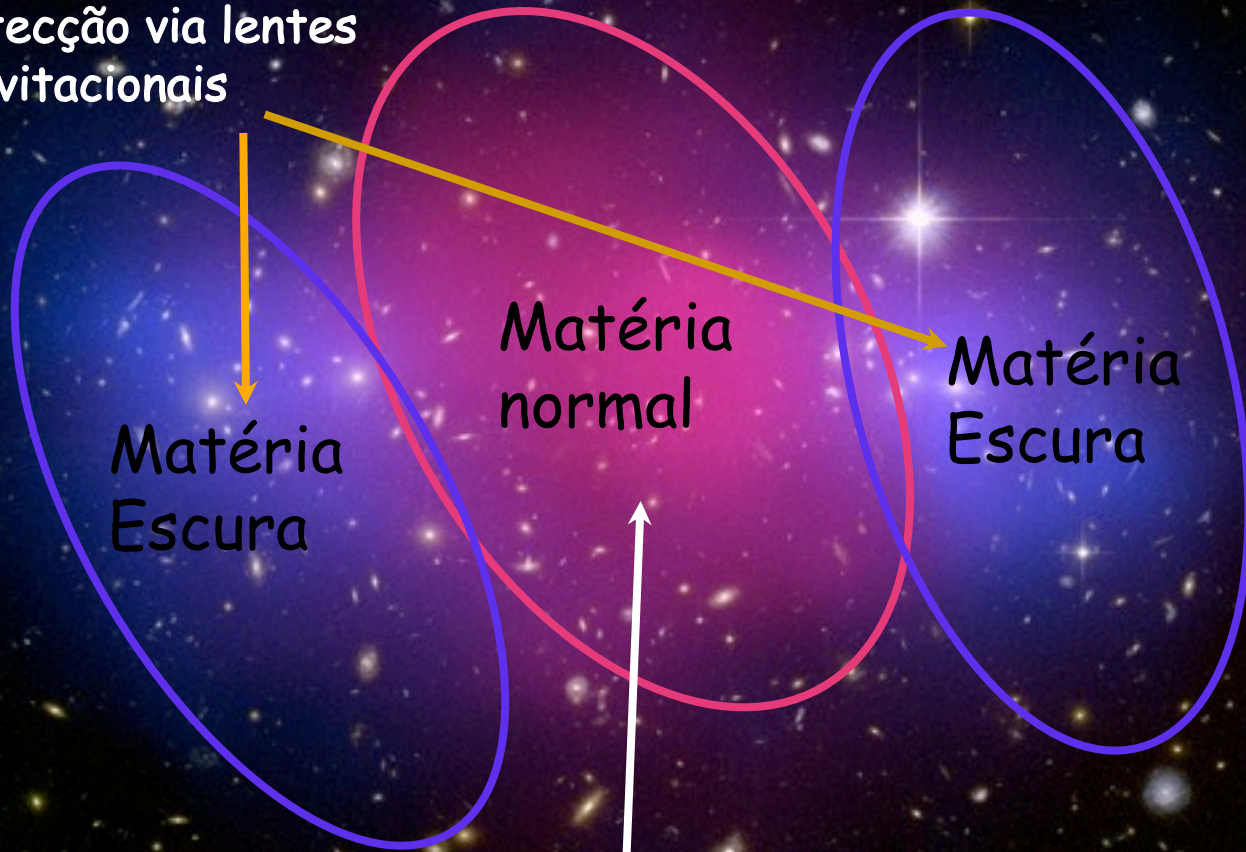
- ✓ Do ponto de vista da cosmologia, a presença da matéria escura é fundamental para produzir a aglutinação de matéria bariônica que deu origem às grandes estruturas, ainda antes da formação da RCFM
- ✓ Do ponto de vista da RCFM, a existência de partículas especiais que poderiam exercer o papel de ME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

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



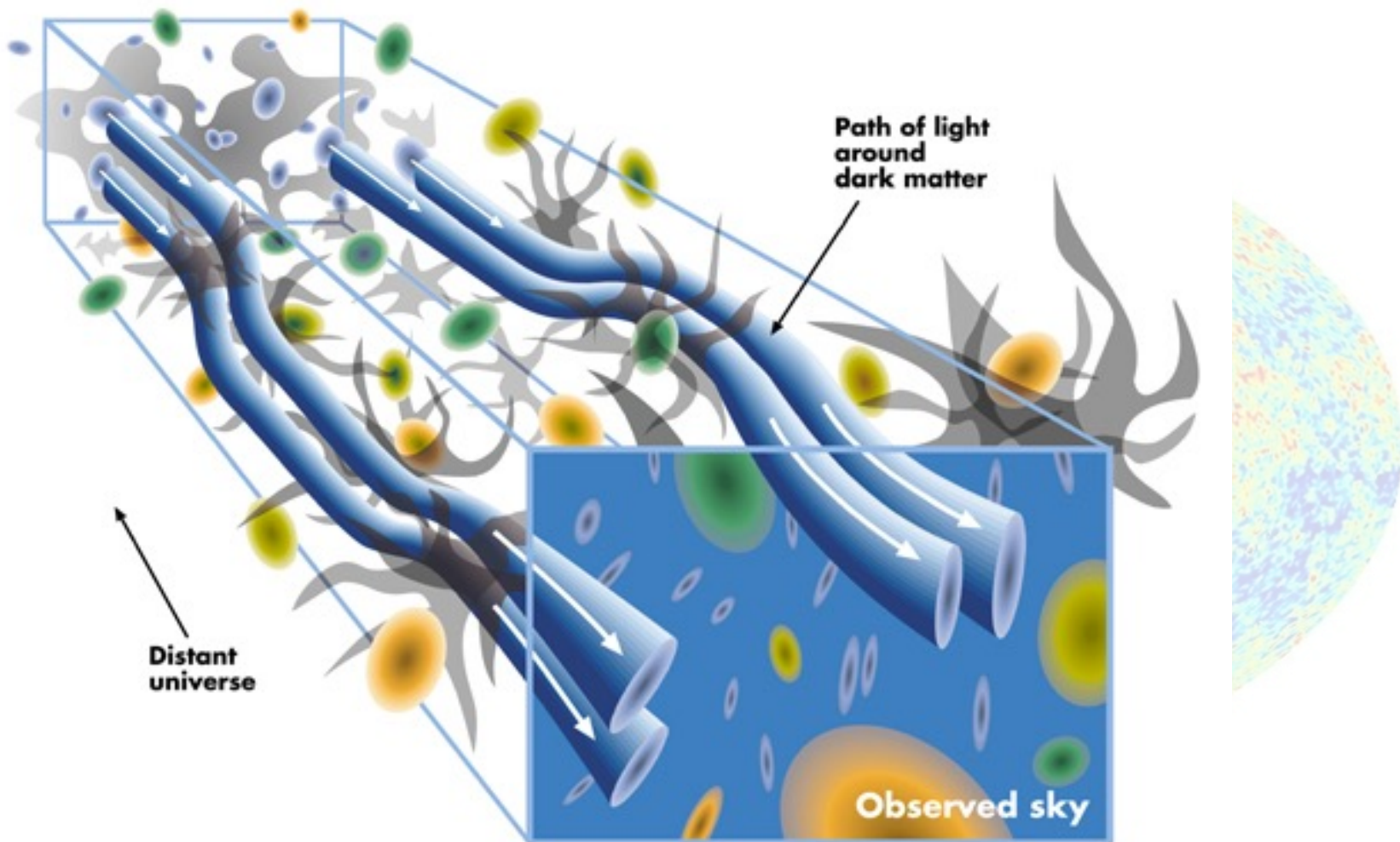
MASCJ0025 - O Aglomerado da Bala

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...

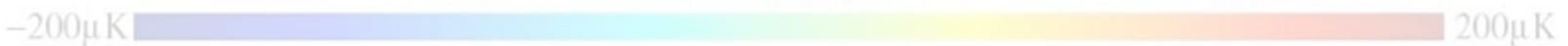
-200 μ K

200 μ 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...

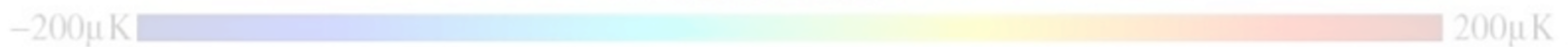
- ✓ Universo em expansão acelerada: $\Delta H_0 < 1\%$ 
- ✓ Existência de uma quantidade de matéria e energia escura várias vezes superior à matéria normal: $\Delta \Omega_M < 1\%$, $\Delta \Omega_\Lambda \sim 3\%$ 
- ✓ A RCF, a síntese de elementos leves e a expansão acelerada das galáxias são uma ótima evidência observacional para o MCP: $\Delta RCF < 0.001\%$, ΔX_{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 μ K  200 μ K



O "receituário" da Cosmologia de precisão

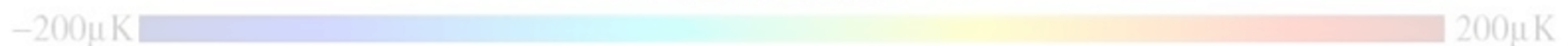
τ	$0,17 \pm 0,04$	t_{dec}	379×10^5 anos	Ω_{Λ}	$0,69 \pm 0,04$	H_0	$68 \pm 0,09$
t_{reion}	180×10^6 anos	z_{dec}	1089 ± 1	Ω_b	$0,045 \pm$ $0,0018$	CQ	4,4% bár. 22% DM 73% DE
t_0	$13,8$ $\times 10^9$ anos	Ω_T	$1,02 \pm 0,02$	Ω_m	$0,26 \pm 0,04$	s_8	$0,84 \pm 0,04$



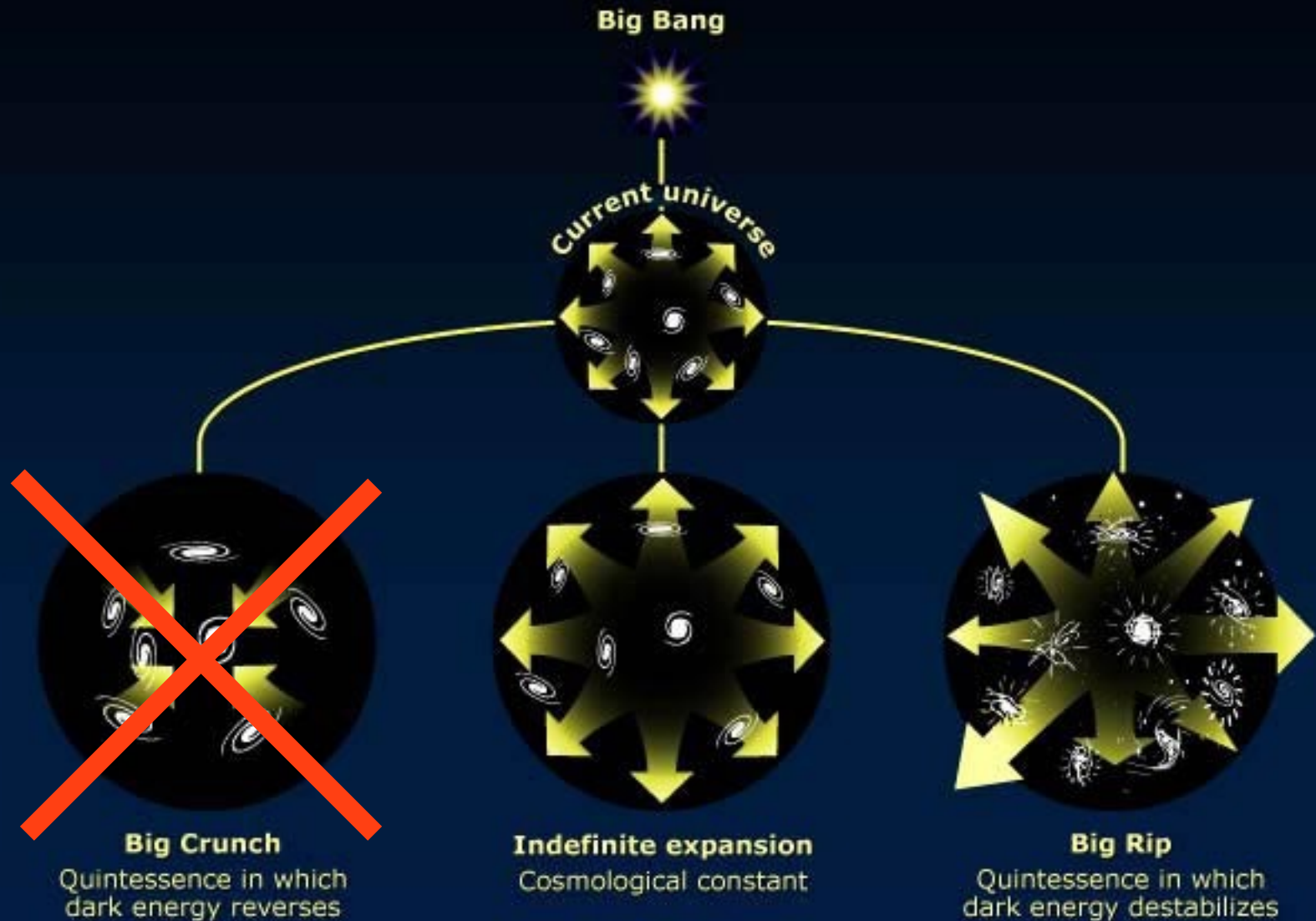


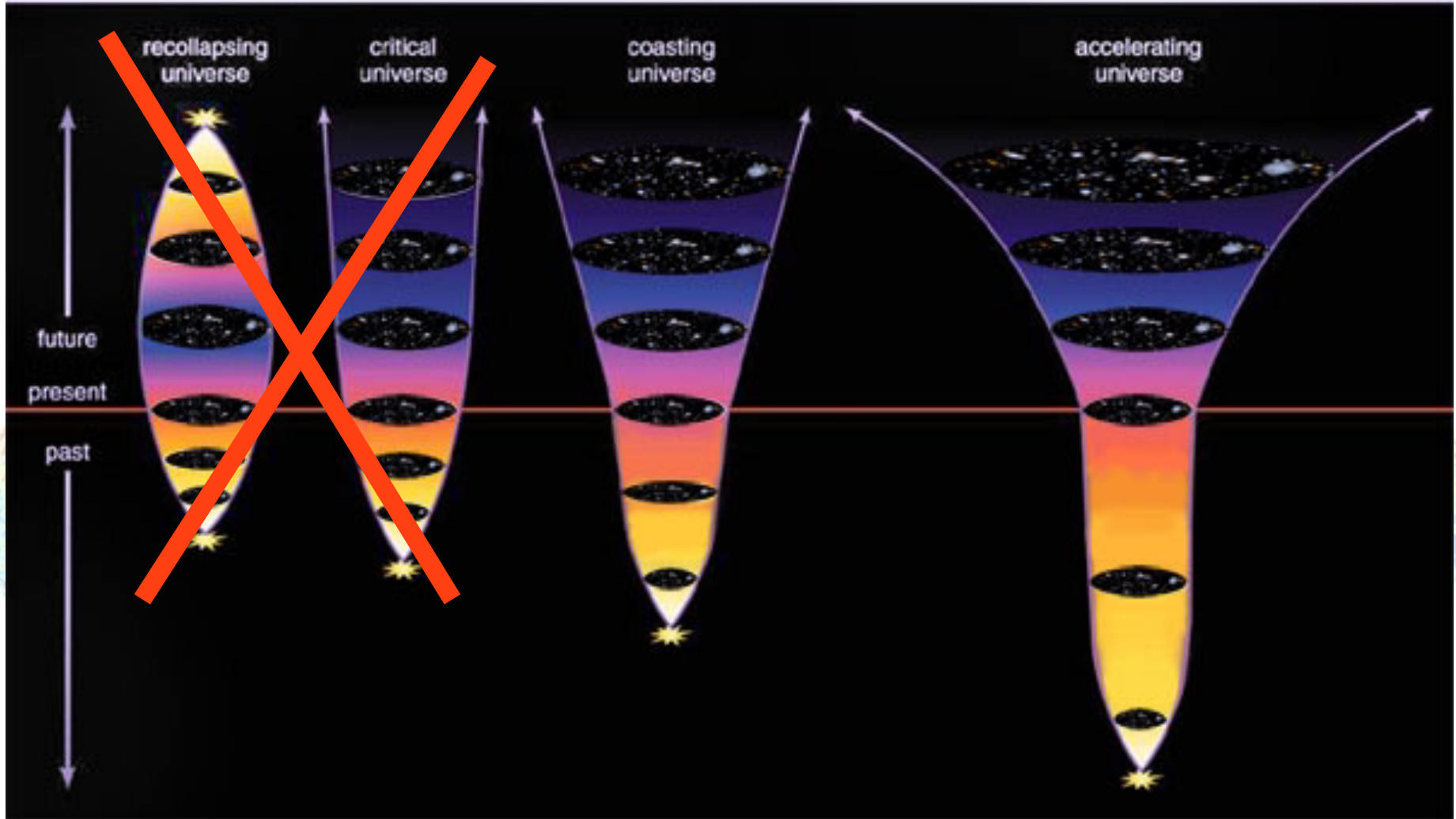
O destino do Universo

- 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

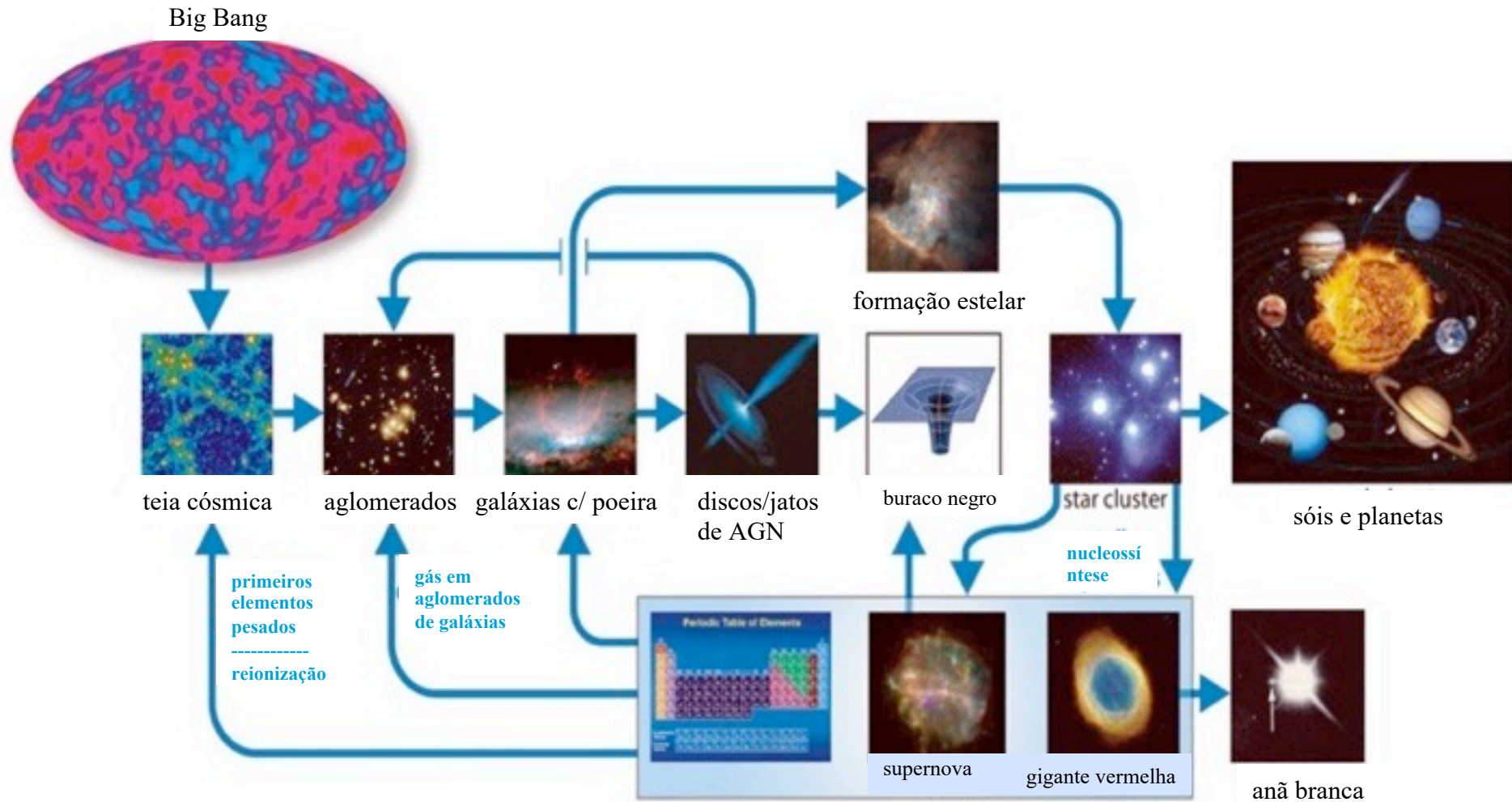


Future fates of the dark-energy universe





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 μ K

200 μ 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 μ K

200 μ 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





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**





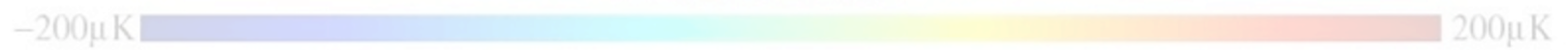
Conclusão

- 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)

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

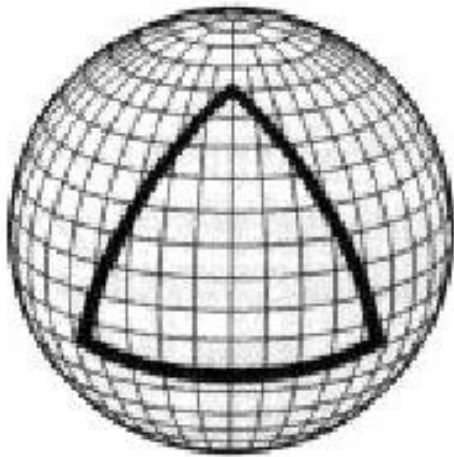
$$\Omega_{total} = \sum \Omega_i$$

Universo "Euclidiano" (plano)

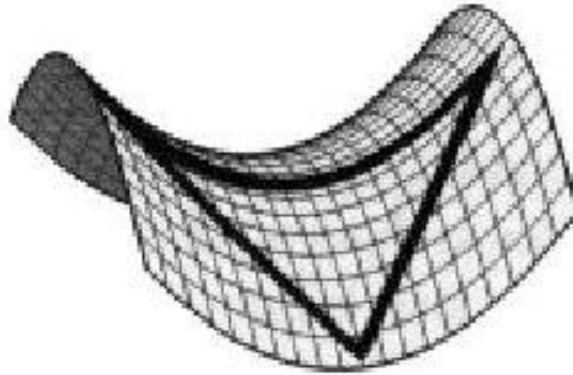
$$\Omega_0 = \frac{\rho_{total}}{\rho_{crit}} = \frac{8\pi G \rho}{3H_0^2} = 1$$

-200 μ K

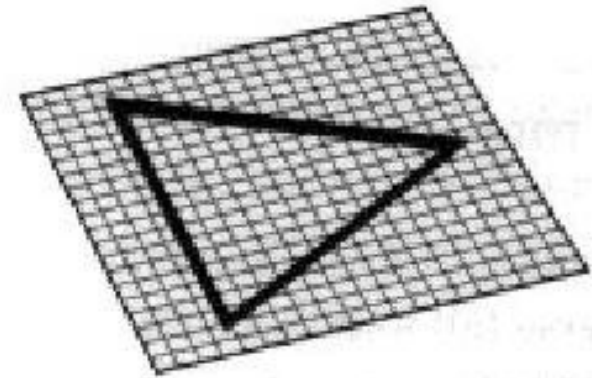
Geometria e topologia



Geometria fechada



Geometria aberta



Geometria plana

Curvatura
espacial
positiva

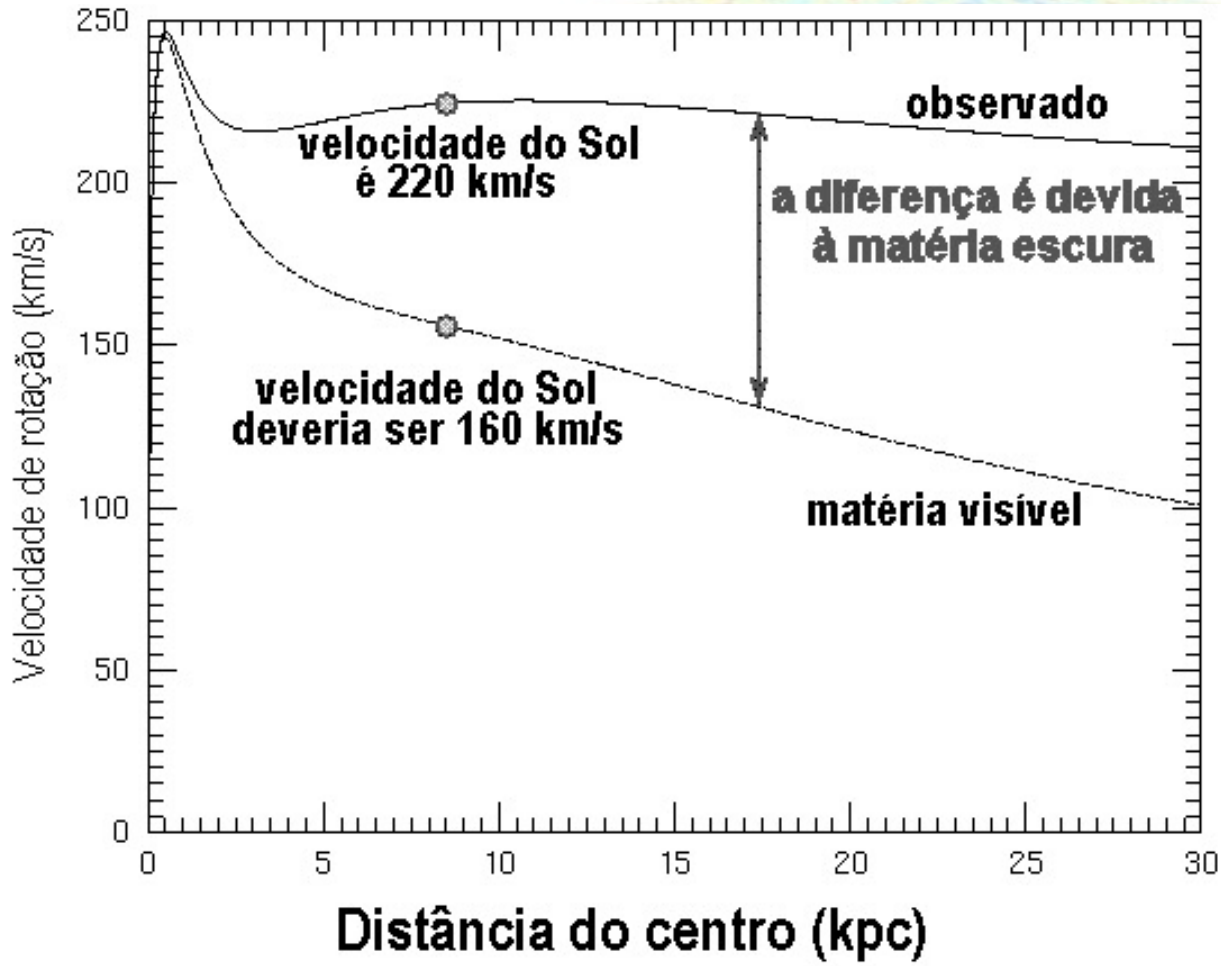
Curvatura
espacial
nula

Curvatura
espacial
negativa



De onde veio essa idéia estranha?

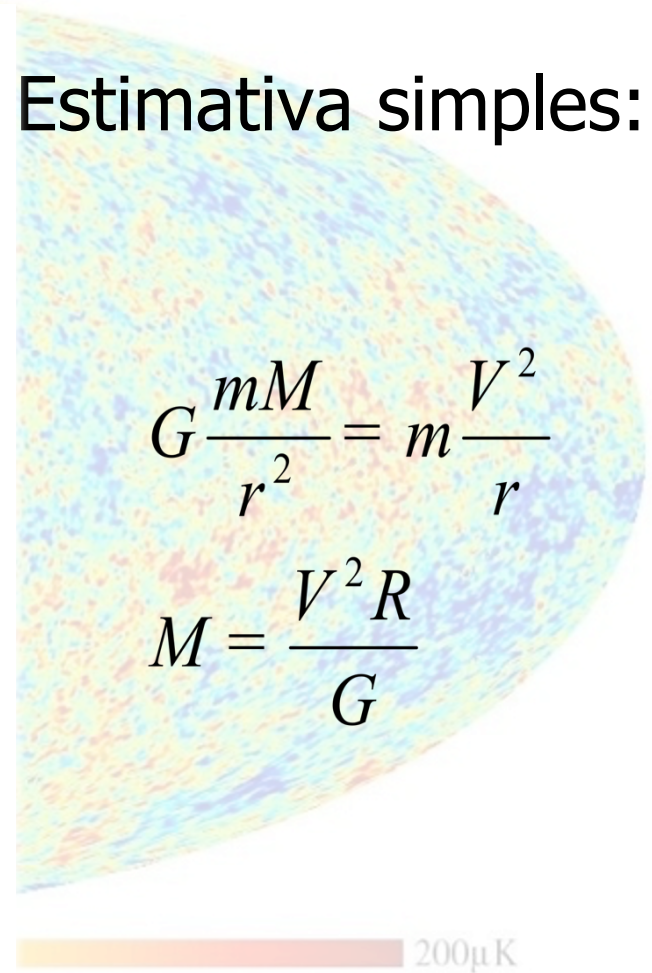
Das curvas de rotação de galáxias!!!



Estimativa simples:

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

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



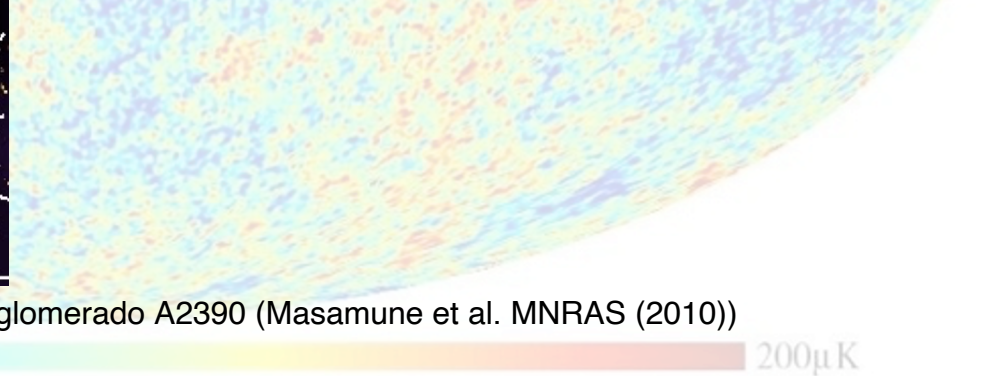
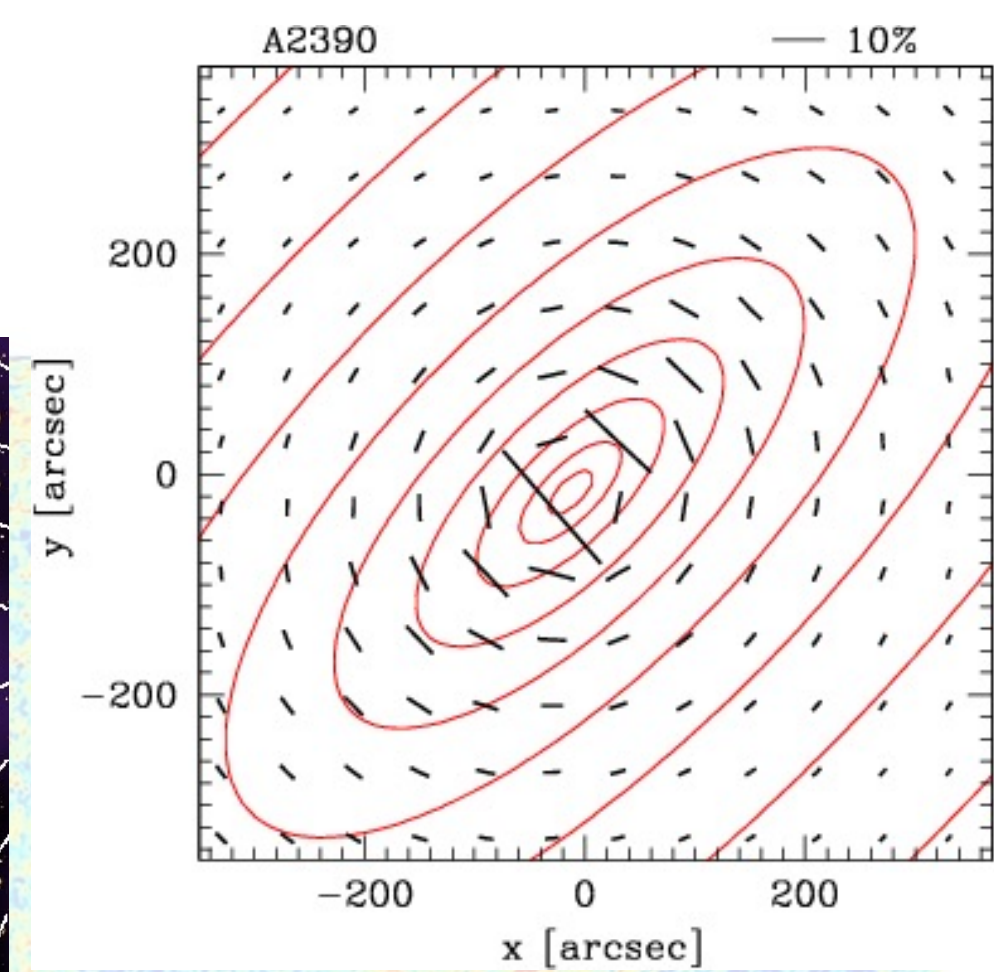
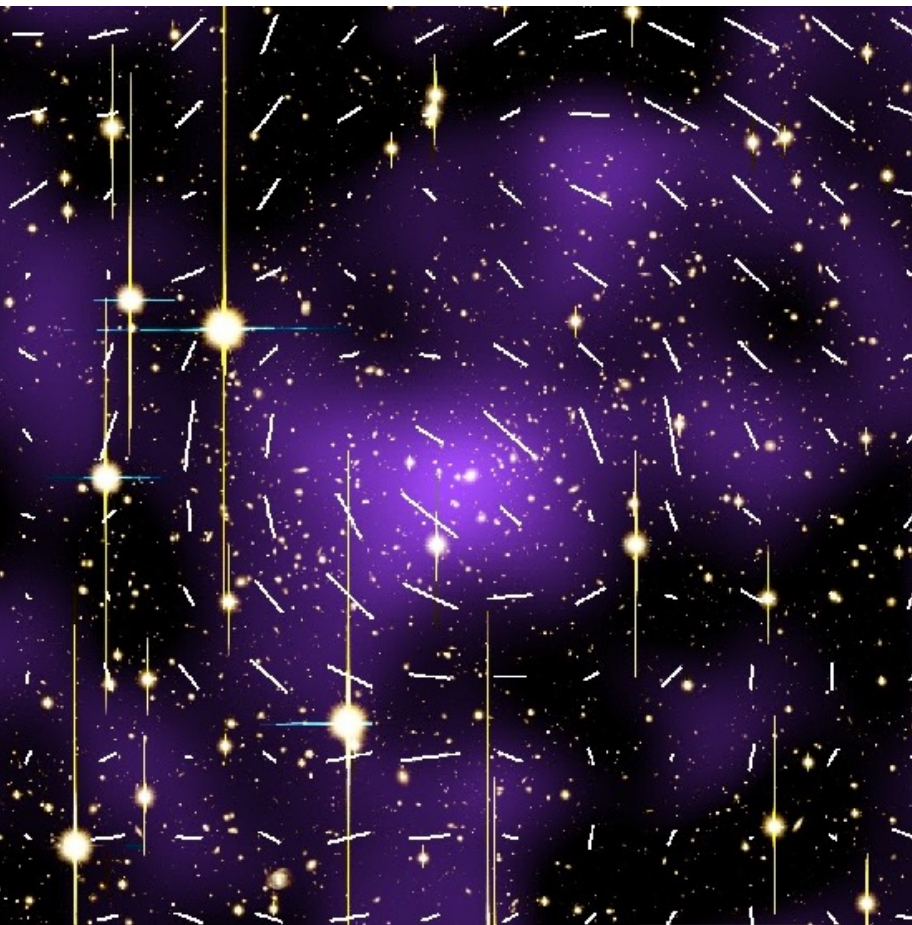
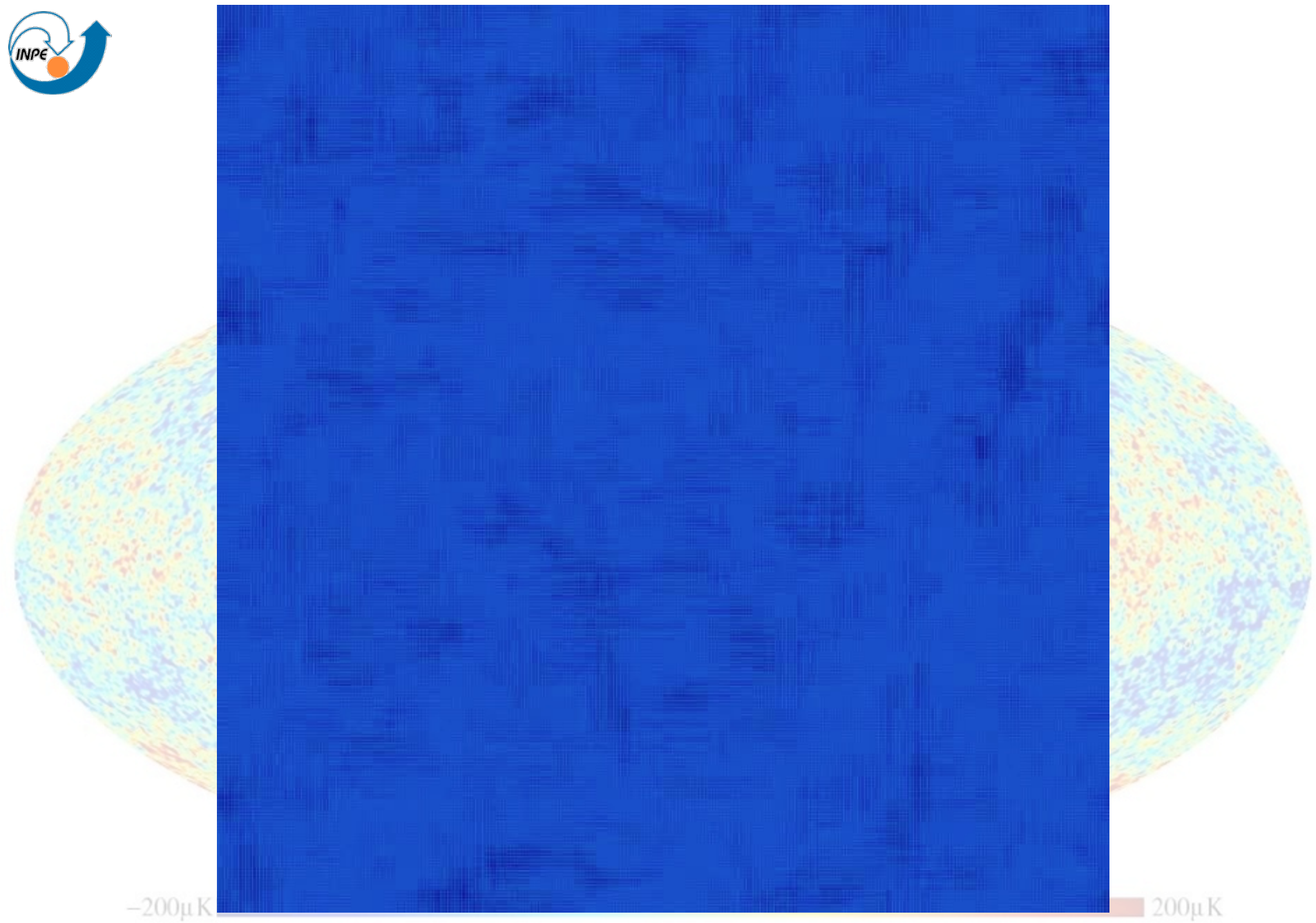


Imagem e mapa de contorno de densidade do aglomerado A2390 (Masamune et al. MNRAS (2010))

-200 μK 200 μK





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)

