



A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas e a Origem do Universo

Carlos Alexandre Wuensche
INPE - Divisão de Astrofísica
ca.wuensche@inpe.br

67a. Reunião Anual da SBPC
UFSCar – São Carlos, SP
16/07/2015



67^a REUNIÃO ANUAL DA SBPC
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
12 a 18 de julho de 2015
São Carlos - SP - Brasil
www.sbpcnet.org.br/soccarlos

UFSCar

LUZ, CIÊNCIA E AÇÃO



LUZ
para poetas

27 de outubro a
8 de dezembro
de 2015

A **LUZ** é o observável que, desde tempos imemoriais, permitiu que os antepassados do Homo Sapiens pudessem admirar-se da beleza e da atemporalidade do Cosmos, que permitiu a transformação do tempo cronológico num tempo mítico.

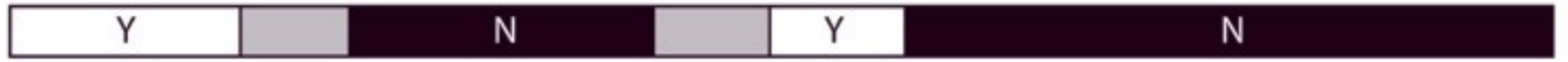
No início de cada novo Ano Solar a Cosmogonia é reiterada e o Universo, recriado, permitindo um eterno retorno às origens com a volta da **LUZ** no Equinócio de Primavera.

67ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
12 a 18 de julho de 2015
São Carlos - SP - Brasil
www.sbpnet.org.br/saocarlos

LUZ, CIÊNCIA E AÇÃO

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Penetrates Earth Atmosphere?



Wavelength (meters)



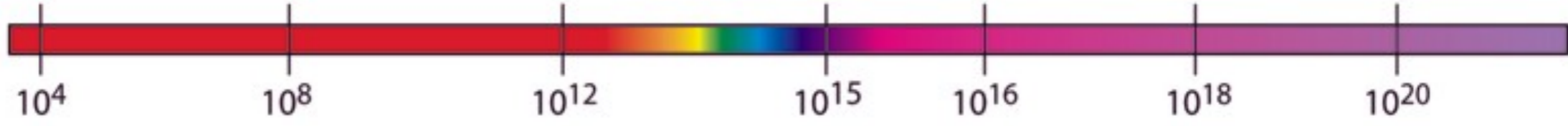
10^3 10^{-2} 10^{-5} $.5 \times 10^{-6}$ 10^{-8} 10^{-10} 10^{-12}

About the size of...

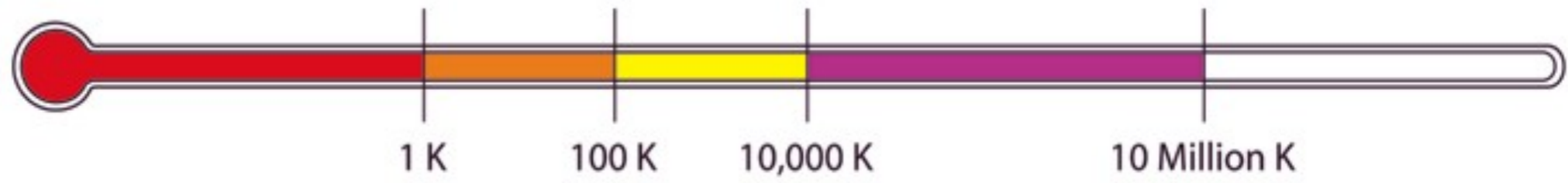


Buildings Humans Honey Bee Pinpoint Protozoans Molecules Atoms Atomic Nuclei

Frequency (Hz)

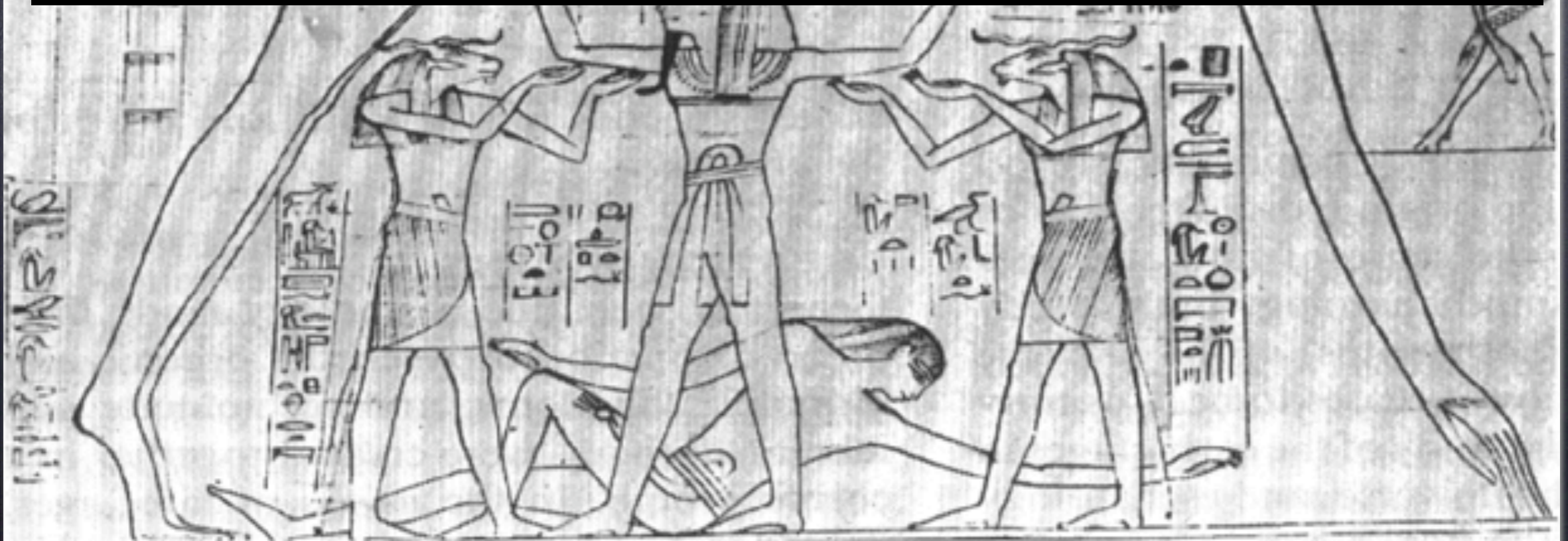


Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



Uma visão do Universo por volta de 2000 a.C.

O deus-sol Ra criou a si mesmo, juntou-se a sua sombra e tornou-se pai de gêmeos, Shu, o deus do ar, e Telnut, a deusa da chuva. Shu e Telnut uniram-se e também tiveram gêmeos, o deus-terra Geb e a deusa-céu Nut. Geb e Nut por sua vez uniram-se, mas o avô, Ra, zangado e ciumento ordenou que Shu os separasse e que mantivesse Nut bem acima da Terra, como convém a uma deusa-céu. Desde então, Nut toca a Terra somente com as pontas de seus dedos das mãos e dos pés. Sua barriga, coberta de estrelas, que são seus filhos, formam o arco do firmamento.



O tempo de Ptolomeu



O modelo Ptolomaico, com as esferas concêntricas, e as “estrelas distantes” como o limiar do Universo, predominou por mais de 1000 anos.

Uma visão do Universo por volta de 1000 d.C.

Nessa época os modelos de Universo consideravam que a Terra estava no centro de tudo e que o céu era uma tampa com buracos. A luz proveniente de fogos ardendo no lado de fora brilharia através dos buracos e alcançaria a Terra como a luz das estrelas.

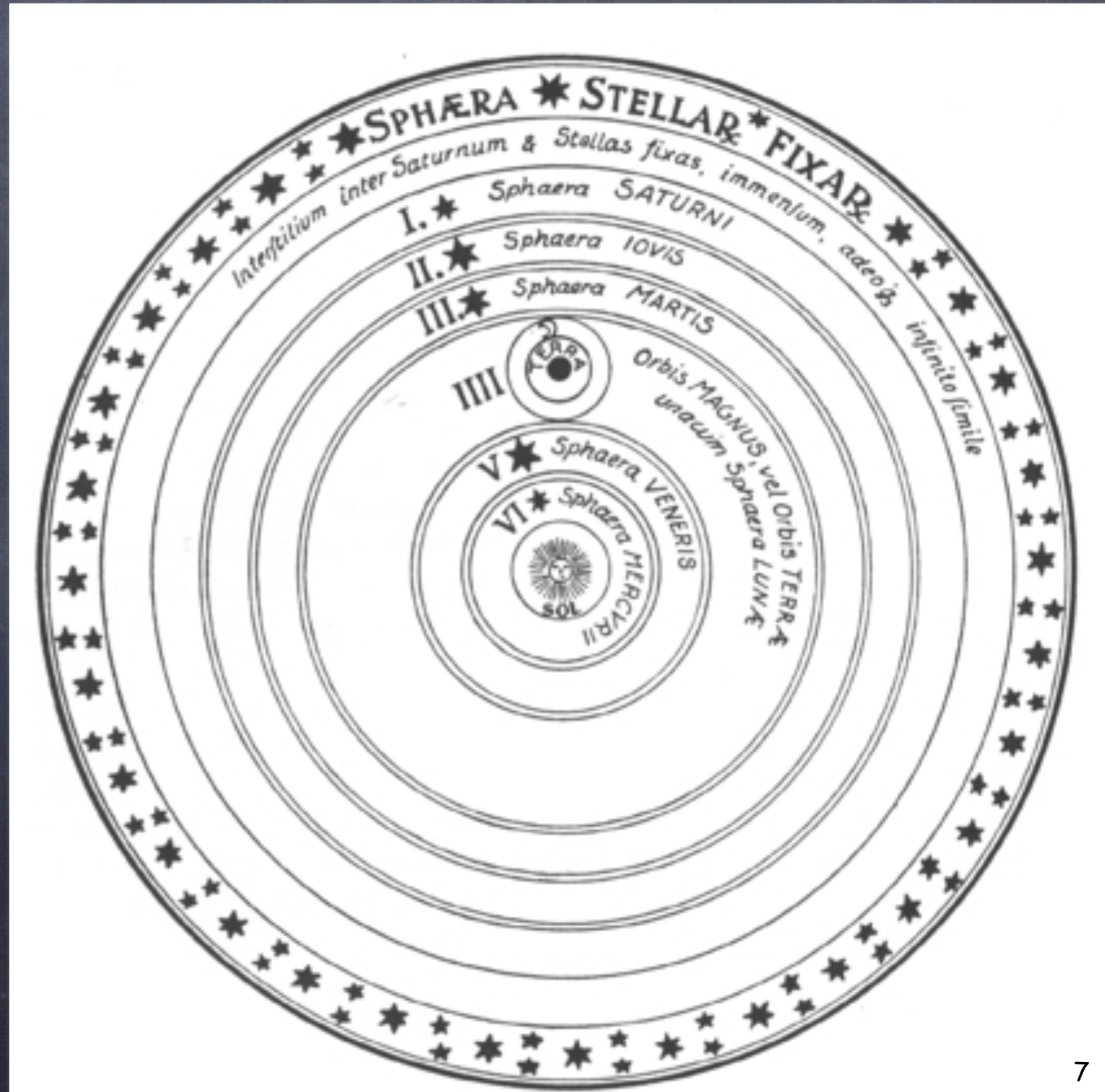




Uma visão do Universo por volta de 1500 d.C.



Nicolau Copernico
(1473 - 1543)





Uma visão do Universo por volta de 1900 d.C.

Composição: estrelas
Organização:

Sistema Solar



30.000 anos luz

Origem: ?

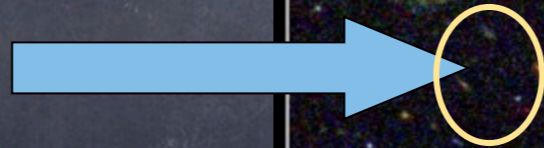
William Herschel
(1738-1822)



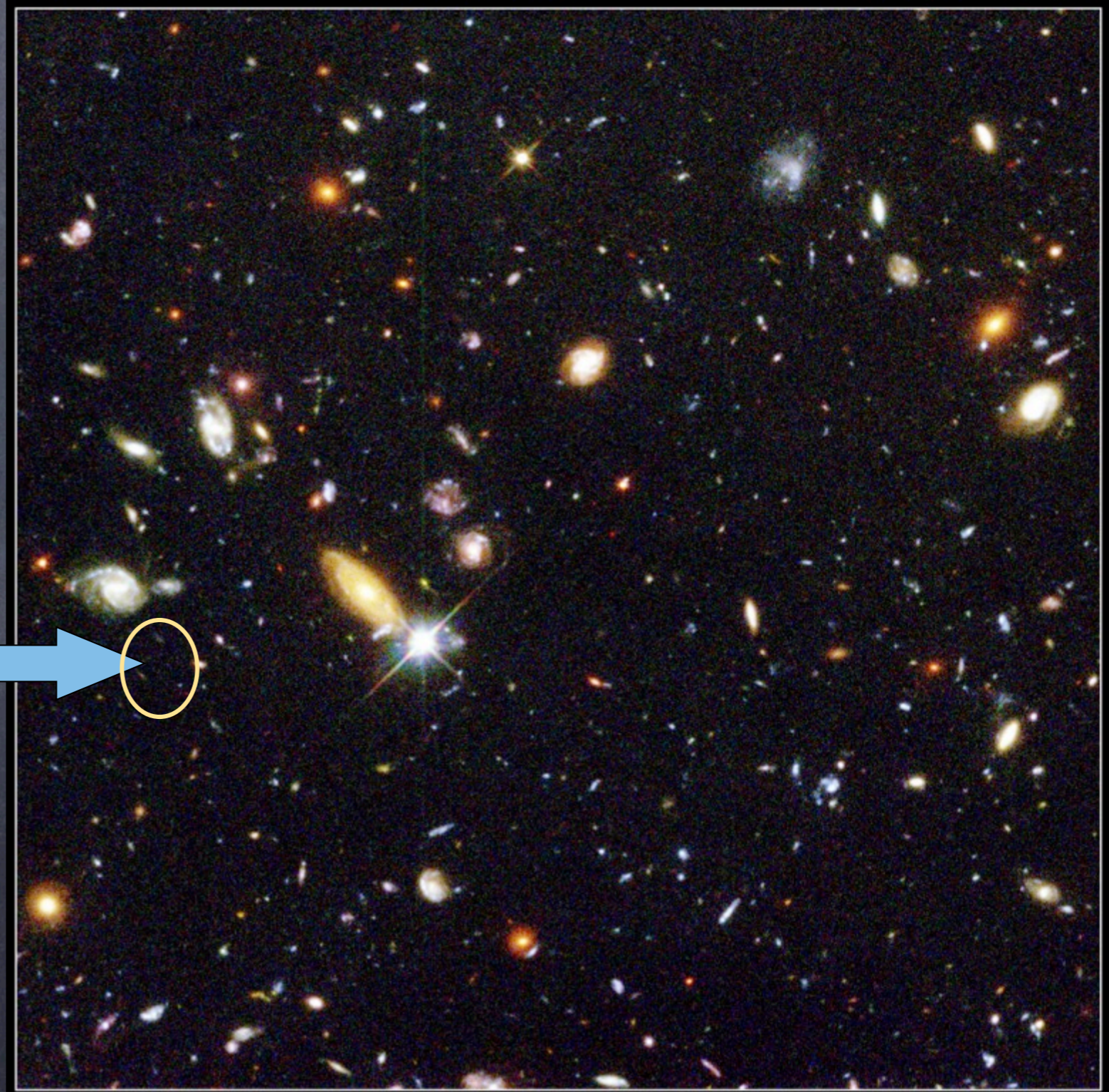
Uma visão do Universo no séc. XXI

Hubble Deep Field
(www.nasa.gov)

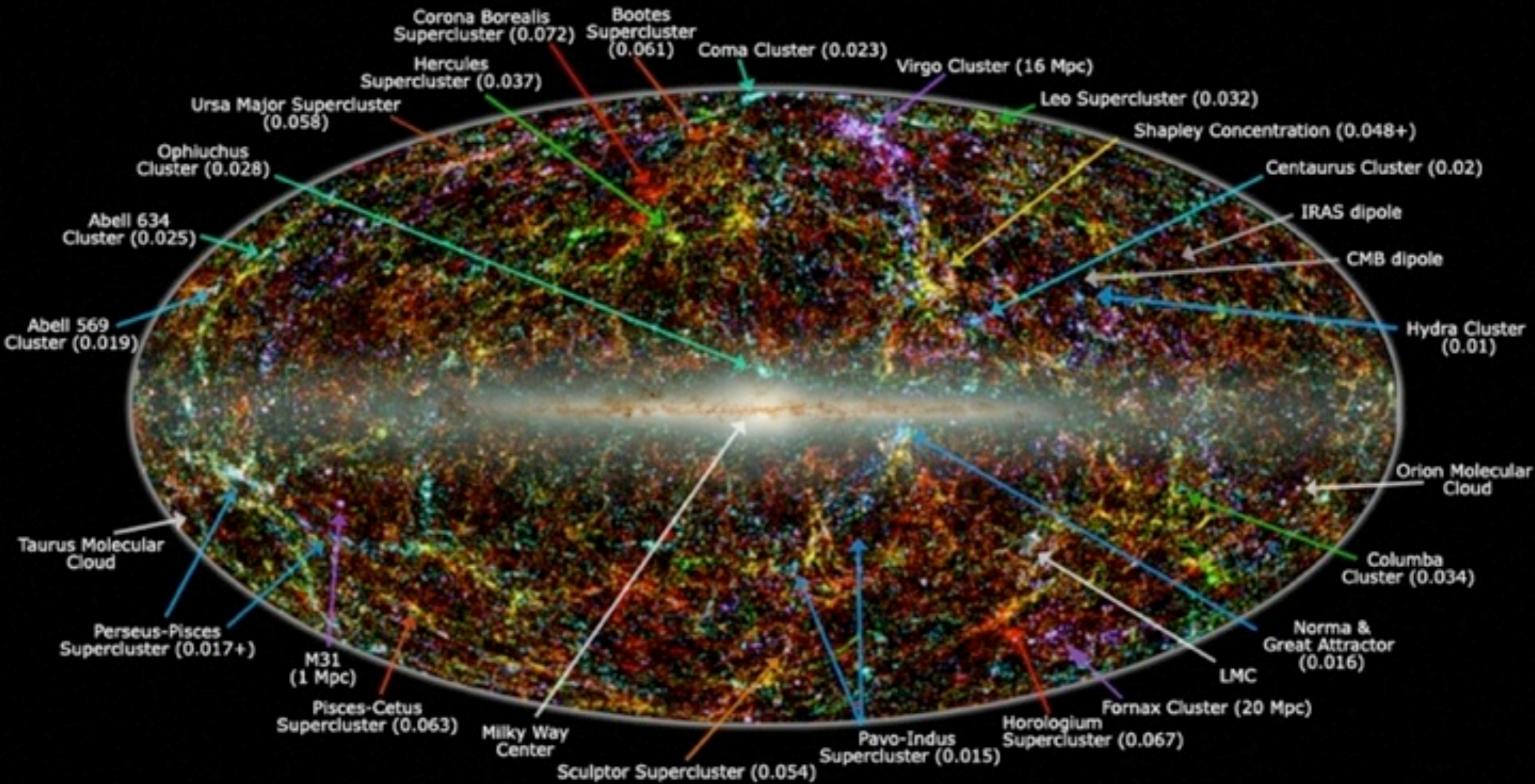
30.000 galáxias aqui



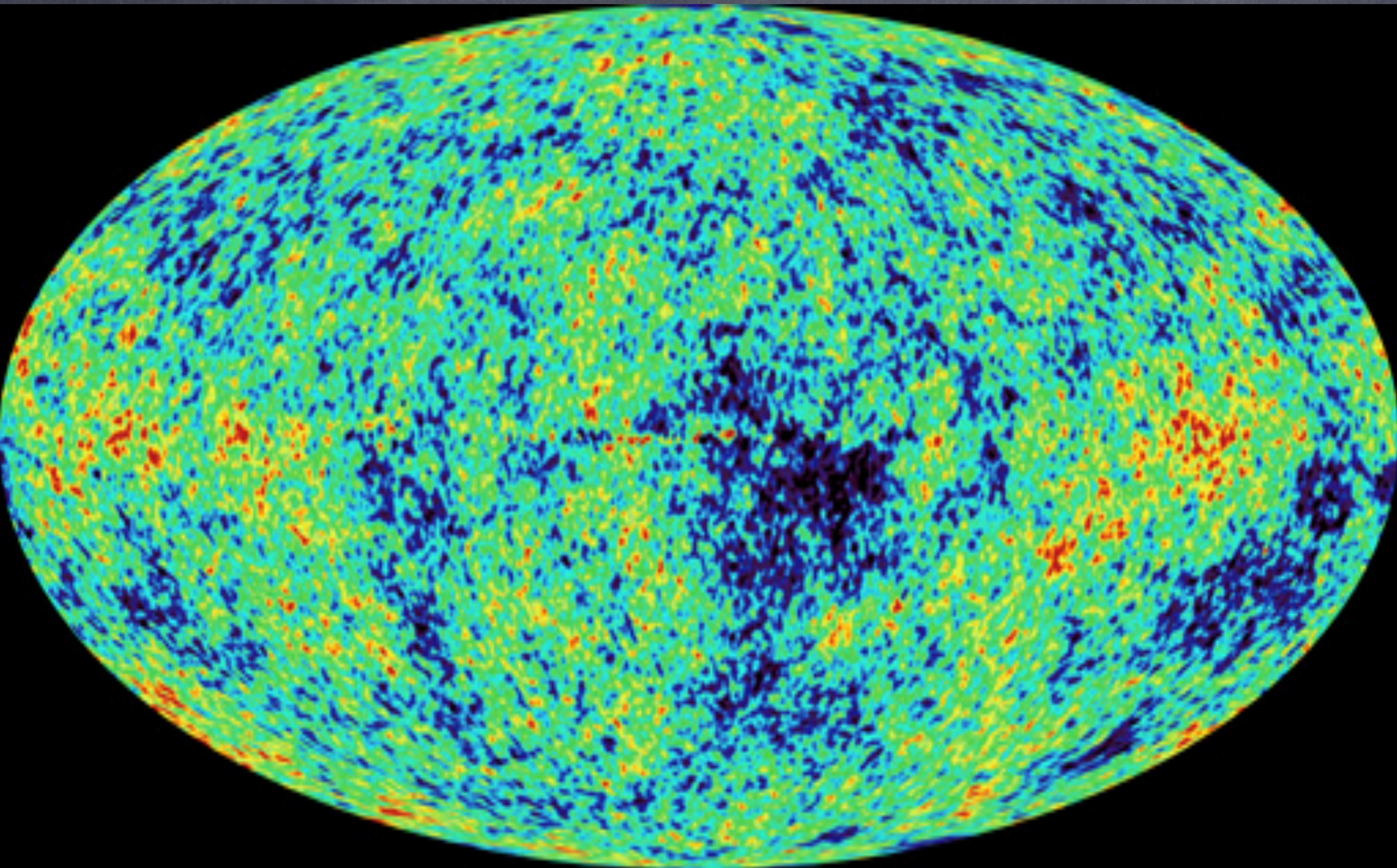
100 bilhões
em todo o céu



Large Scale Structure in the Local Universe



Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)



COSMOLOGY MARCHES ON



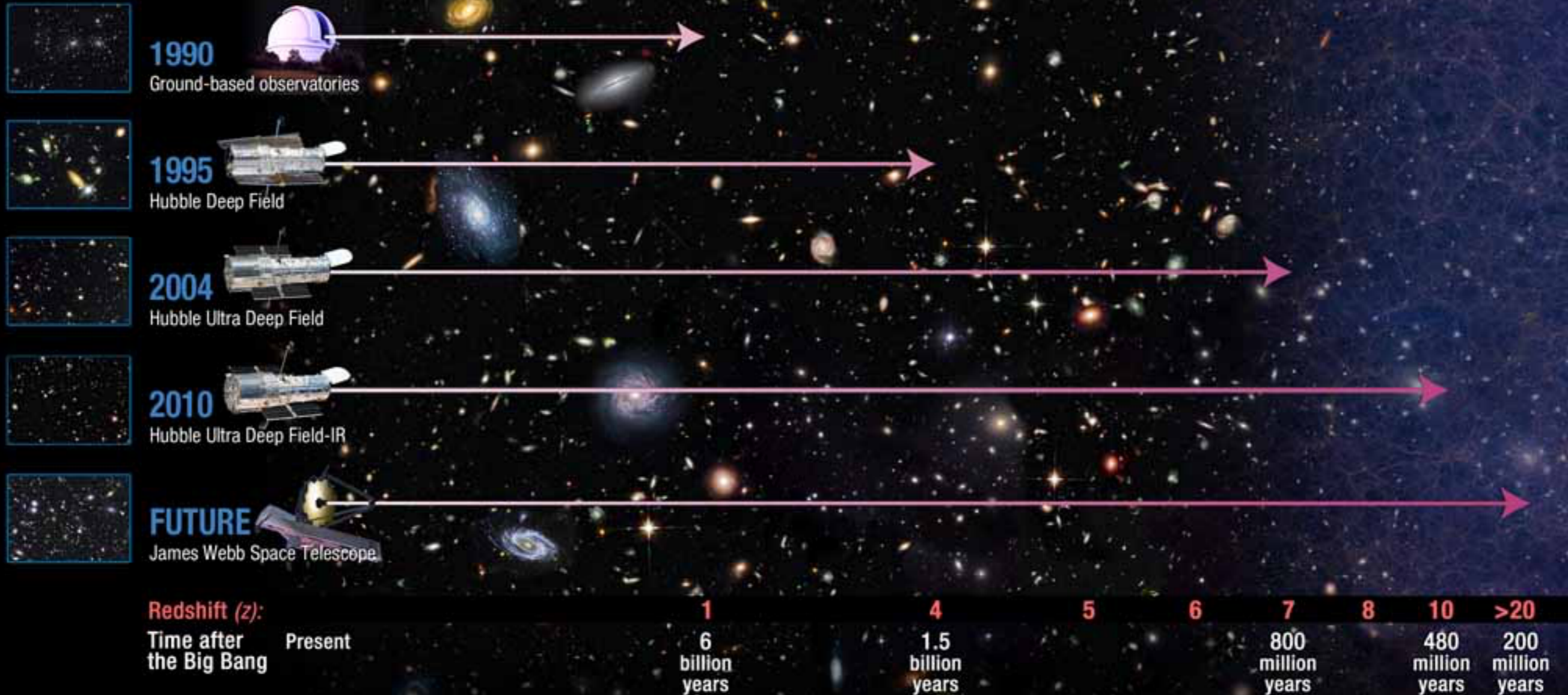


O que é Cosmologia?

- ✓ Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo
- ✓ Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro.
- ✓ Principais ferramentas utilizadas: Física, Astronomia, Matemática, Química, Filosofia.
- ✓ Problemas... é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos.

Luz: a "régua" cósmica!

Image credit: NASA





Astrofísica em diferentes frequências

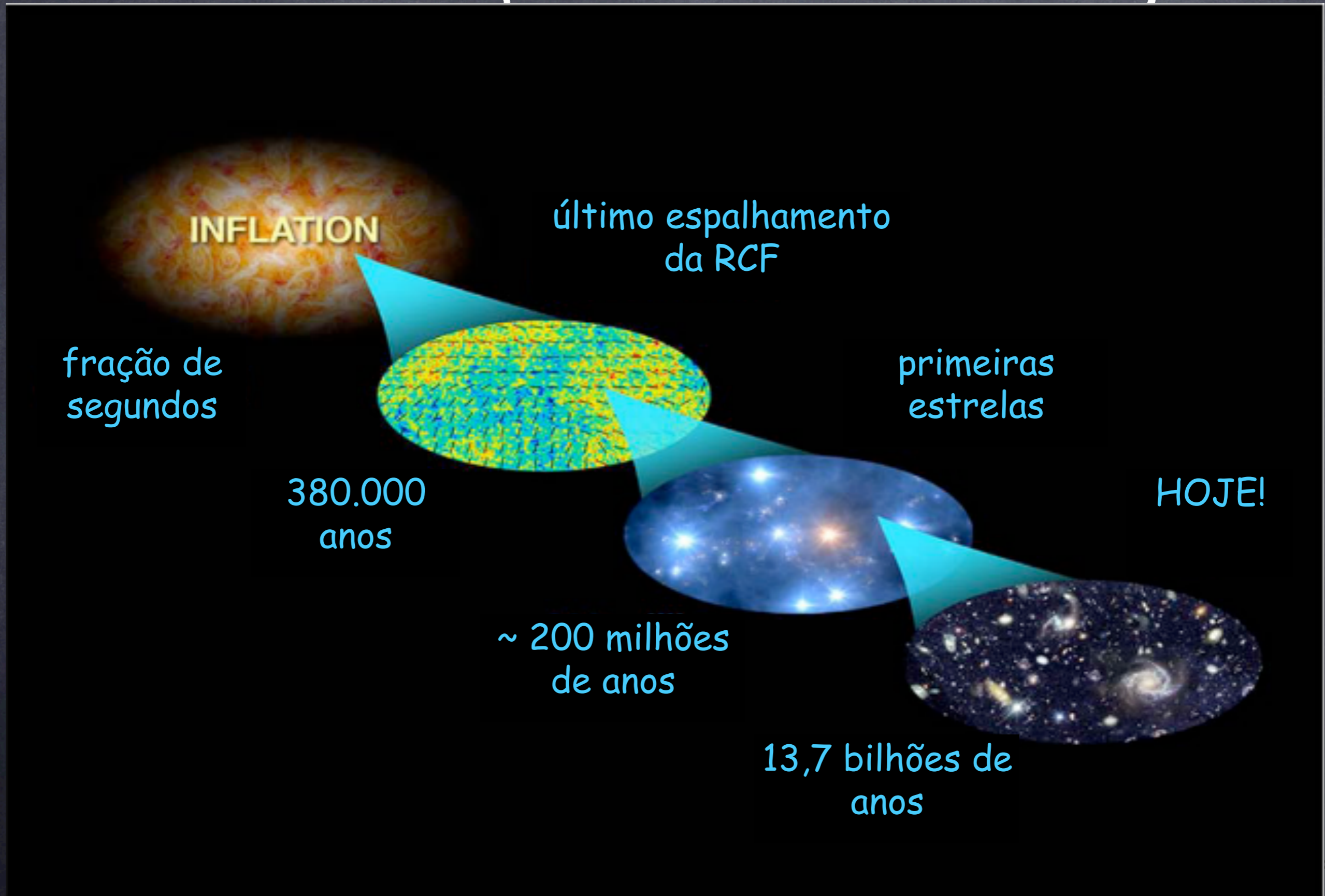


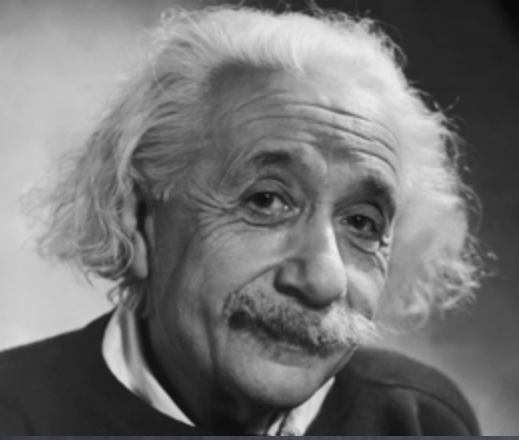
<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

Observações em Cosmologia





Albert Einstein

O Modelo Cosmológico Padrão - MCP



Alexander Friedmann

- ☑ A cosmologia moderna parte de algumas hipóteses de trabalho.
 - ✓ As leis da Física, válidas no laboratório e no Sistema Solar, valem também para o resto do Universo.
 - ✓ As leis da Física não variam no tempo, podendo ser extrapoladas para o passado.

Princípio de Copérnico: não ocupamos um lugar privilegiado, somos observadores comuns

Princípio Cosmológico: o Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico.

Isotropia local + homogeneidade = isotropia global

Gravitação é dominante em escalas astronômicas!!!!



Bases do Modelo Cosmológico

Padrão: "Hot Big Bang"

- ✓ Teoria da Relatividade Geral
- ✓ Princípio Cosmológico
- ✓ Suposição de um início quente e denso para o universo
- ✓ "Explosão" inicial ("big bang")

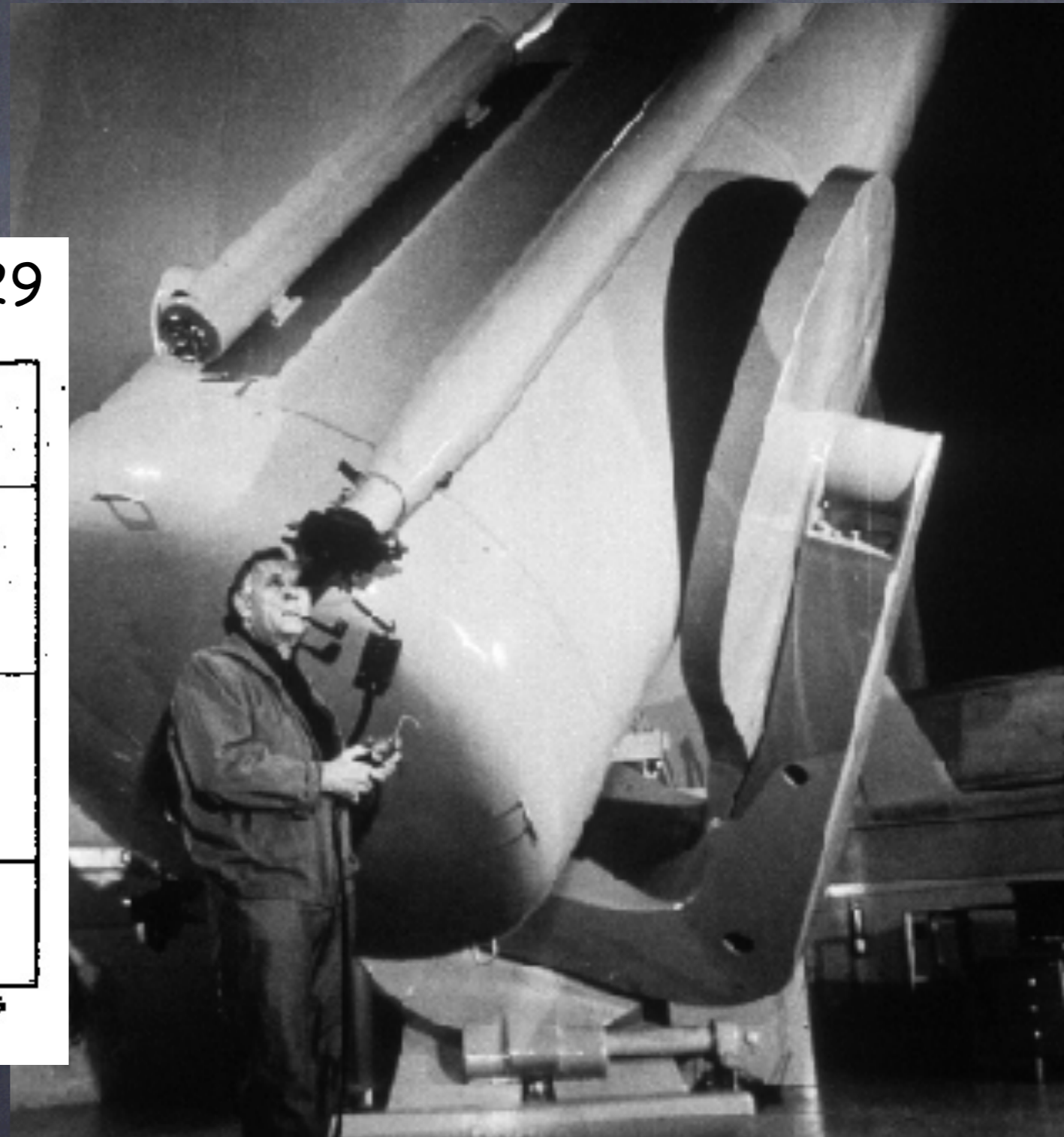
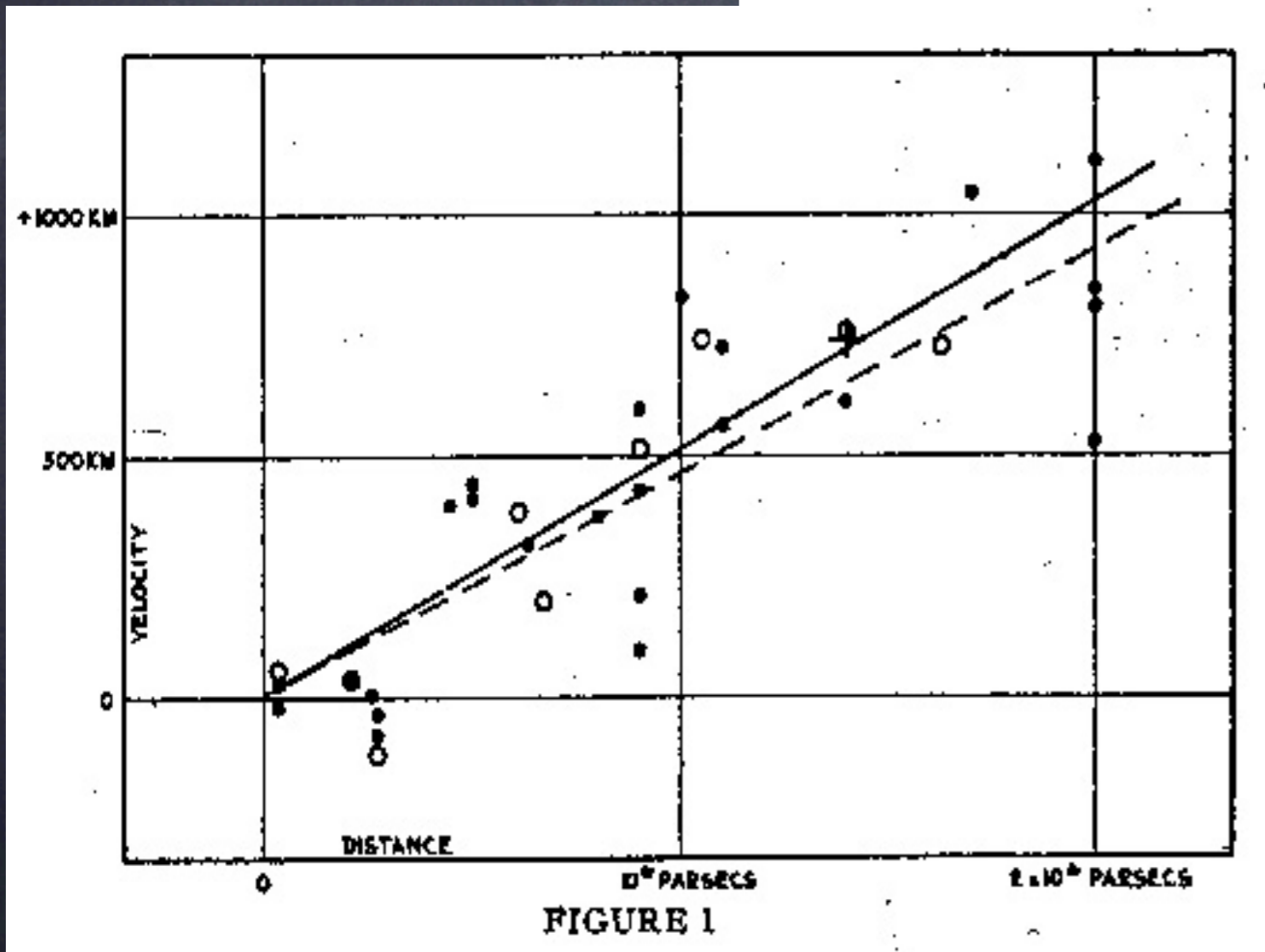
Evidências observacionais a favor do "Big Bang"

1. Expansão do universo ("Lei de Hubble": $v = H \cdot d$)
2. Abundância de elementos leves
3. Radiação cósmica de fundo de 2,7 K

1

A expansão do Universo

Hubble - 1929

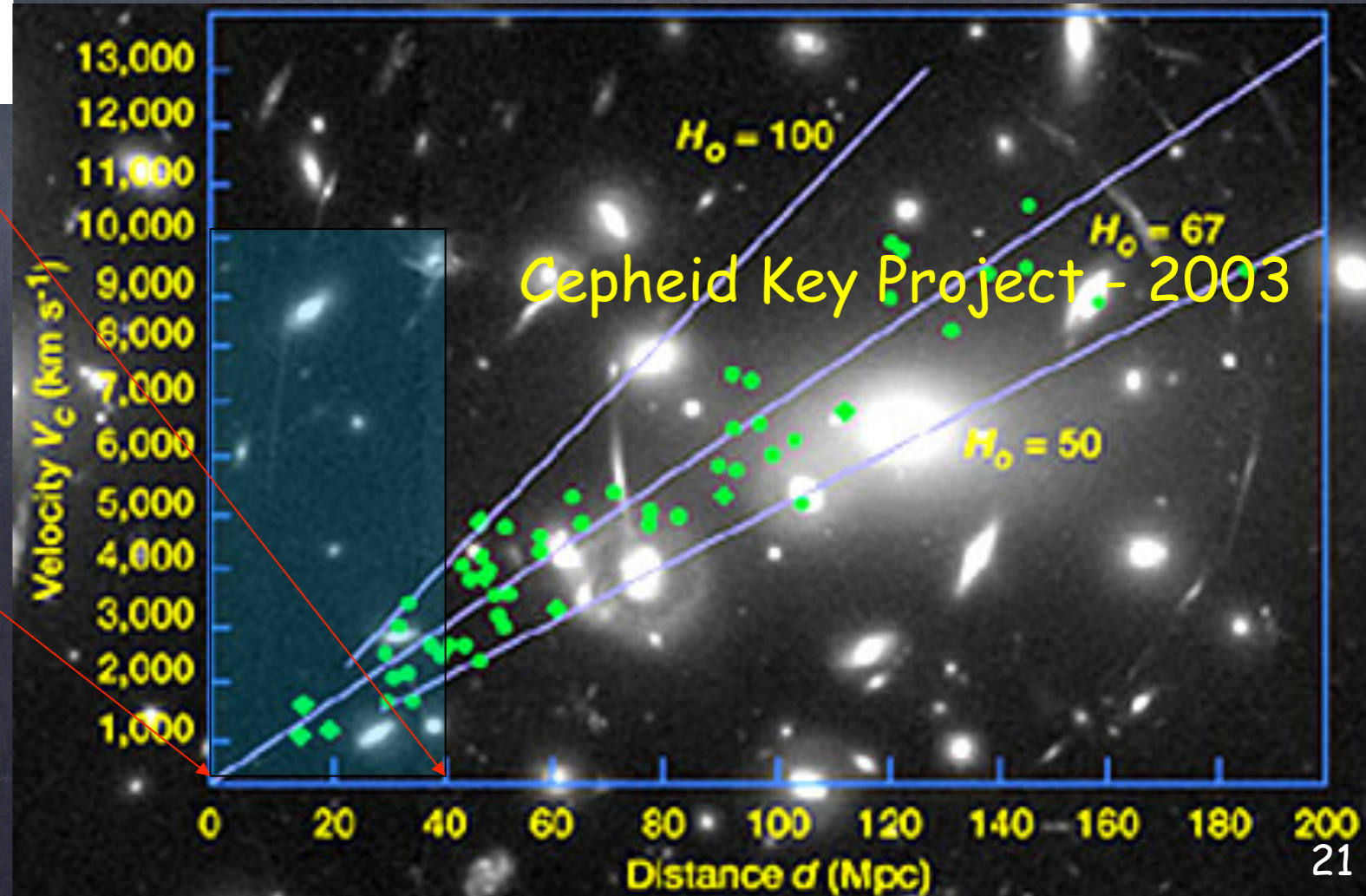
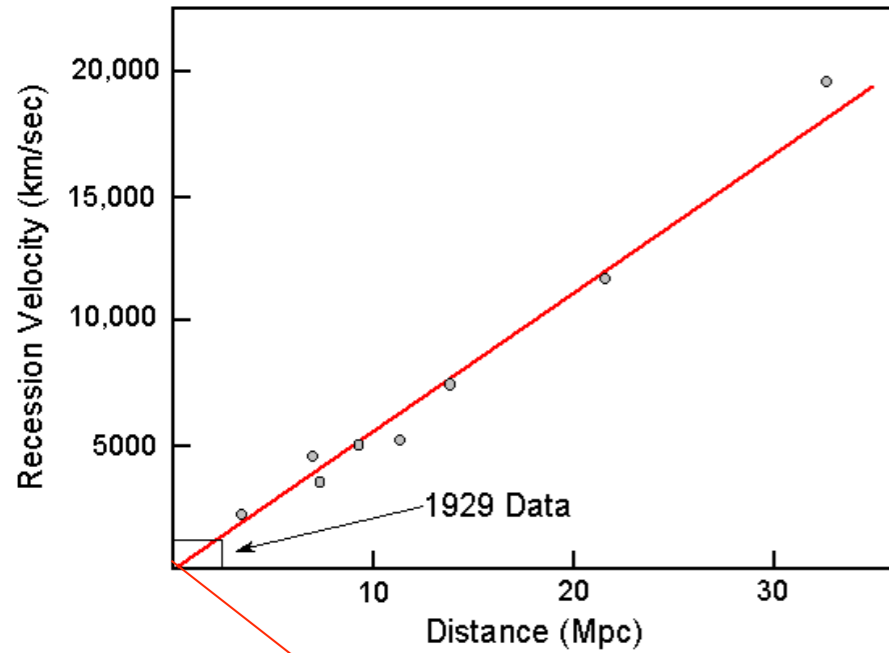


Lei de Hubble: $v = H_0 d$



A expansão do Universo

Hubble & Humason (1931)





"Ill tell you what's beyond the observable universe -- lots and lots of unobservable universe."





A formação de elementos leves



Alpher

Bethe

Gamov

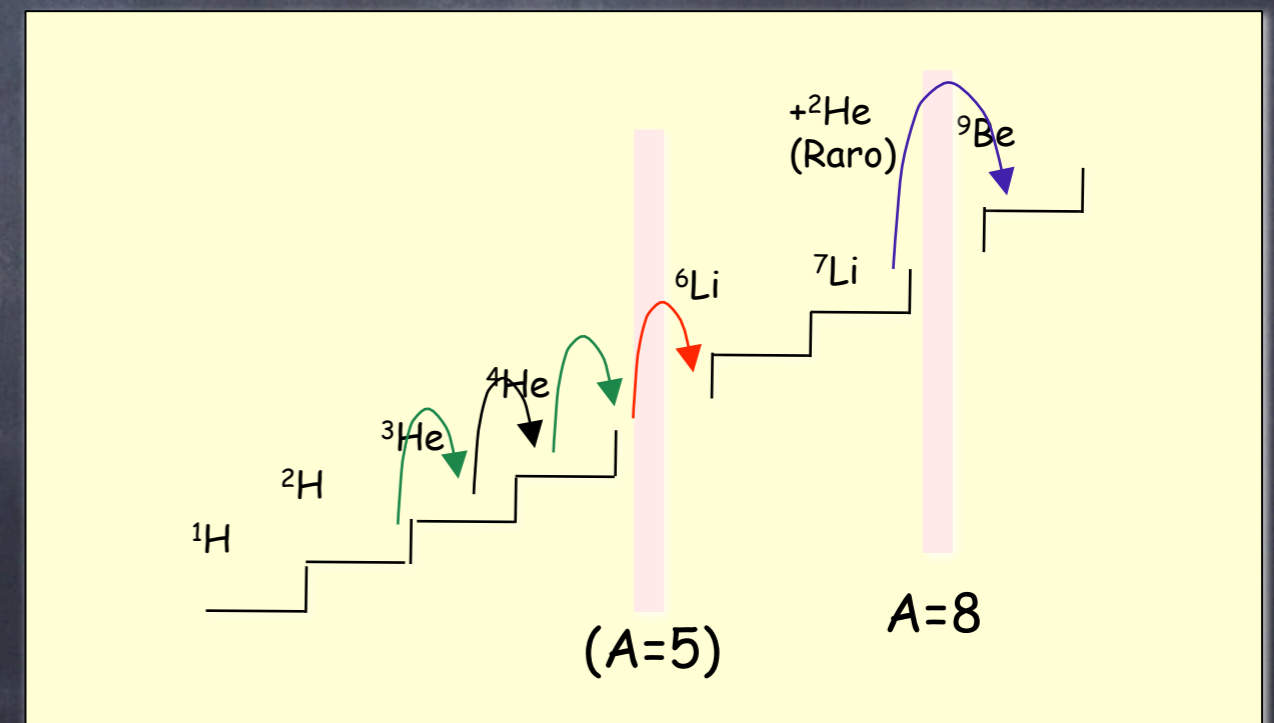
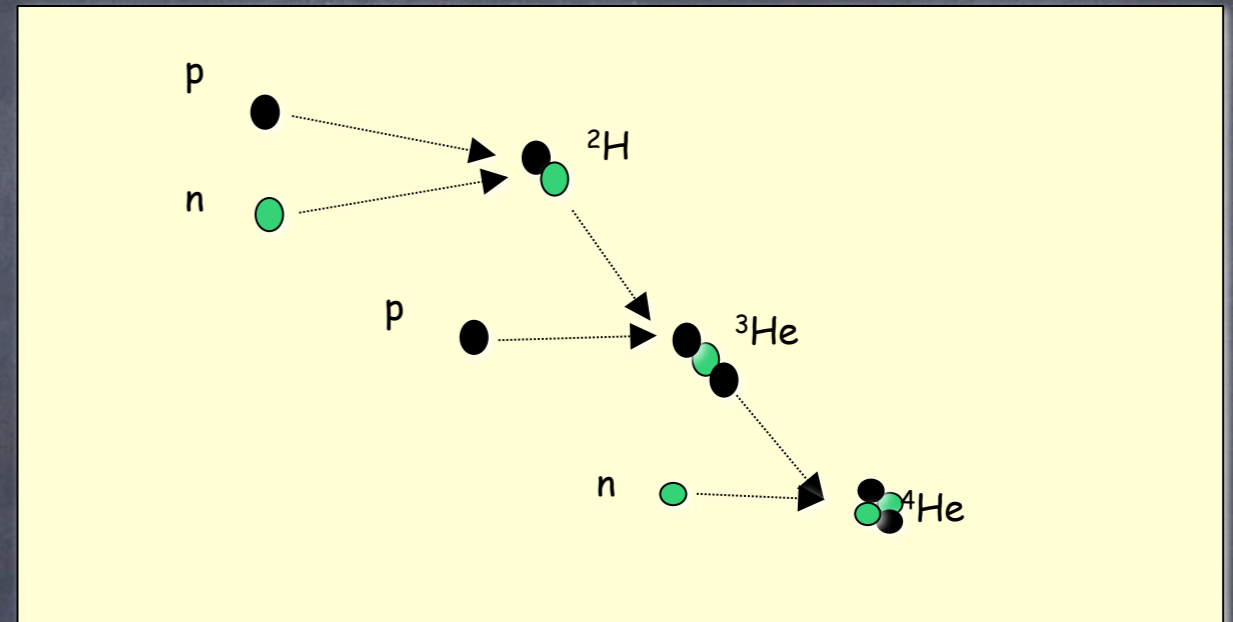
Em 1946, Alpher, Bethe e Gamov sugeriram a possibilidade de que todos os elementos químicos teriam sido gerados através de uma longa cadeia de captura de nucleons em **um Universo primordial em expansão** e que estaria esfriando

De fato, não é possível gerar todos ...



A formação de elementos leves

- Nucleosíntese Primordial
- Previsões da teoria:
- Forma, essencialmente, Hidrogênio e Hélio
- Forma, em muito menor quantidade, ^2H , ^3He , Li.
- Depende da razão entre prótons e neutrons na época e da taxa de decaimento do neutron.

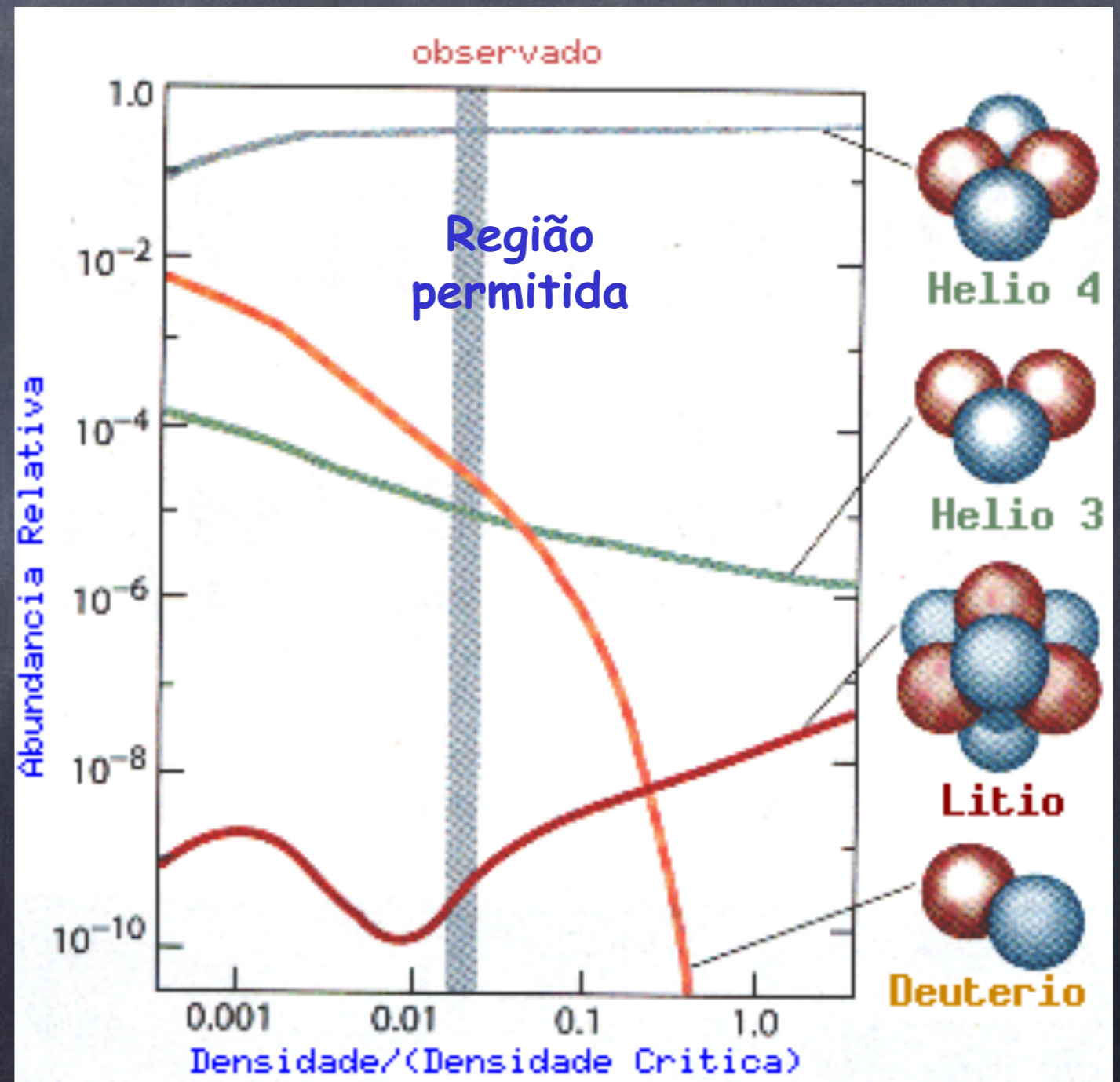


Previsões baseadas em física bem conhecida



A formação de elementos leves

As observações estão em excelente acordo com as previsões teóricas, dando o apoio necessário ao Modelo Cosmológico Padrão



A TABELA PERIÓDICA DOS ASTRÔNOMOS

(Ben McCall)



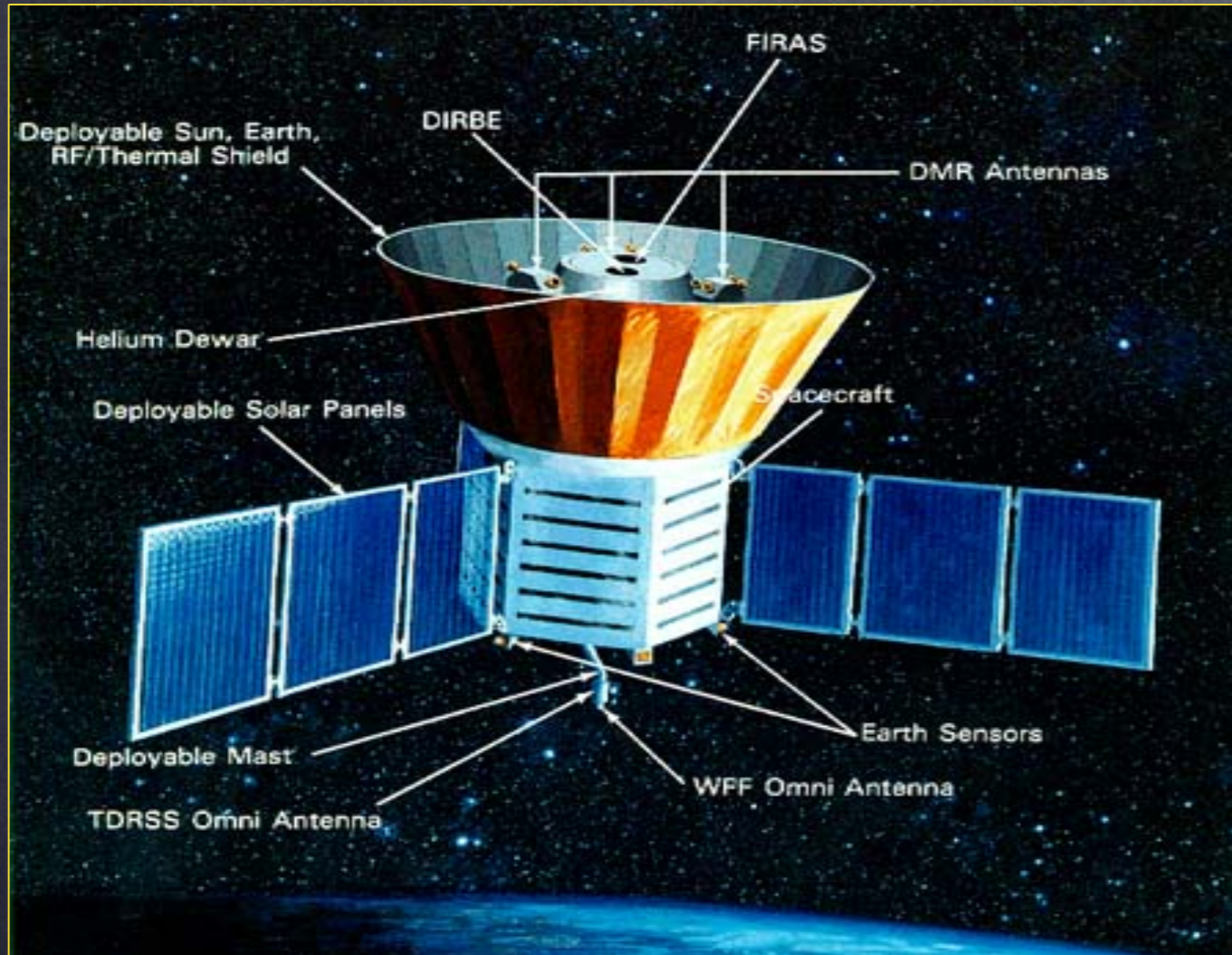
▫
Mg

▫
Fe

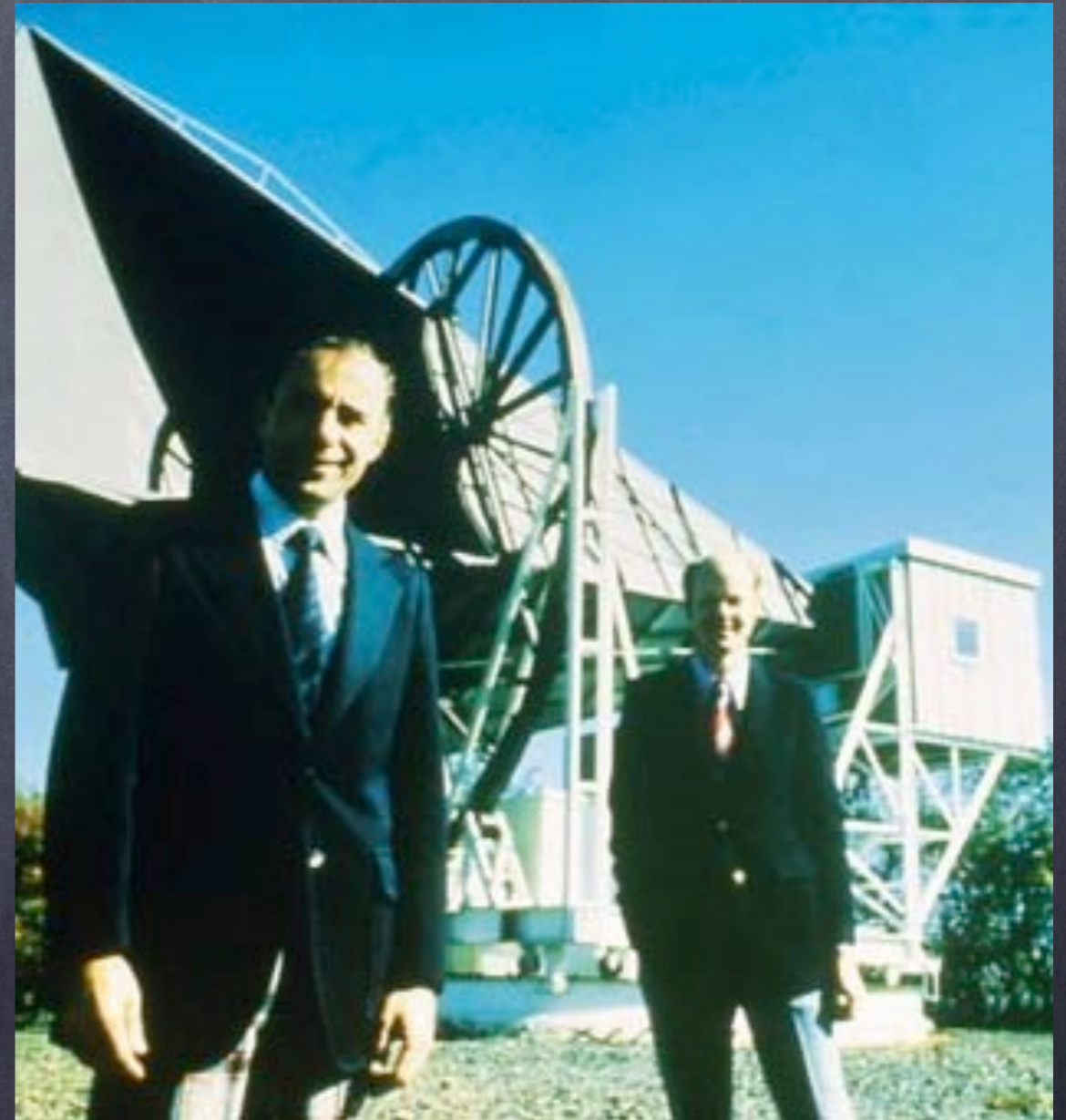
▫	▫	▫	▫
C	N	O	Ne
·	·	·	·
Si	S	Ar	

3

A Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCF)



COBE (1989 - 1994)



A. Penzias e R. Wilson



O que é a RCF?

- ❑ Sinal eletromagnético mais antigo que se pode observar
- ❑ "Retrato" do Universo ~ 380.000 anos após o BIG BANG
- ❑ Espectro de **corpo negro** com temperatura
 $T = 2,725 (\pm 0,001) \text{ K}$
- ❑ Flutuações de temperatura ($\Delta T \sim 10^{-5} \text{ K}$) na RCF, ligadas às flutuações de densidade primordial, revelam detalhes da física da formação de estruturas do Universo
- ❑ Características observáveis: distribuição espectral, distribuição angular e polarização



Alguns números sobre a RCF...

□ $P_{\text{RCF}} \sim 10^{-18} \text{ W}$

0,0000000000000000000000000000001 lâmpada de 100 W!!!

□ $\rho = 4,6417 \times 10^{-34} (T / 2,725) \text{ g.cm}^{-3}$

0,001 cm^{-3} de água!!!

□ Velocidade do Sol em relação à RCFM = $369,3 \pm 2,5 \text{ km.s}^{-1}$

□ $n = 410,50 (T/2,725)^3 \text{ cm}^{-3}$

1 em cada 3 fótons da TV aberta vem da RCF!!!



1933

1964

1992

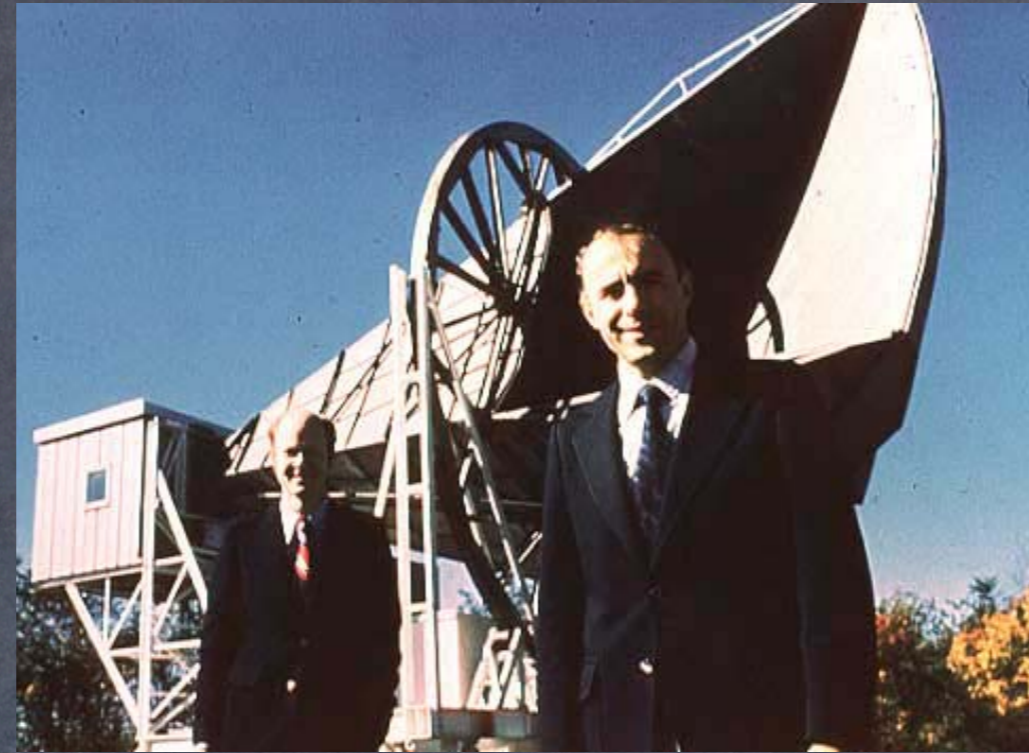
Radioastronomia

Radiação Cósmica de Fundo

Anisotropias



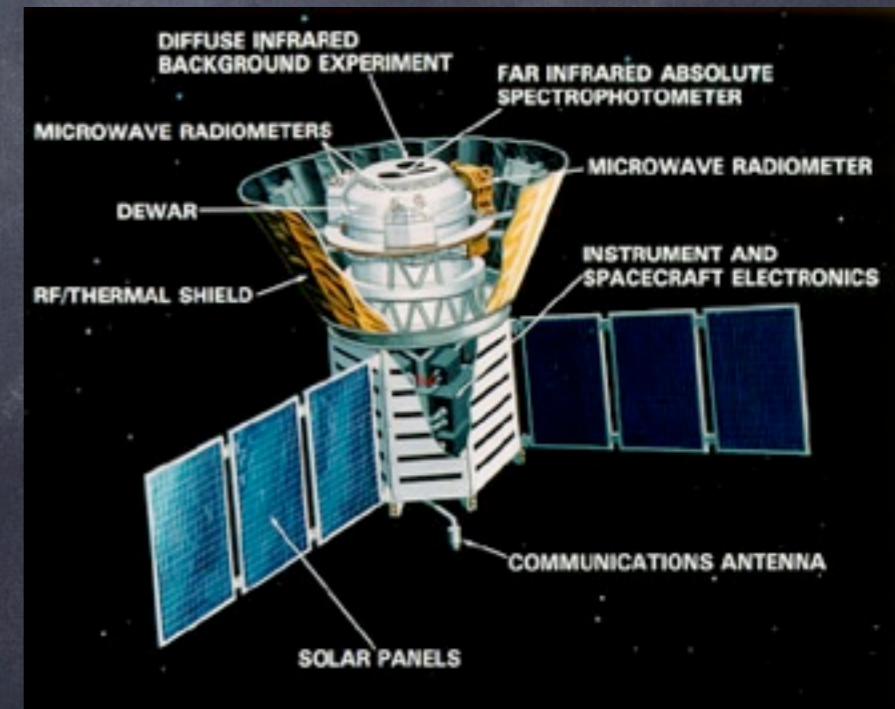
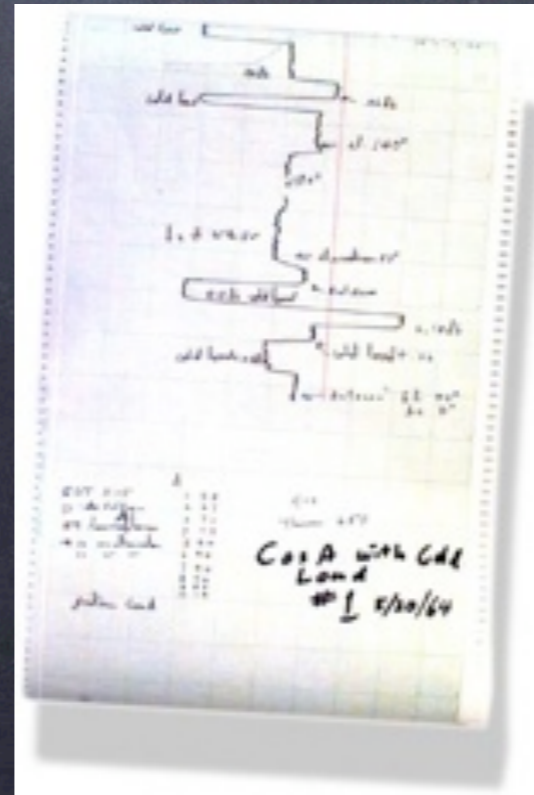
Karl Jansky



Arno Penzias e Robert Wilson
Prêmio Nobel de Física (1978)



John Mather e George Smoot
Prêmio Nobel de Física (2006)





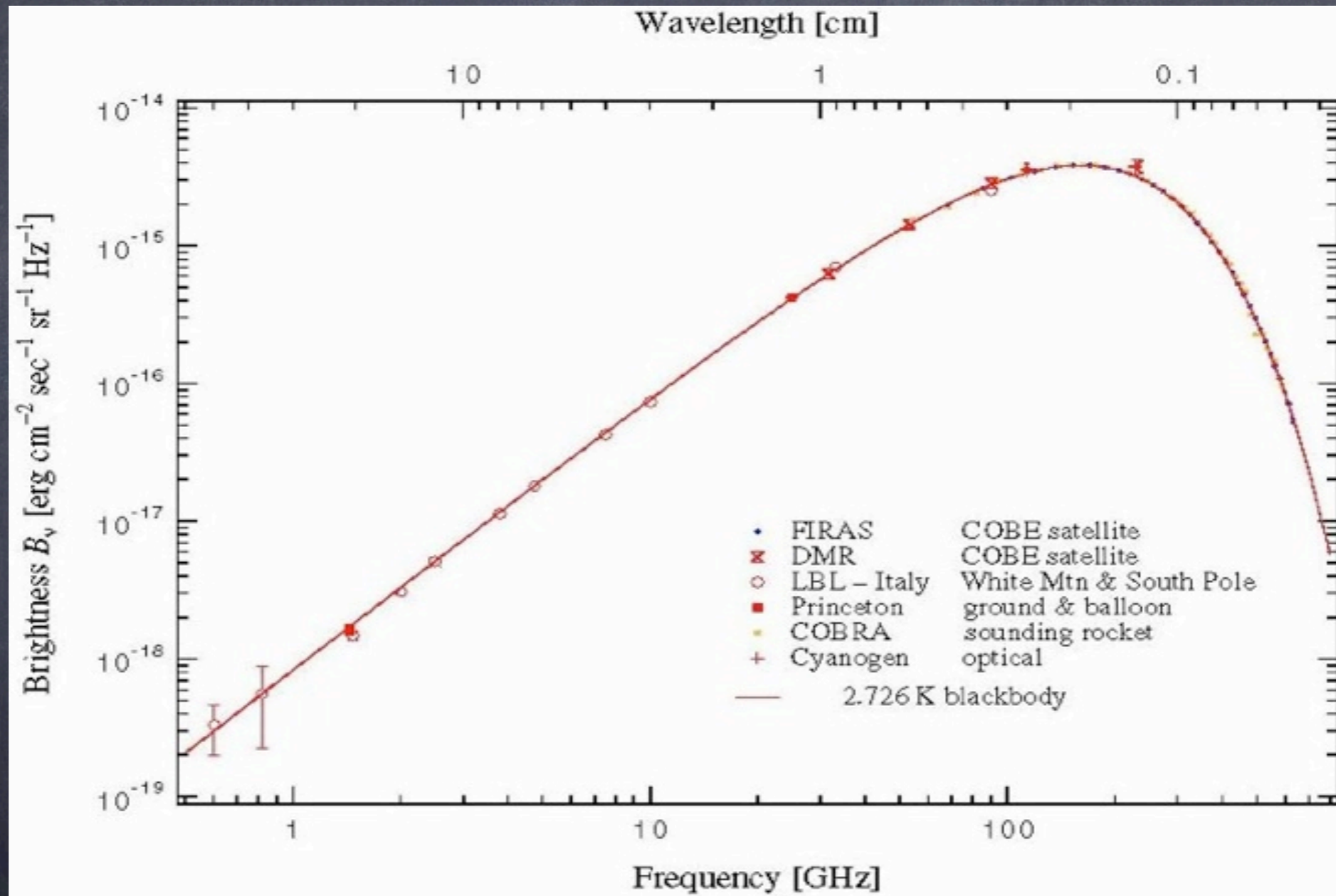
Observáveis da Radiação Cósmica de Fundo

- Espectro
- Distribuição angular (anisotropias)
- Polarização



RCF e Cosmologia

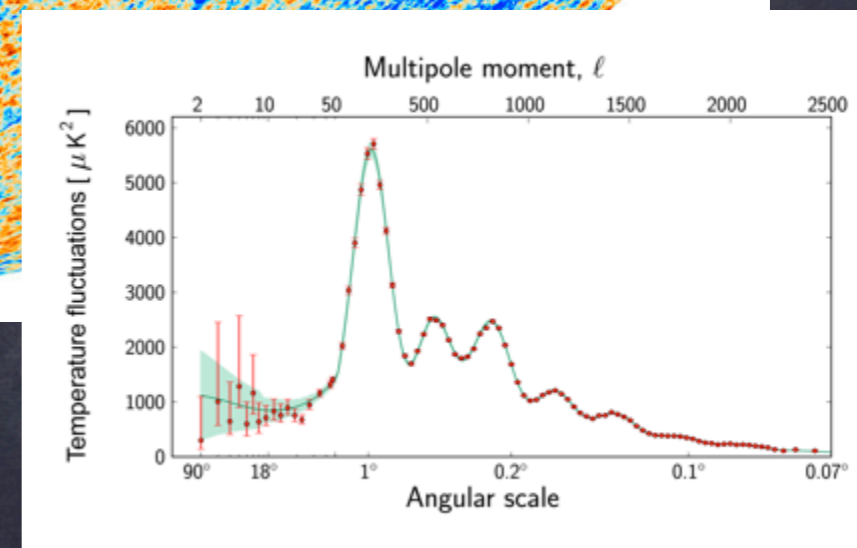
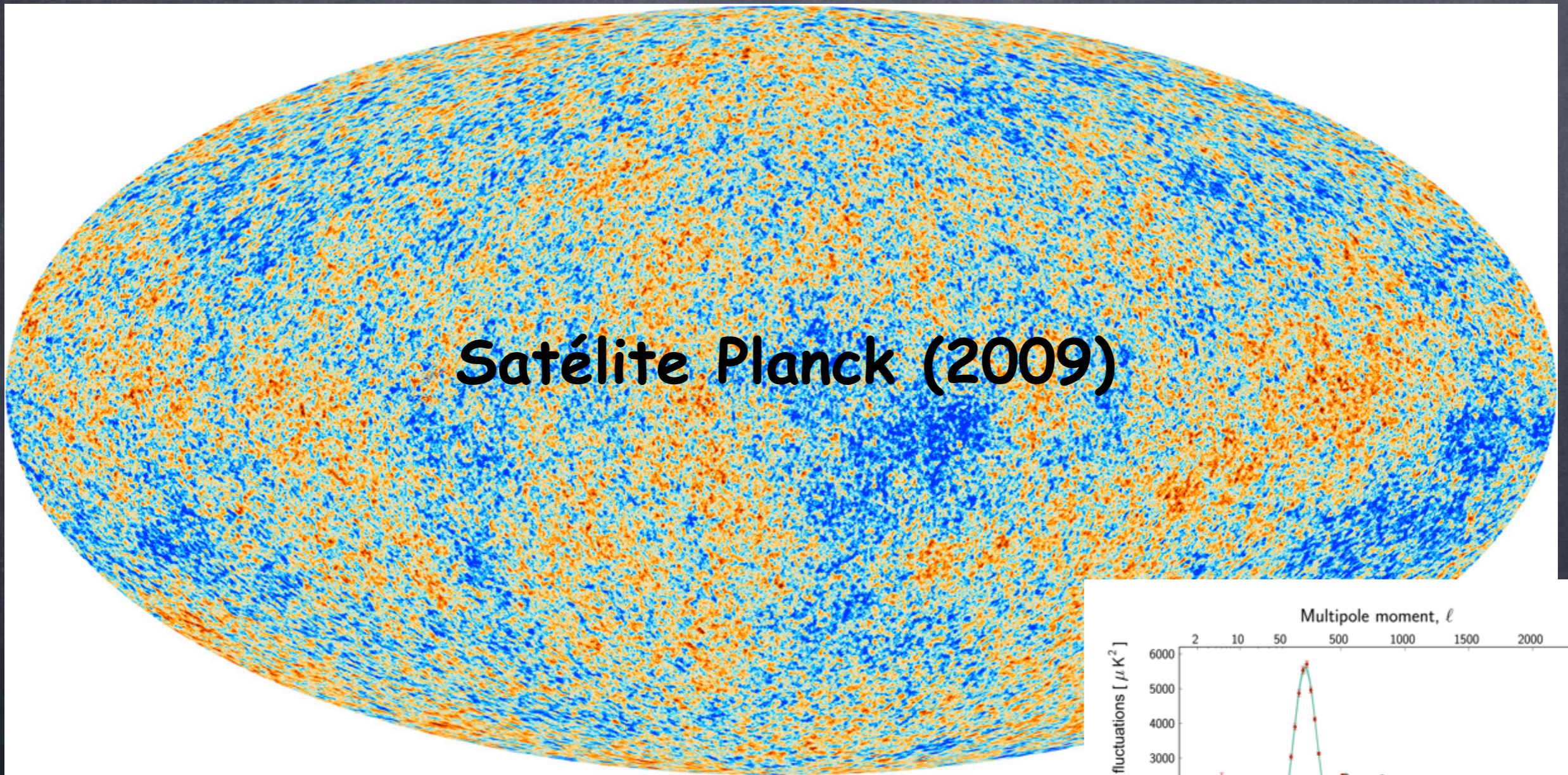
Espectro: energética



- Transições de fase (Teorias de Unificação)
- Decaimento de partículas fósseis (Matéria Escura)
- Reionização (primeiras estrelas)

RCF e Cosmologia

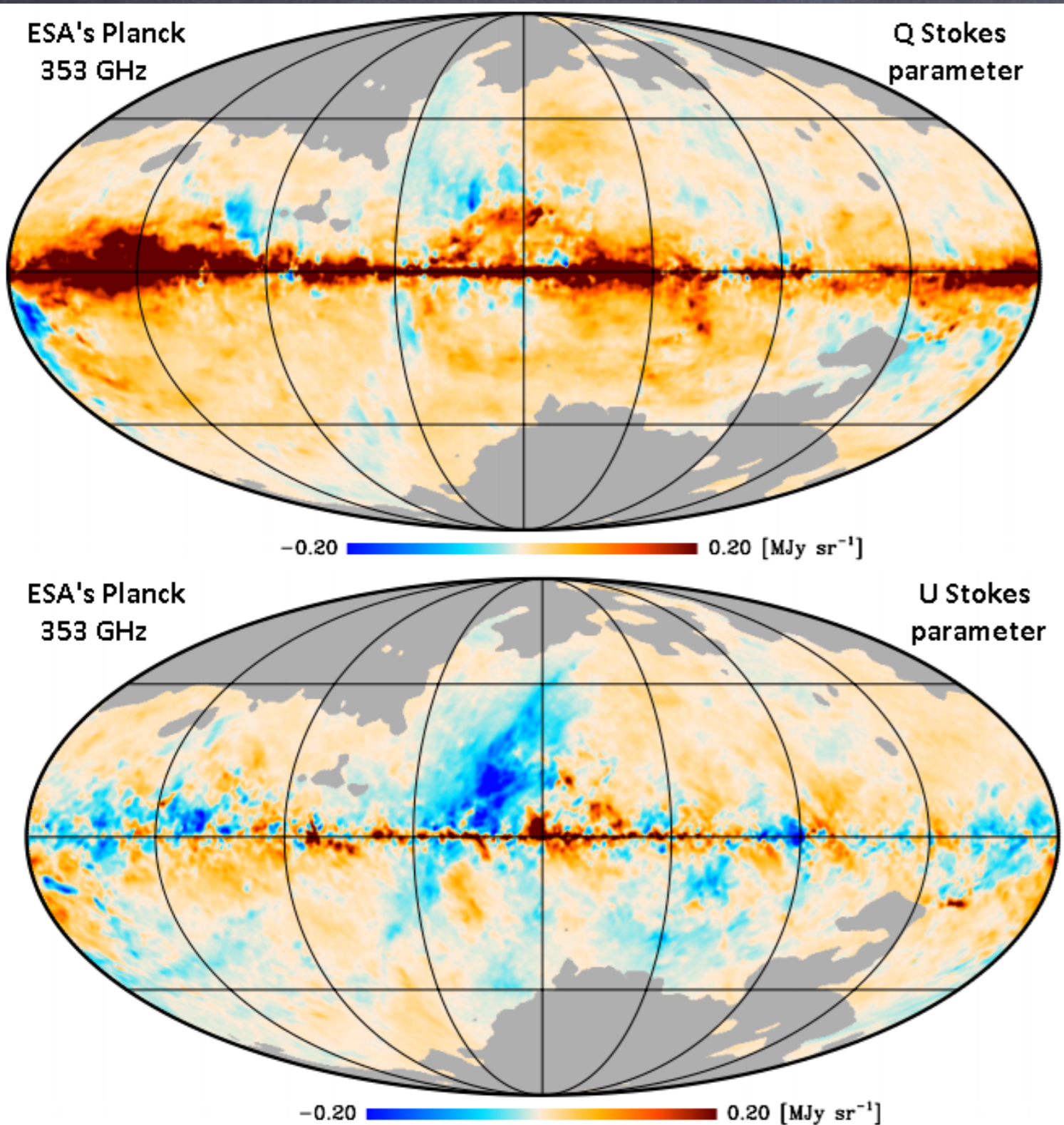
Anisotropia: dinâmica



- Distribuição das flutuações de densidade
- Parâmetros cosmológicos globais
- Física da Inflação

RCF e Cosmologia

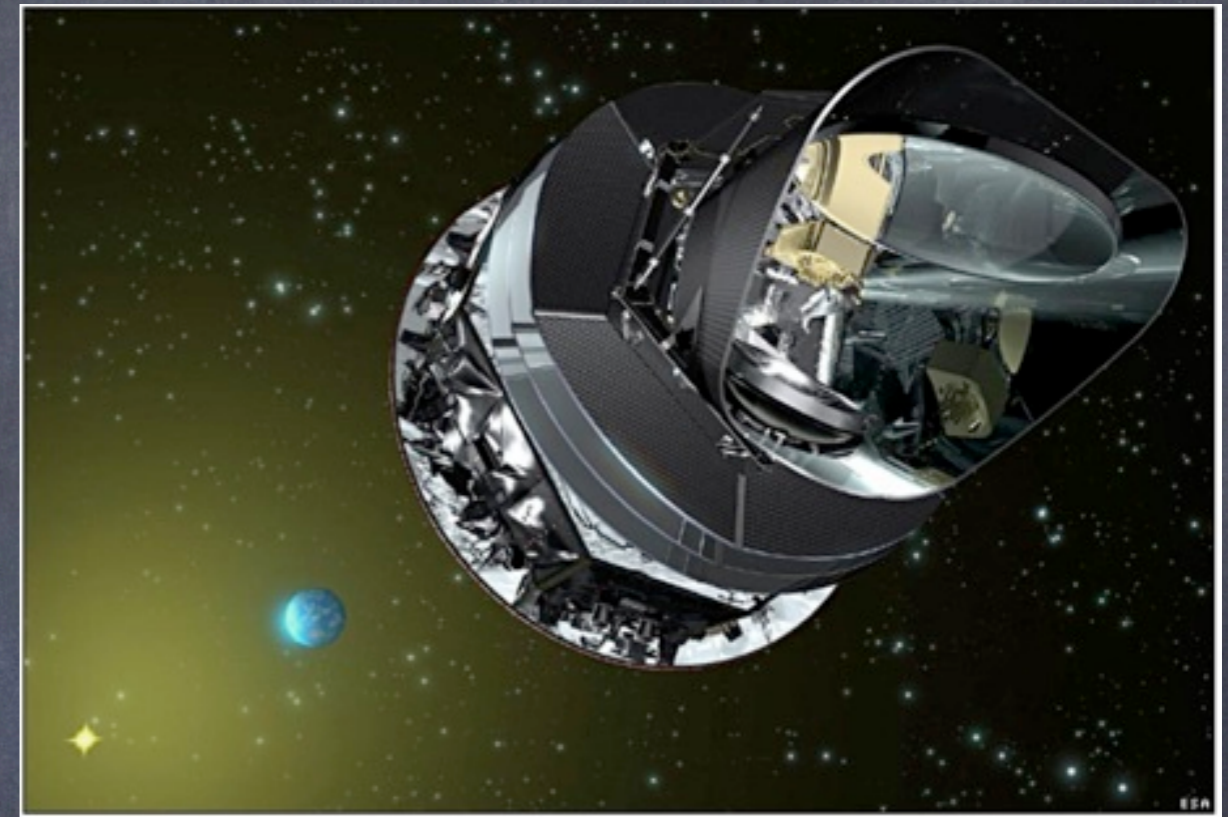
Polarização: perturbações de segunda ordem



Reionização
Distribuição de matéria na SUE
Ondas gravitacionais primordiais



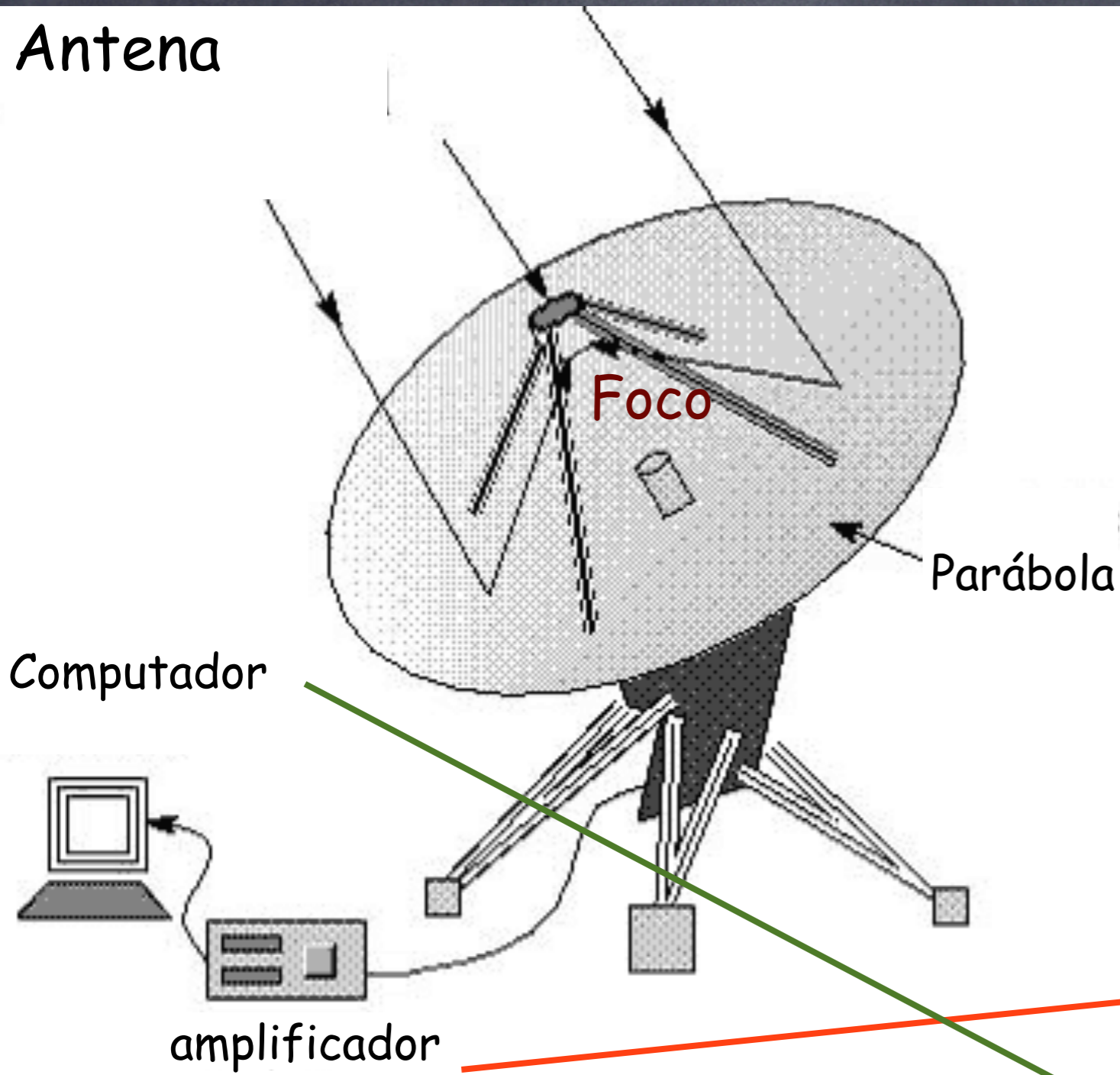
Como a RCF é observada?



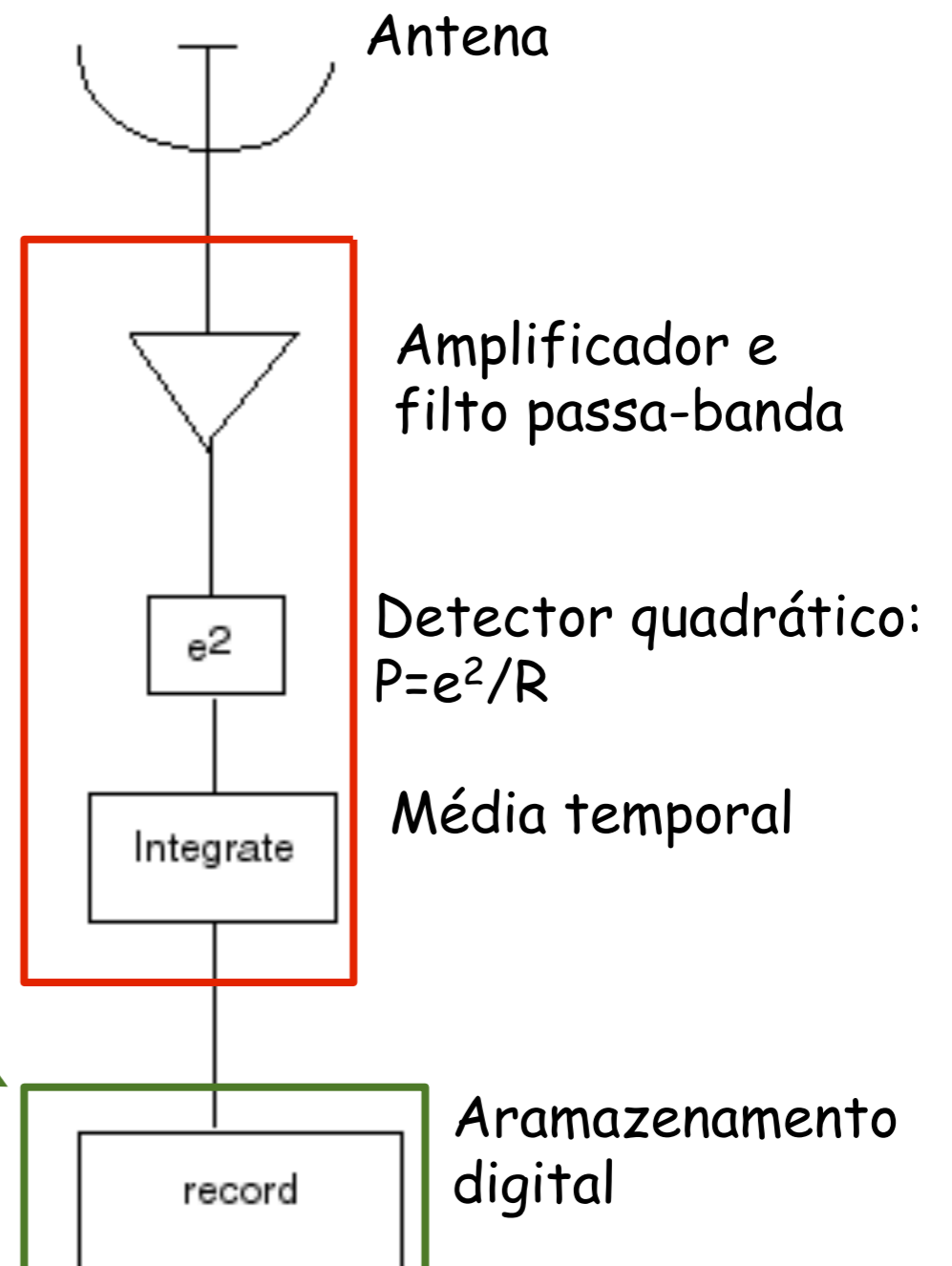


Mas como se chega a esses resultados?

Antena



Receptor de microondas simplificado



Um radiotelescópio reflete ondas de rádio até o foco da antena

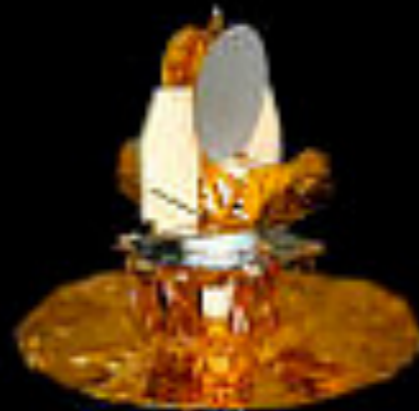


O estudo da RCF pode ajudar a responder:

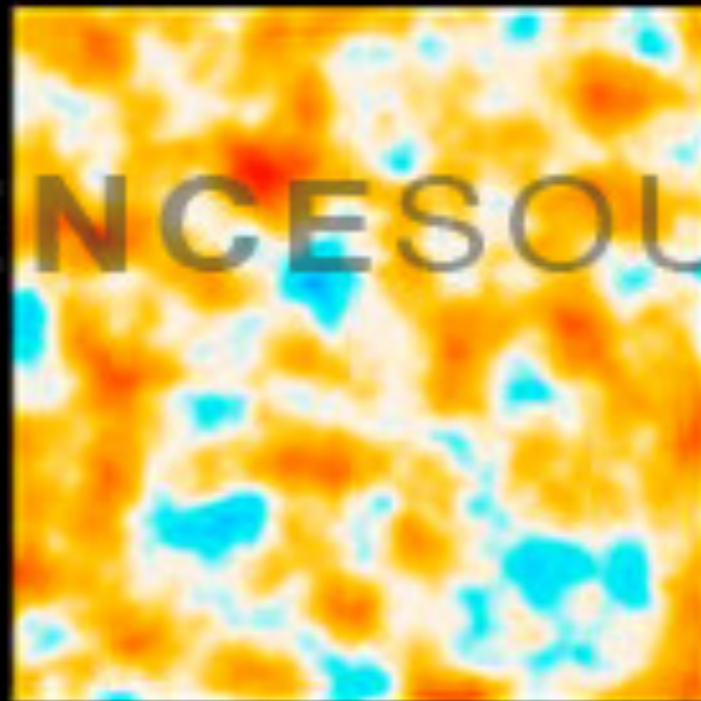
- ☑ Qual a taxa atual de expansão do Universo
- ☑ Conteúdo de matéria (escura ou não)
- ☑ Energia escura (constante cosmológica?)?
- ☑ Geometria e topologia (?) do Universo
- ☑ "Sementes" que formam as estruturas do Universo
- ☑ Etc.



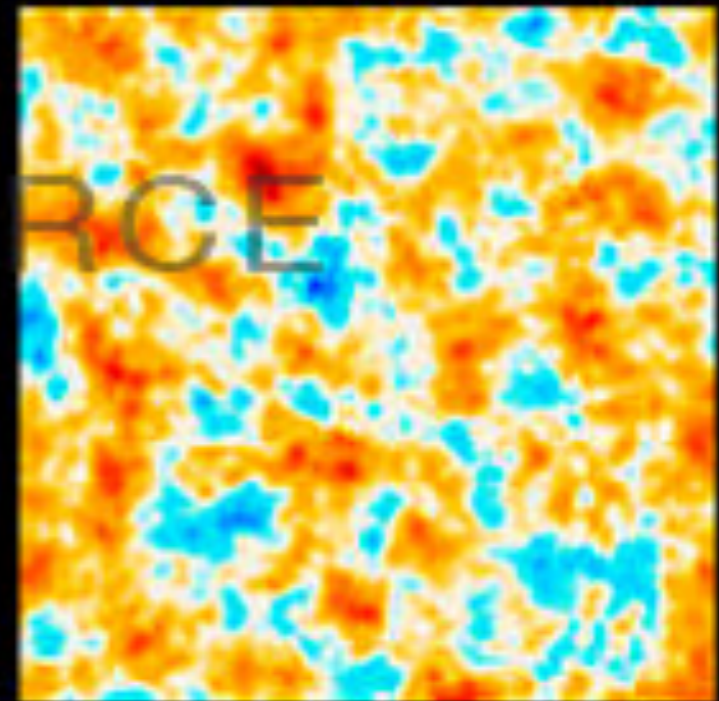
- ✓ Não se deve esquecer que a Cosmologia é uma ciência observacional \Rightarrow não podemos fazer experiências com o Universo.
- ✓ Não podemos mudar suas condições iniciais e ver o que acontece...
- ✓ Podemos, no entanto, observar o que é e como é o Universo...
- ✓ Com observações e leis da física que funcionam em nossos laboratórios podemos estudar se há compatibilidade com as condições inferidas para o passado, o presente e o futuro do Universo.



COBE

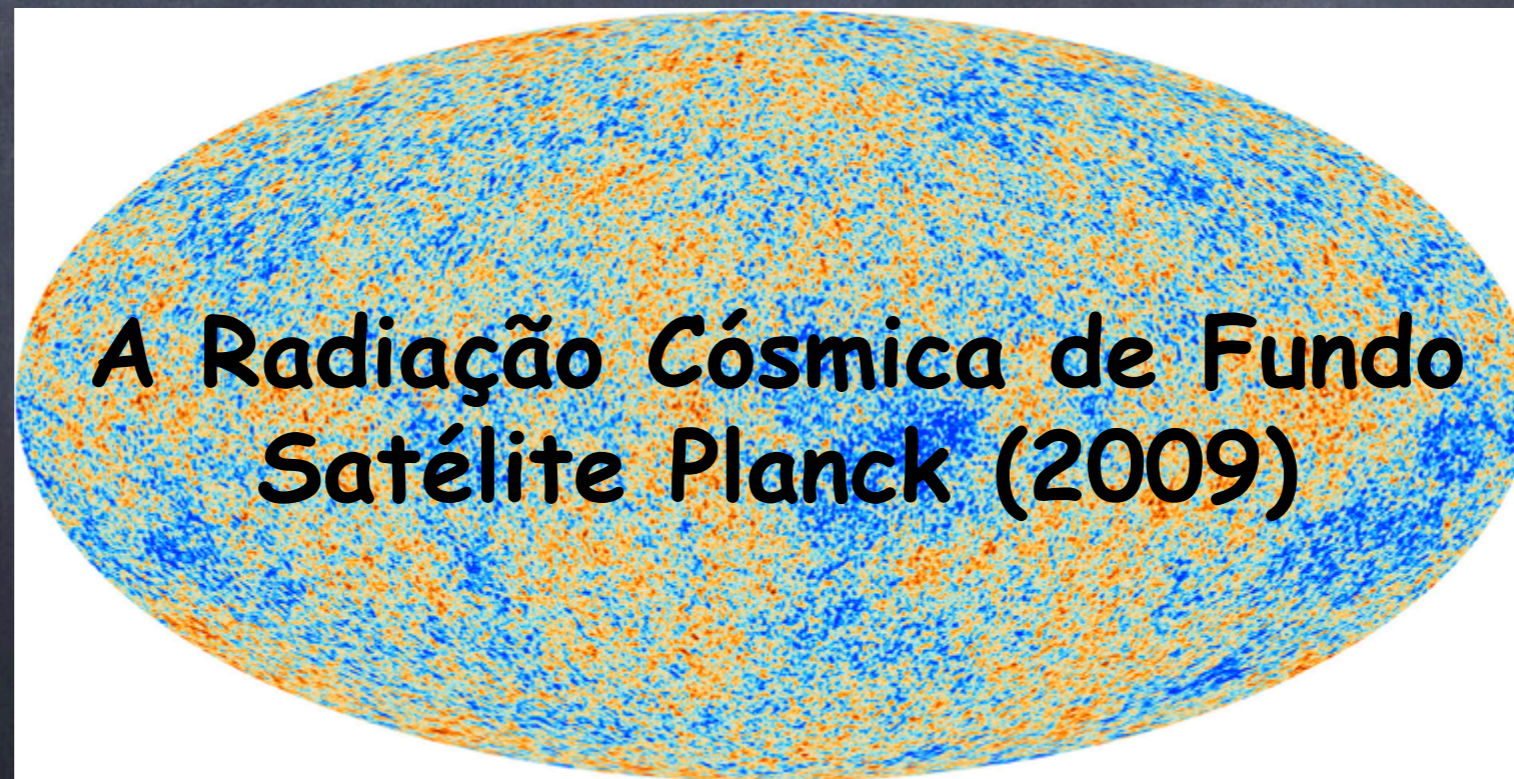
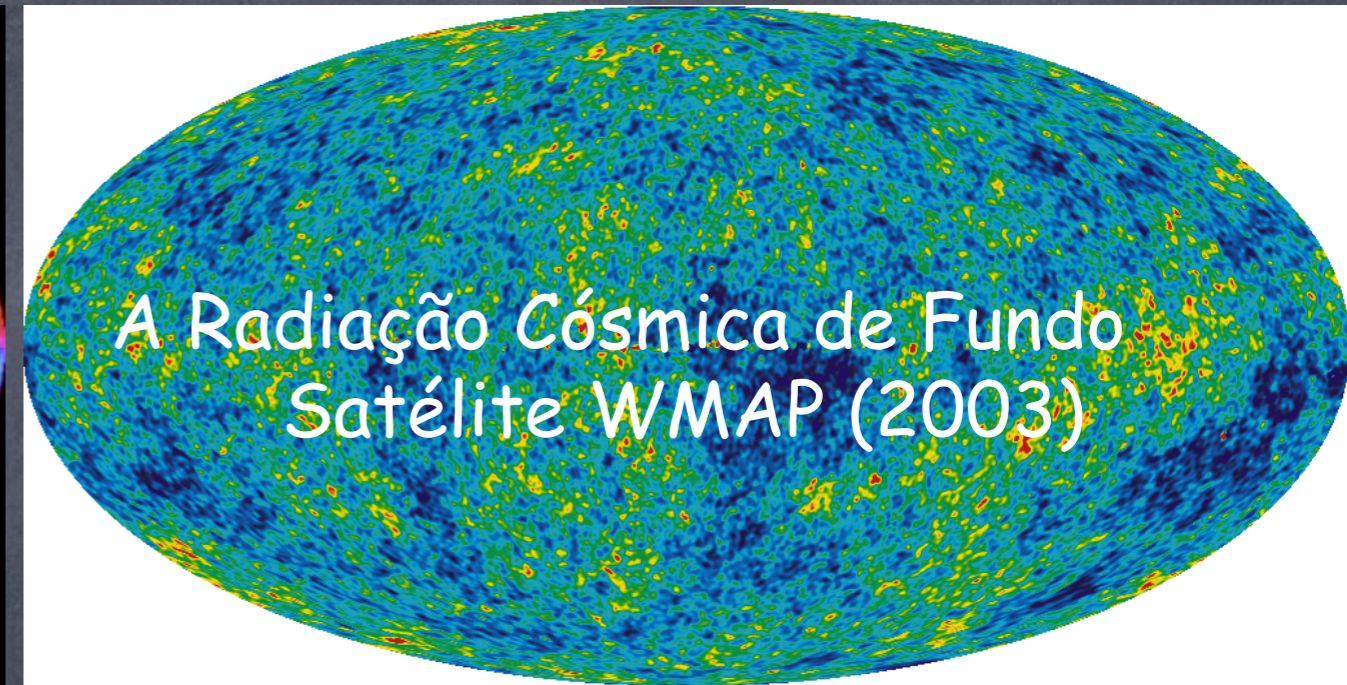


WMAP



Planck

SCIENCESOURCE





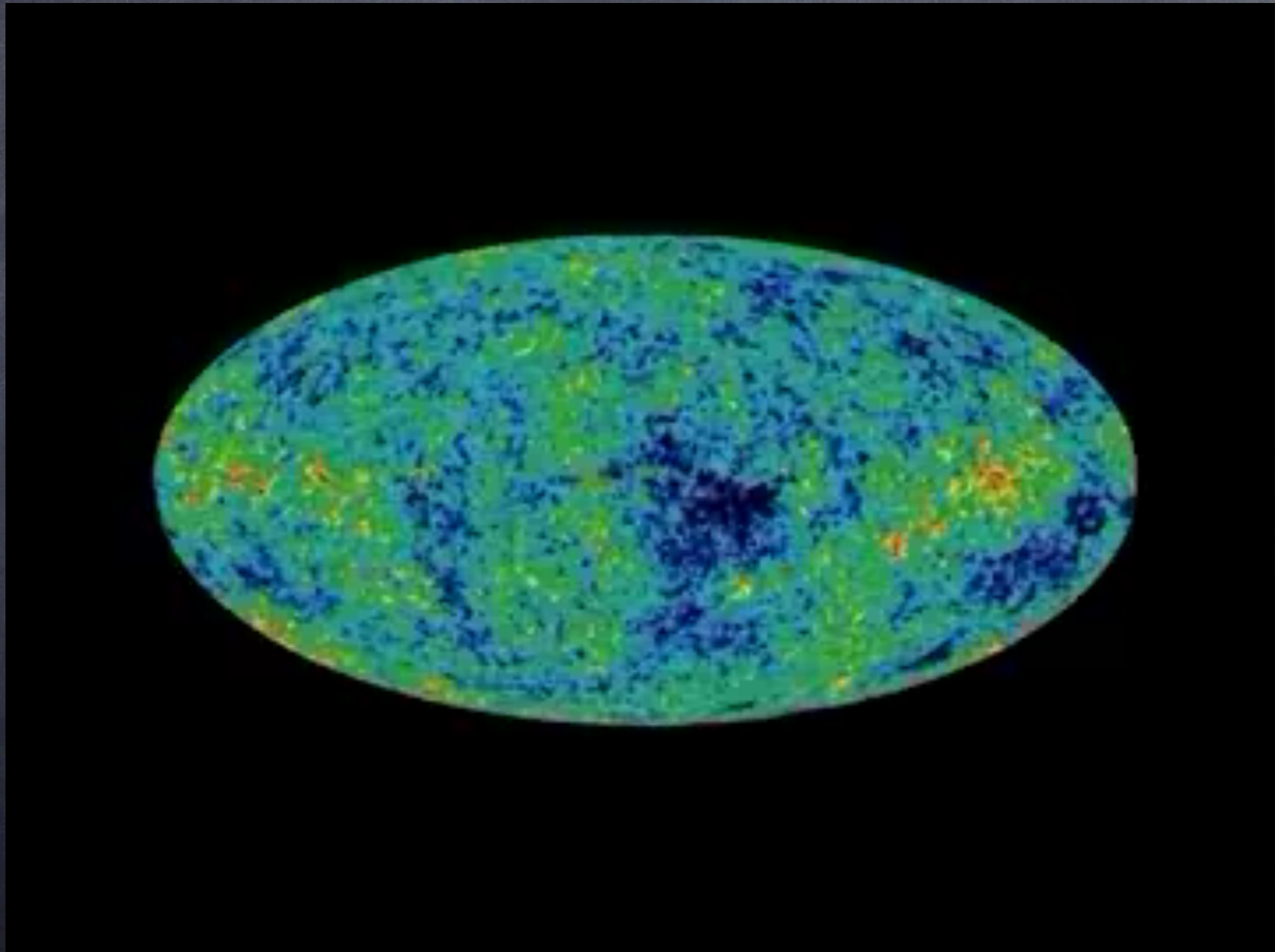
A evolução temporal da distribuição de matéria no Universo

Simulação com 10^{10} partículas (2005)

Simulação com 10^{12} partículas (2012)



Das flutuações de temperatura à formação das galáxias...

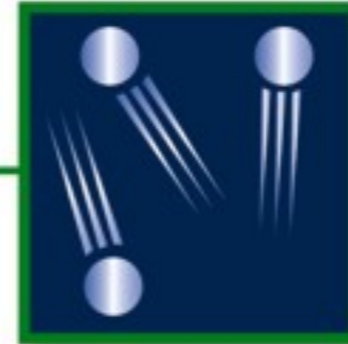


Composição do Universo

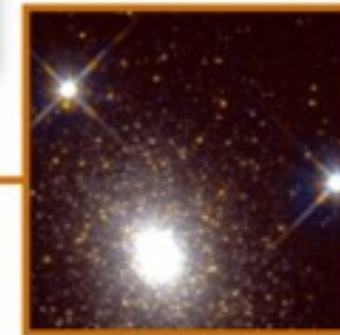
Elementos pesados: ~ 0,03%



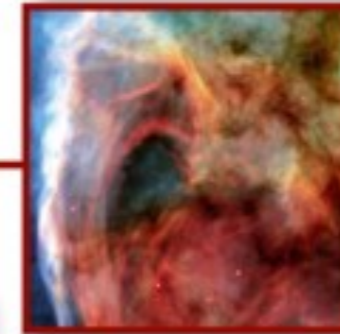
Neutrinos: ~ 0,3%



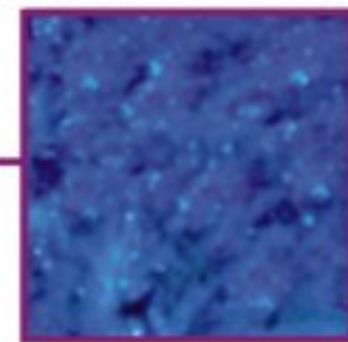
Estrelas: ~0,5%



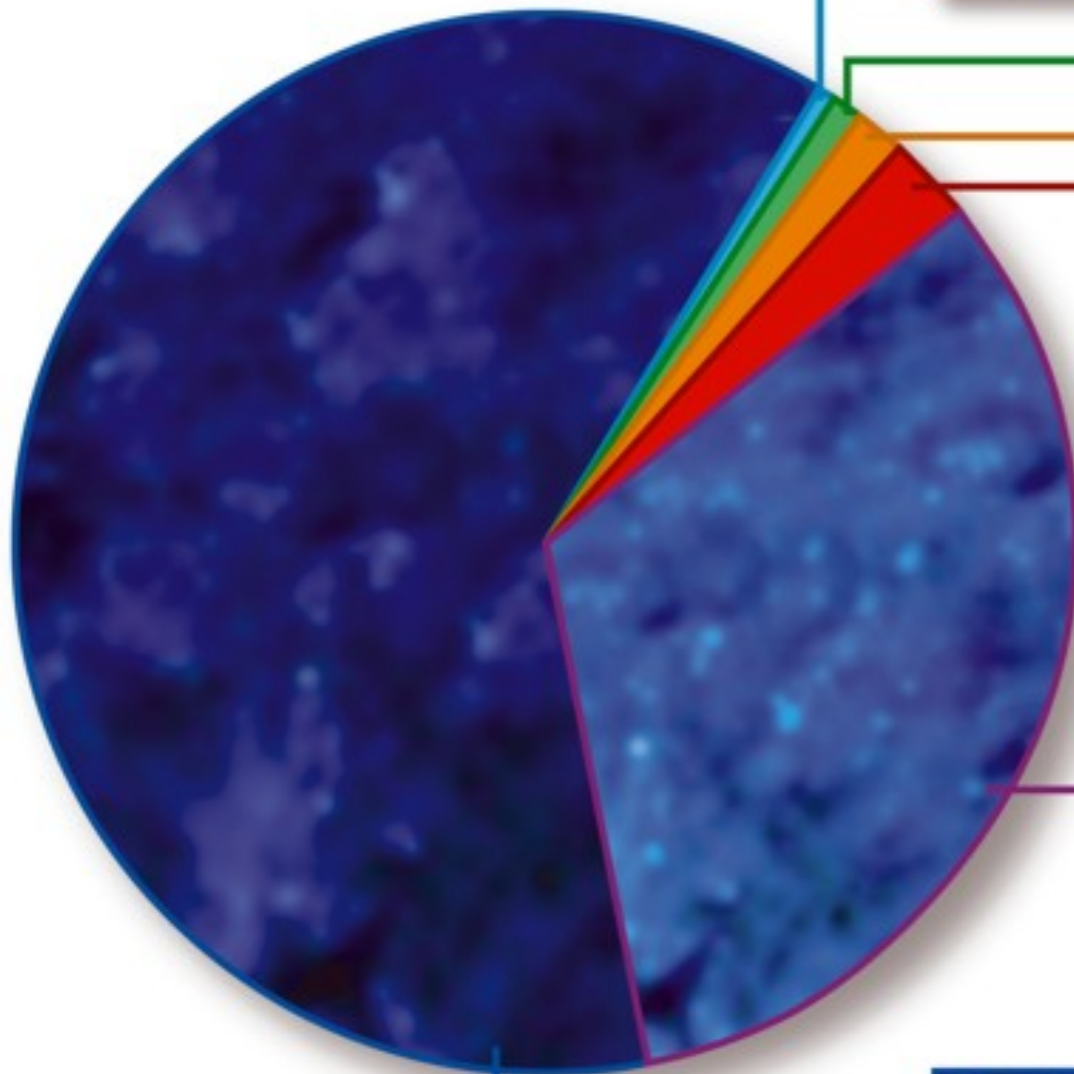
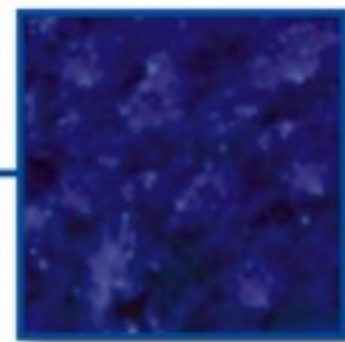
H, He: ~ 4%



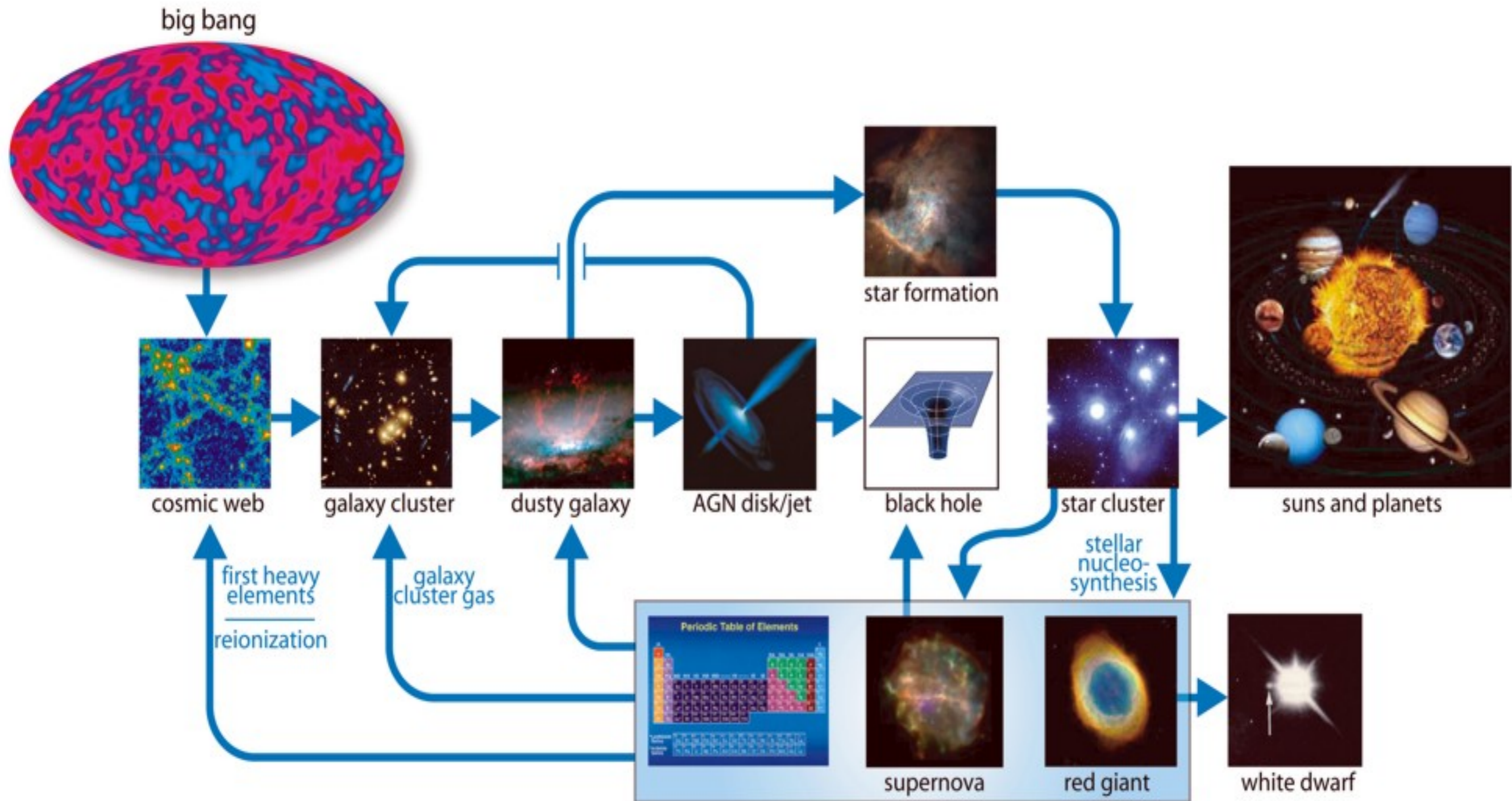
Matéria escura: ~25%



Energia escura: ~ 70%



CYCLES OF MATTER AND ENERGY







A evolução e destino do Universo

- ✓ Resultados de medidas combinadas (RCFM e outras) sugerem que o Universo obedece a uma geometria tradicional, ou Euclidiana
- ✓ O destino será definido pelos valores da densidade, geometria e taxa de expansão
- ✓ Primeiras estruturas foram formadas cerca de 200 milhões de anos depois do Big Bang
- ✓ Predominantemente dominados pela força gravitacional



RCF e a geometria do Universo





O que sabemos até 24/11/2015?

- ☑ Que o Universo está em expansão acelerada...
- ☑ Que existe uma quantidade de matéria e energia escura várias vezes superior à matéria normal...
- ☑ Que a RCFM, a síntese de elementos leves, a expansão das galáxias e a aceleração da expansão são uma tremenda evidência de que o Universo começou num "BIG BANG"...
- ☑ Que flutuações de densidade (matéria) são o melhor e mais simples caminho para explicar as estruturas observadas no Universo...



O que NÃO sabemos???

- ✓ 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 são os detalhes do processo de formação de estruturas?
- ✓ Quais as condições iniciais do Universo?



O que devemos lembrar...

- ☑ O Sol é uma estrela "comum", de tamanho médio, localizado perto da borda de uma Galáxia, também "comum", em forma de disco, com braços espirais.
- ☑ O Universo contém muitos bilhões de galáxias e cada galáxia contém muitos bilhões de estrelas.
- ☑ A gravidade é o principal mecanismo que atua no Universo e que mantém galáxias, sistemas estelares e solares em uma estrutura coerente.
- ☑ Elementos químicos são criados por reações nucleares estelares ou explosões de supernovas.



- ☑ O Universo deve ter ~ 14 bilhões de anos.
- ☑ O Universo vem se expandindo desde então a partir de um estado inicialmente caótico, denso e quente.
- ☑ O modelo cosmológico padrão é o chamado "BIG BANG", que pode ser entendido como a criação do espaço-tempo e, por extensão, do Universo.
- ☑ Estas afirmações e o restante dessa apresentação 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.



Conclusões

- ✓ Os problemas principais que devemos resolver são bem formulados, mas muitas das soluções tem permanecido obscuras por décadas.
- ✓ Soluções para as questões atuais são fortemente dependentes da combinação entre teoria, desenvolvimento tecnológico de instrumentos e avanço computacional.
- ✓ Talvez no final dessa década tenhamos mais informações que fortaleçam a proposta do Modelo Cosmológico Padrão...



MUITO OBRIGADO!!!!