

RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

ENCONTRO DE ASTRONOMIA 2022

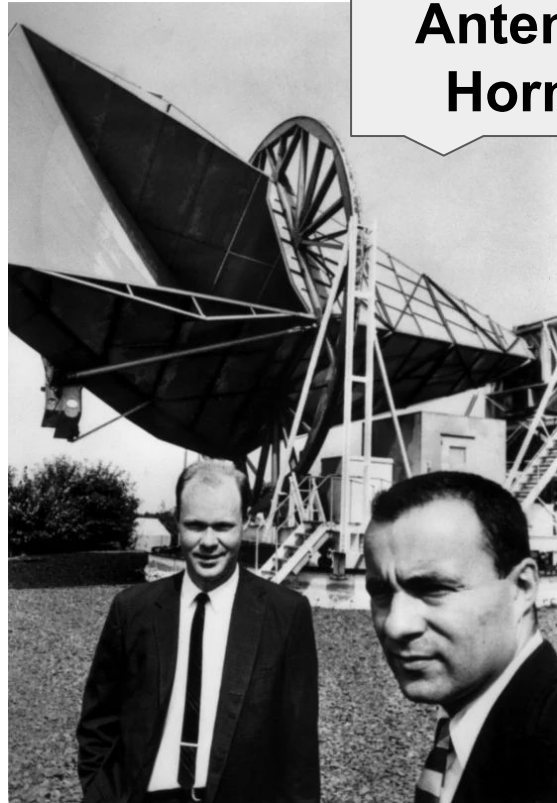
30 de Novembro de 2022

Luiz Filipe Guimarães (UFES)

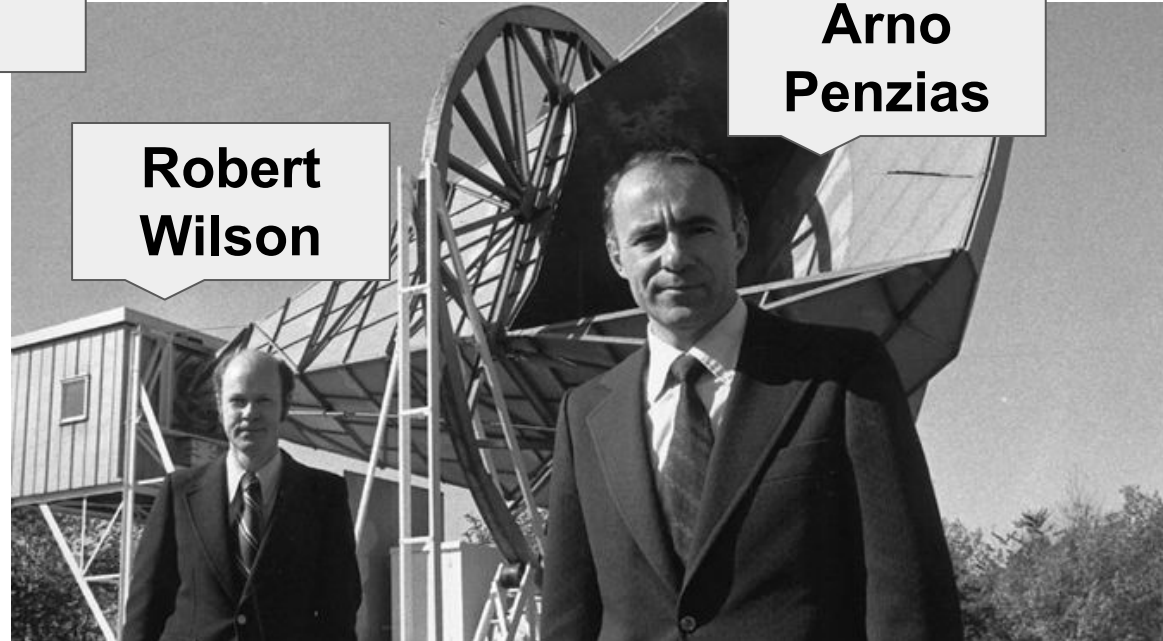
Breve resumo do apresentado pelo Prof. Alex Wuensche

- **Descoberta por Penzias e Wilson em 1964**
- **Big Bang: Gamow, Dicke, entre outros (1948~60's)**
- **Corpo Negro, praticamente homogênea e isotrópica**
 - **Temperatura média: $T = 2.725\text{K}$**
 - **Anisotropias: $\Delta T \sim 10^{-5}\text{K}$**
 - **Early time + late time + interação de fótons e bárions**

Descoberta da CMB - Penzias e Wilson em 1964



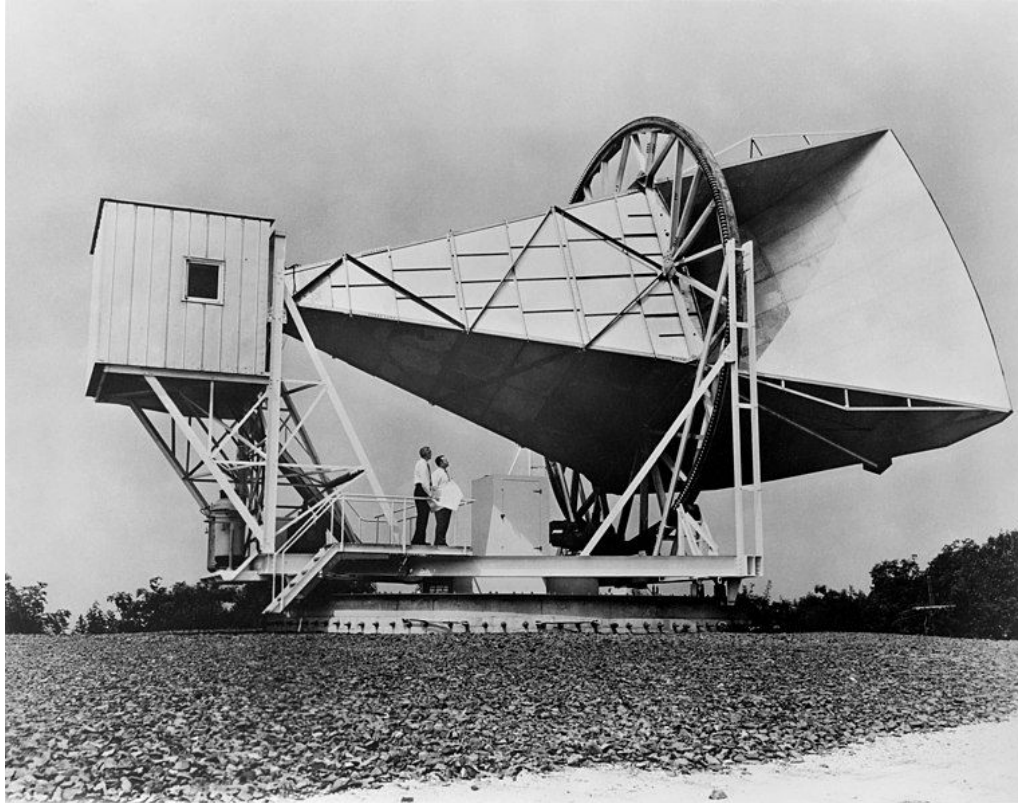
**Antena
Horn**



**Robert
Wilson**

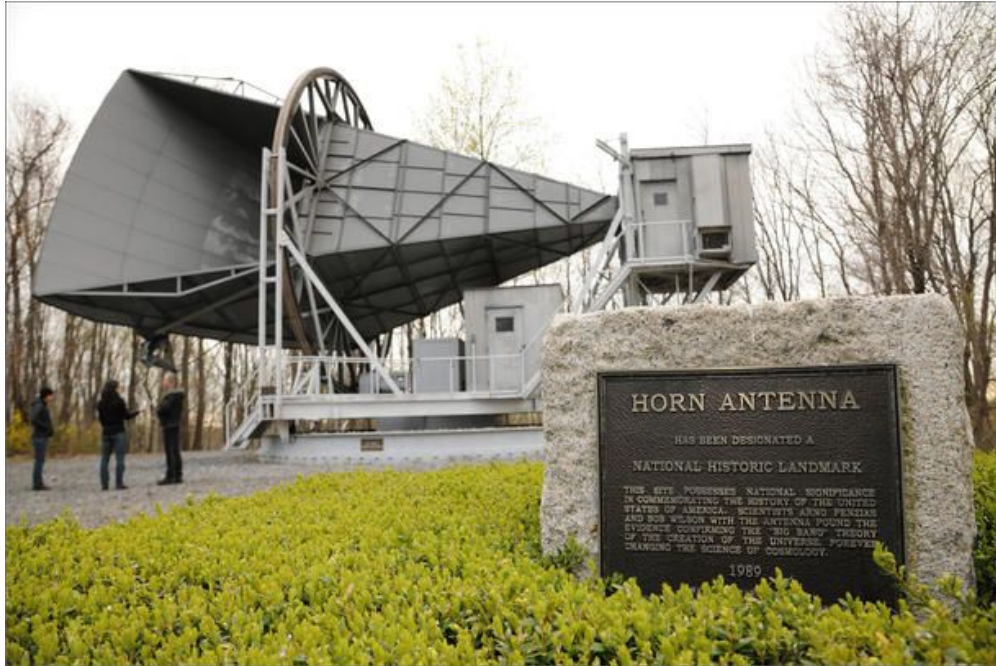
**Arno
Penzias**

A Antena Horn em Holmdel - A Origem



- Telescópio de Rádio reaproveitado
- Penzias e Wilson: fontes de rádio galácticas
- Misterioso ruído presente

A Antena Horn em Holmdel - O sinal

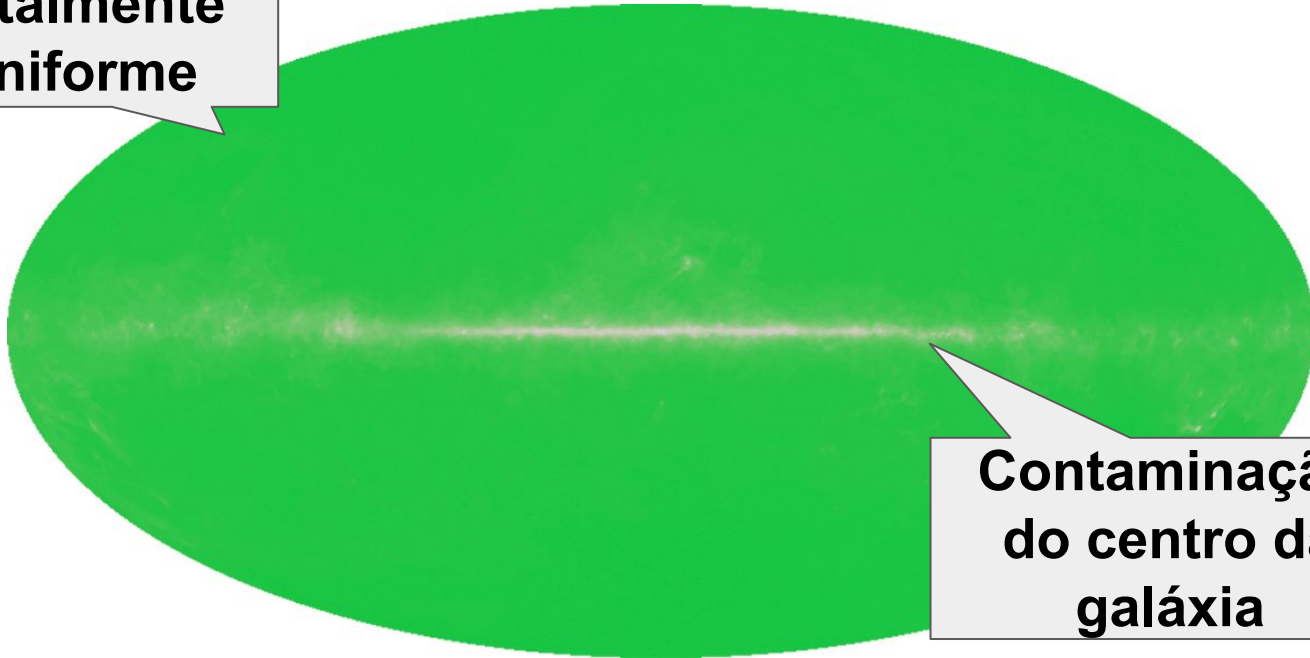


- Não era “dielétrico de pombo” - Foram mortos!
- Isotrópico: presente em todas as direções
- Detecção: $\lambda = 7.35\text{cm}$, ou seja, **micro-ondas**

Temperatura:
3.5K

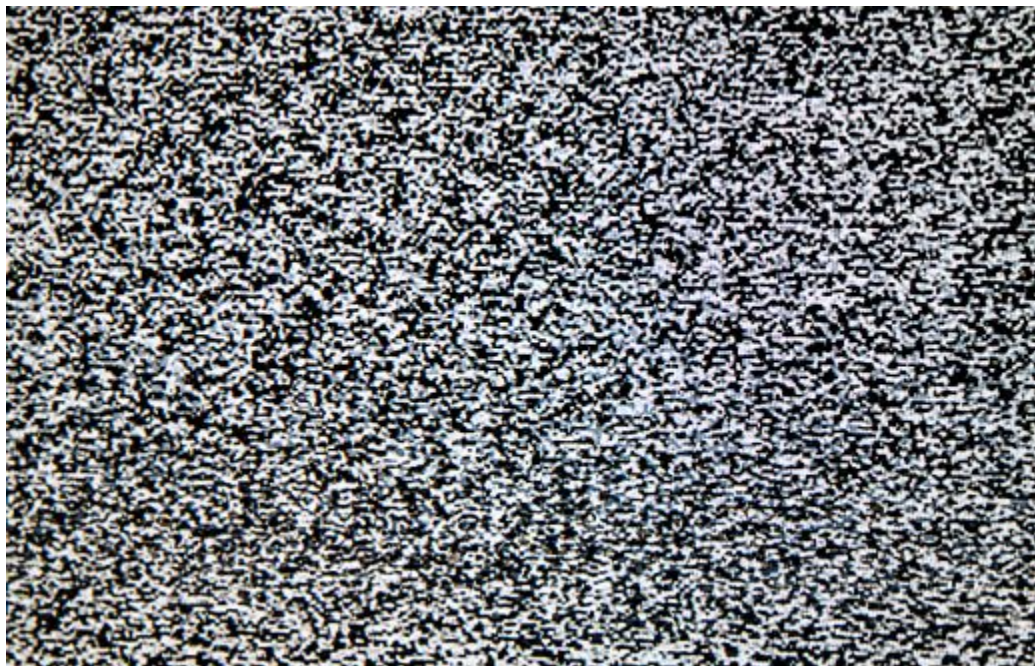
Mapa da CMB medido por Penzias e Wilson

**Totalmente
uniforme**



**Contaminação
do centro da
galáxia**

Curiosidade: Cerca de 1% da estática das TVs é CMB!



O modelo de Big Bang Quente (HBB)

- Conhecemos a evolução do universo hoje em dia
- Cálculos para tempos cada vez mais primordiais indicam:
 - Maiores temperaturas
 - Maiores densidades
 - Até chegar em uma singularidade para $t = 0$

Fred Hoyle: “Big Bang”



**Fred
Hoyle**

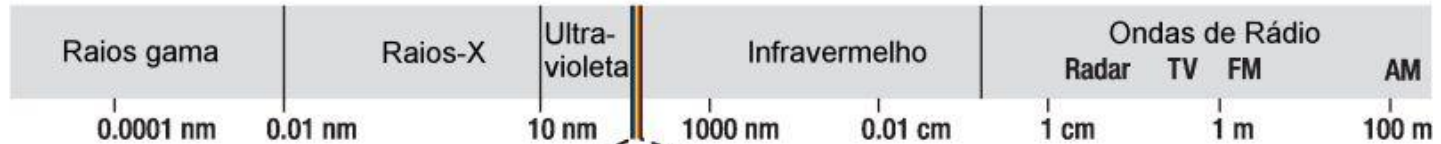
**George
Gamow**



**Robert
Dicke**

Intermissão - Luz e Redshift

A luz visível é apenas uma fração do espectro total



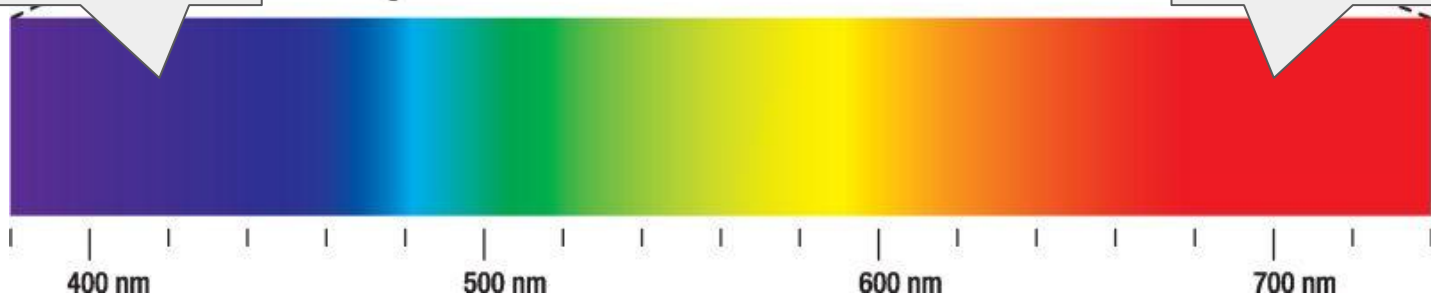
Azul

Comprimento de onda **menor**

Espectro visível da luz

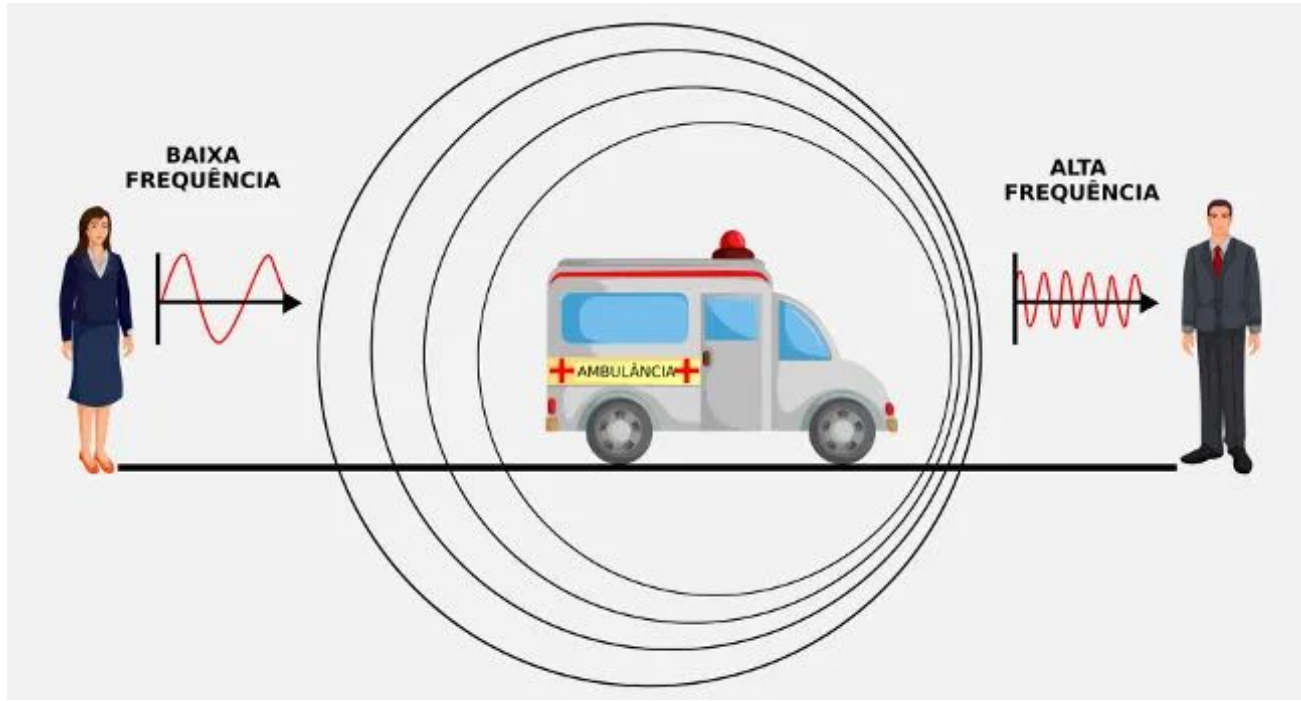
Vermelho

Comprimento de onda **maior**



Efeito Doppler

Mudança no comprimento de onda devido à movimento relativo



Doppler effect

Stationary sound source



Moving towards the observer



Menos espaço
entre os picos

Moving away from the observer

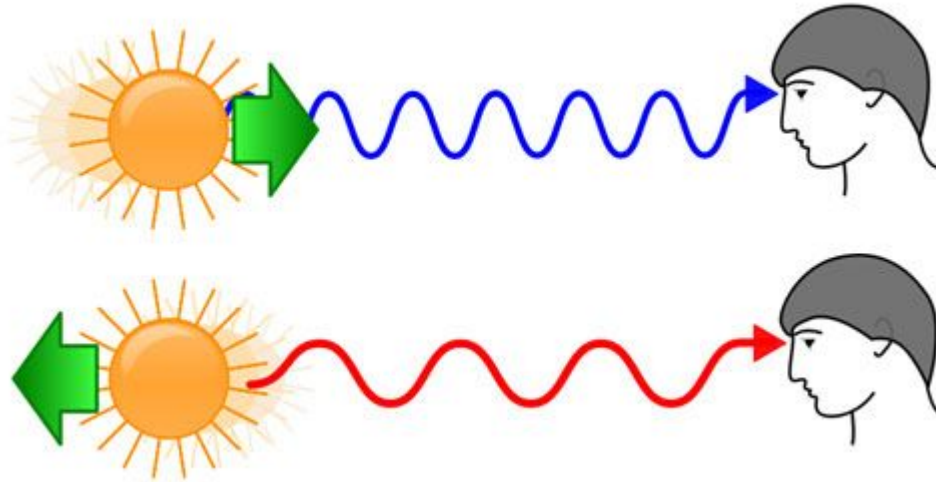


Mais espaço
entre os picos



Observer

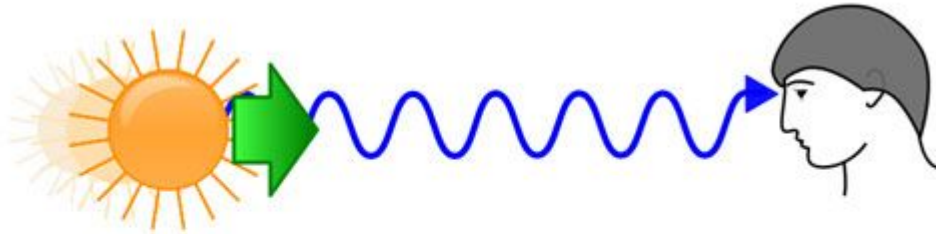
Também é válido para a luz



Fonte se aproxima:
Comprimento de
onda **reduz**

Fonte se afasta:
Comprimento de
onda **aumenta**

Também é válido para a luz



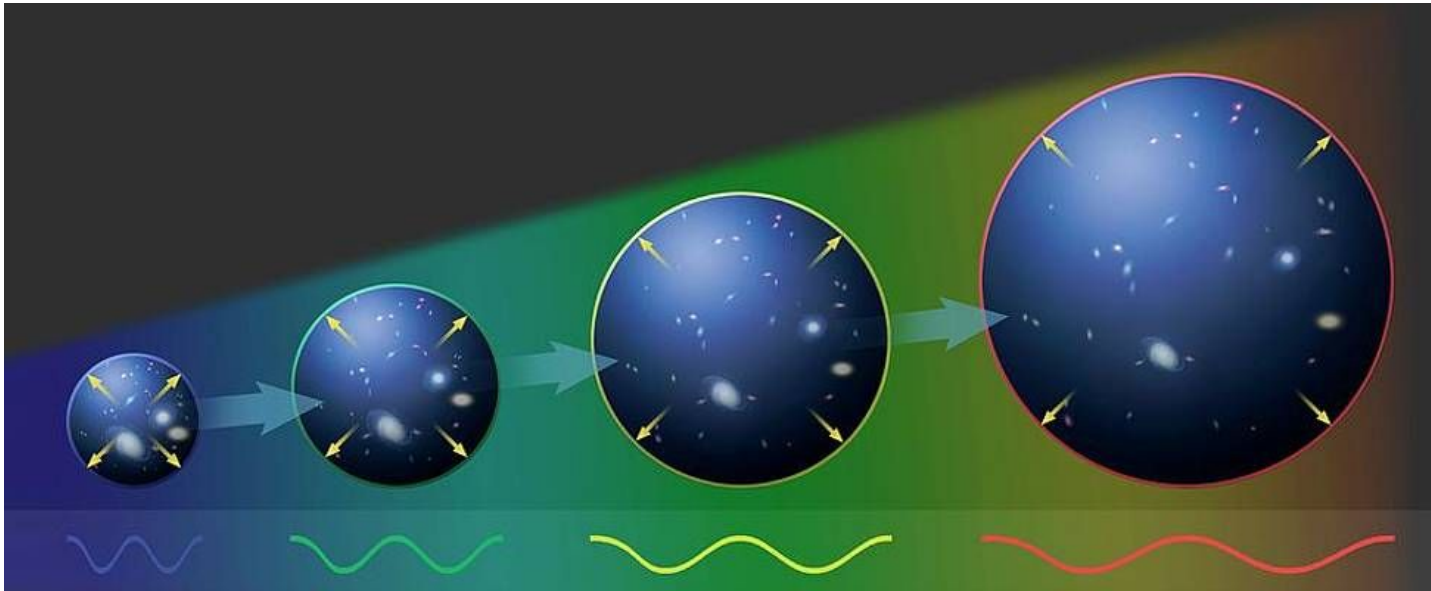
**DESVIO PARA O
AZUL**



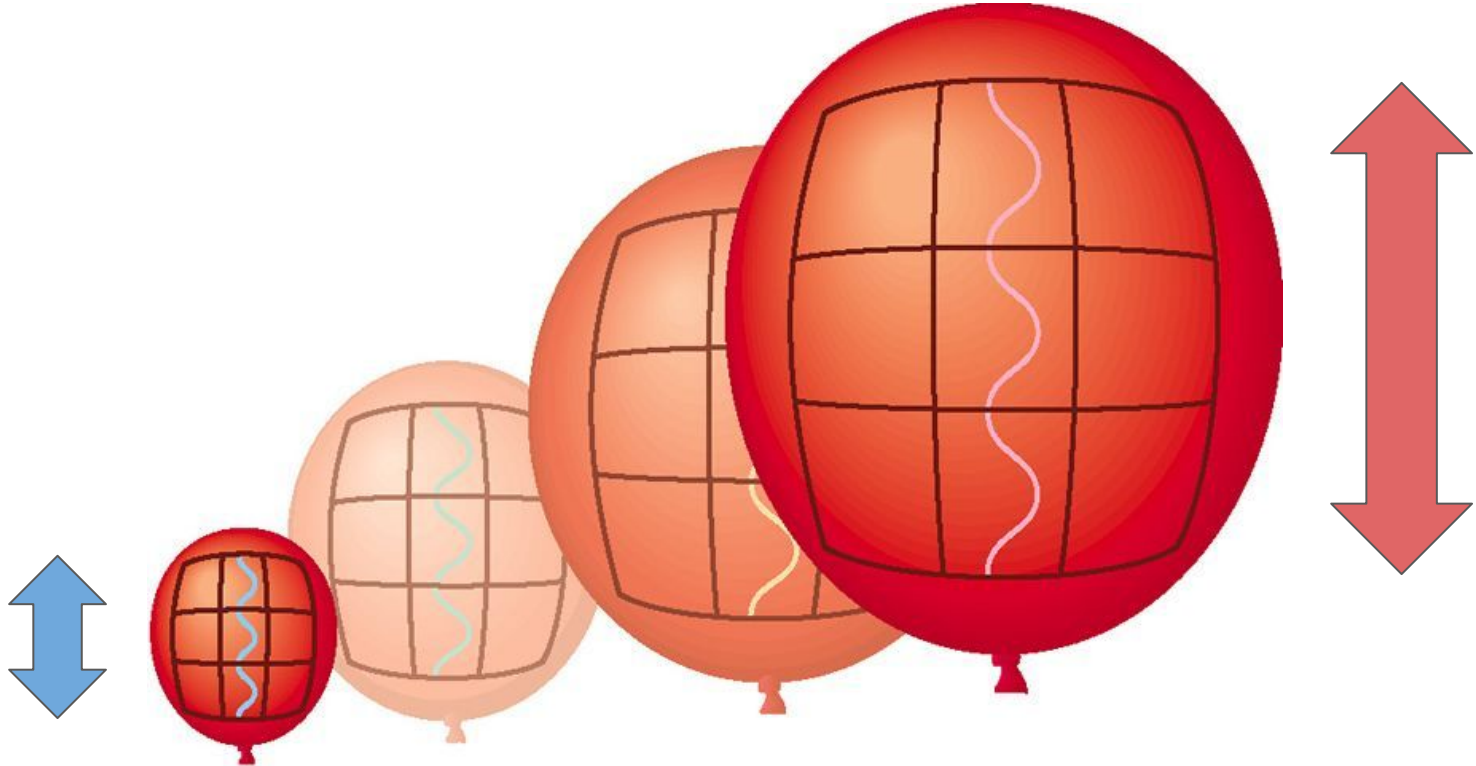
**DESVIO PARA O
VERMELHO**

O quê acontece com a luz que se propaga pelo universo em expansão?

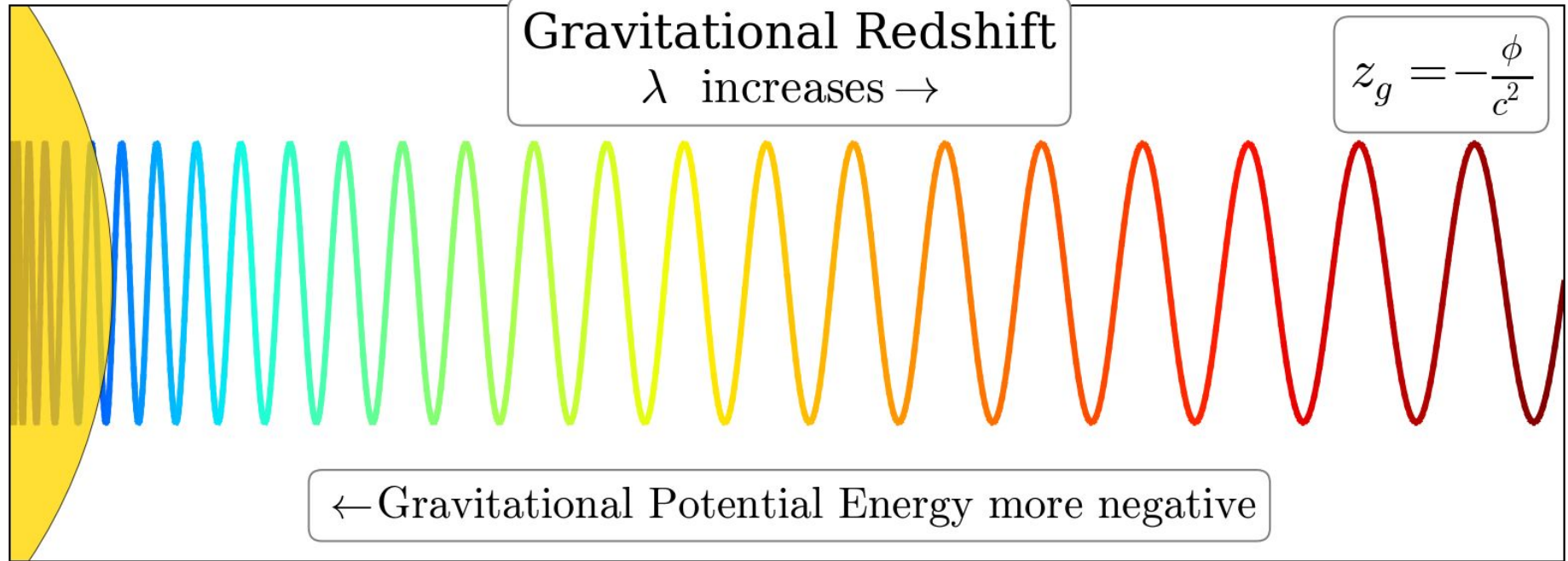
Mais espaço entre suas cristas = Maior comprimento de onda!



Desvio para o vermelho cosmológico

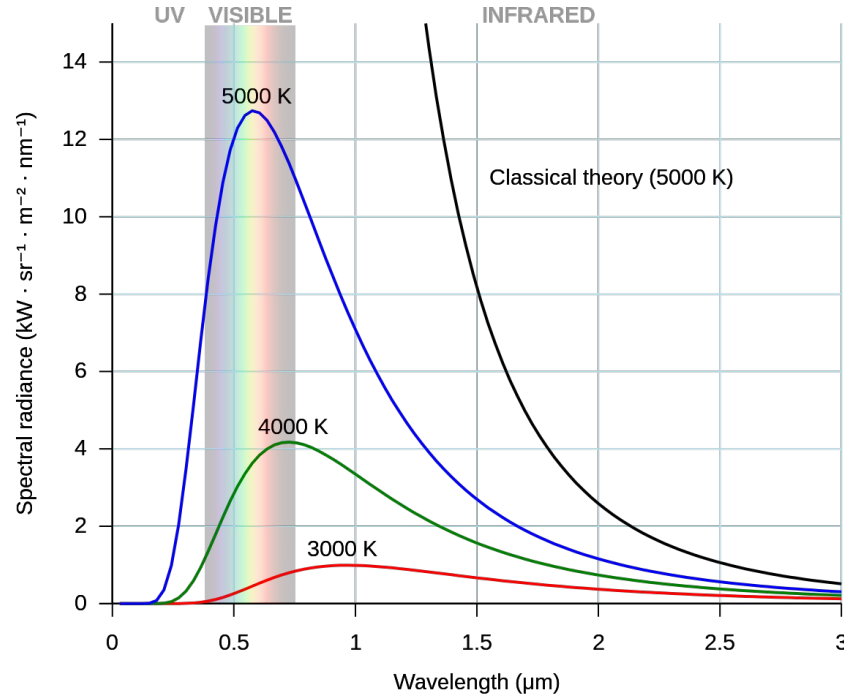


Desvio para o vermelho gravitacional

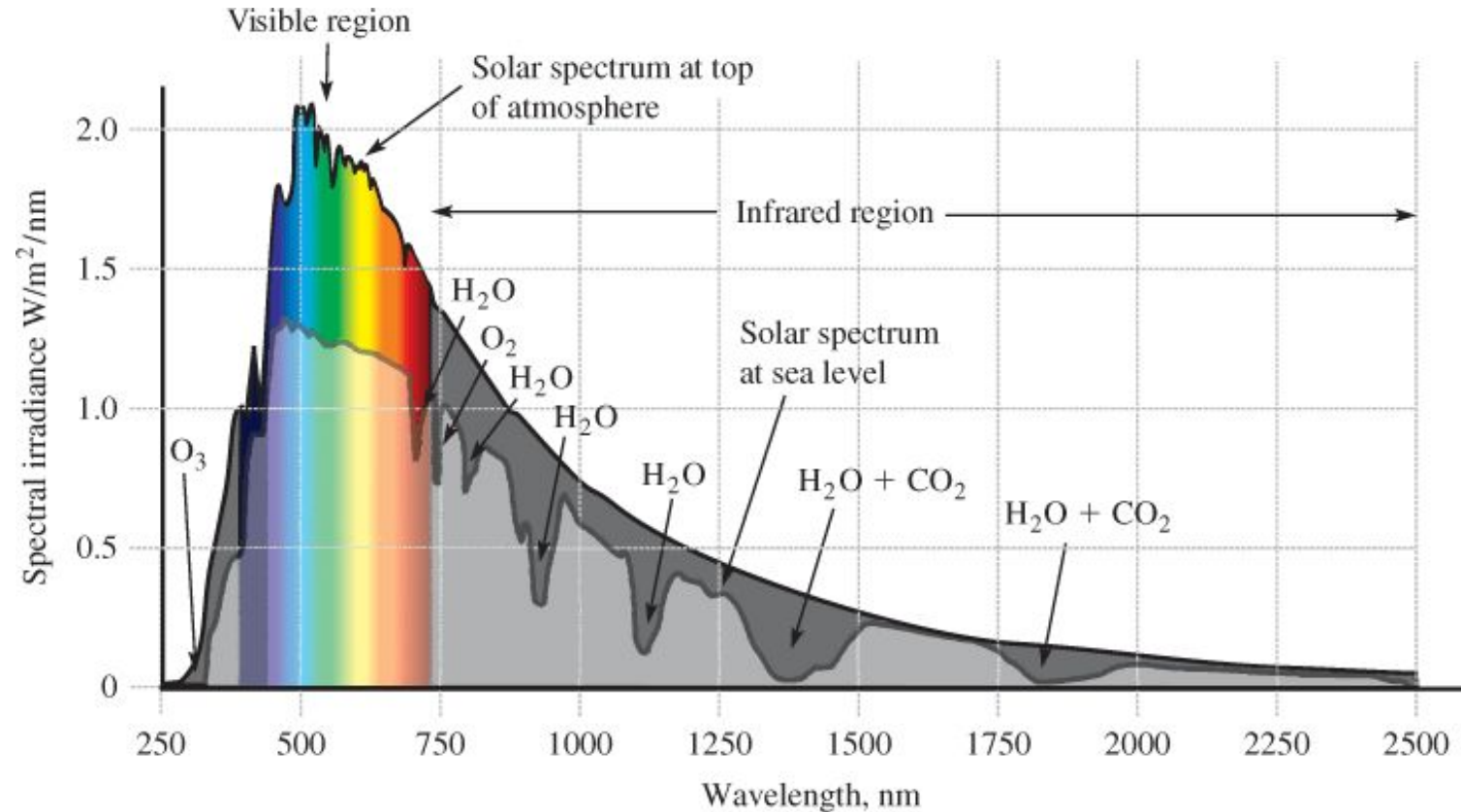


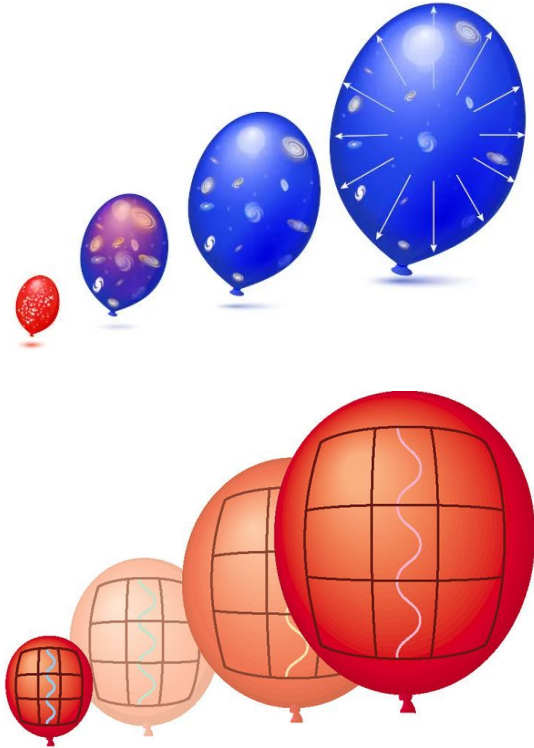
Radiação de Corpo Negro

Luz emitida de origem térmica – corpos opacos, não-reflectivos



Exemplo: o Sol





**George
Gamow**



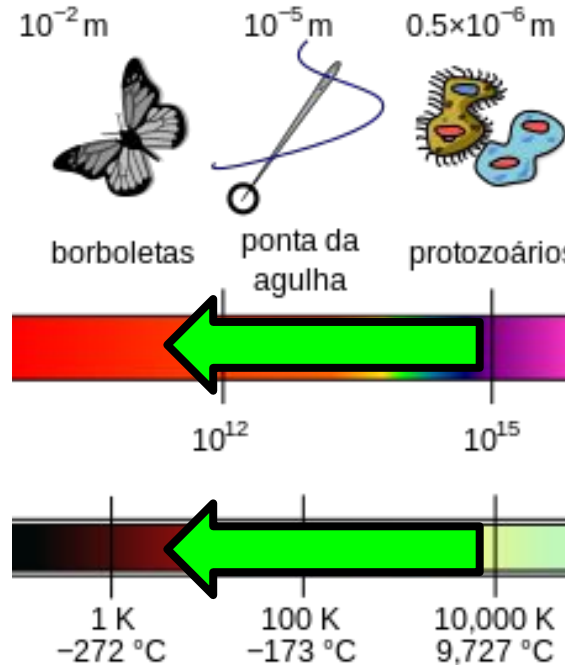
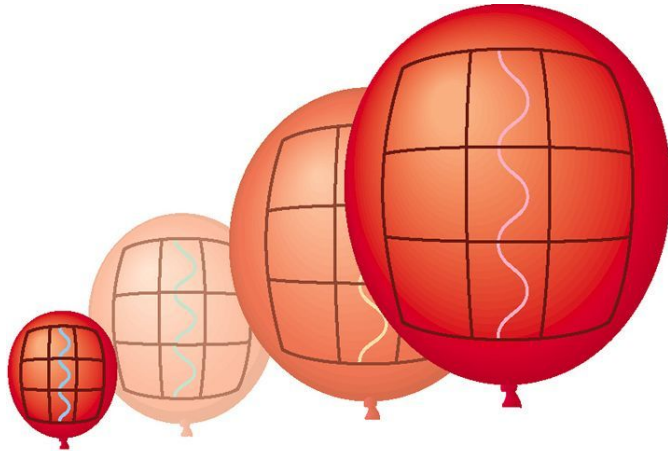
1948!

**Universo quente,
denso, opaco**

**Radiação de corpo
negro *hoje*: 5K**

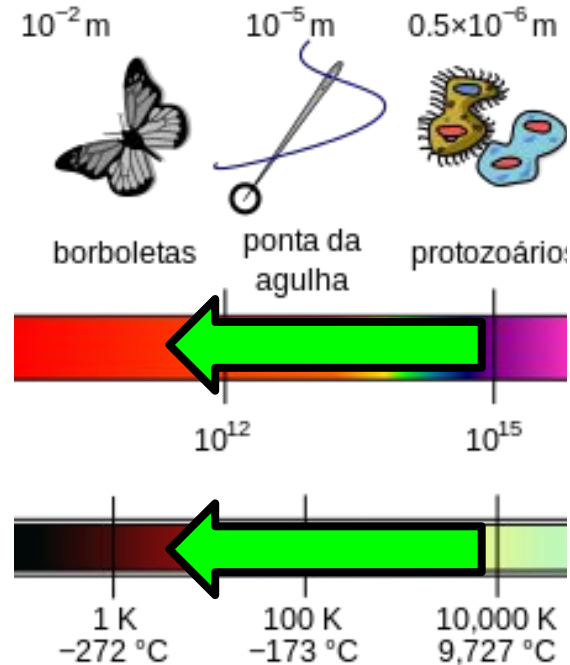
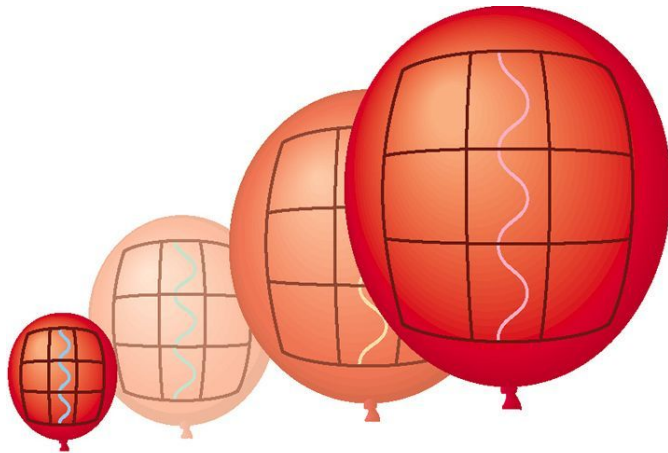
A CMB surgiu muito mais quente! E mais “azul”!

- Redshift foi tão grande que ela alcançou **micro-ondas**

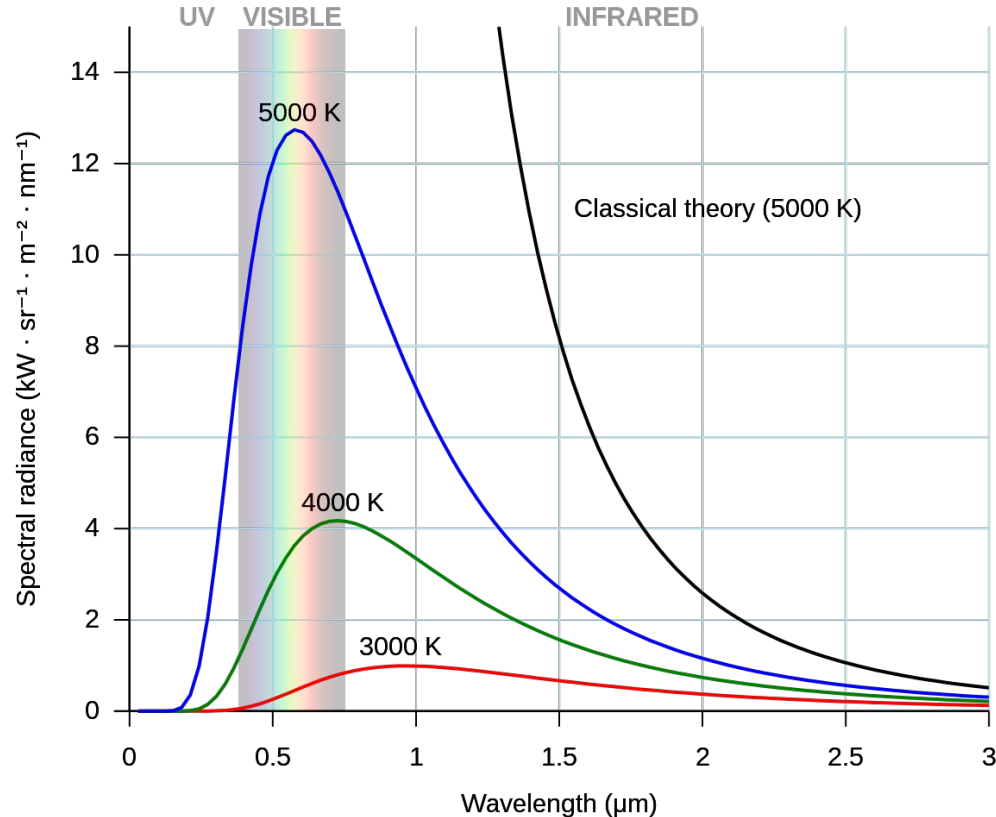


Mais tarde: a formação da CMB

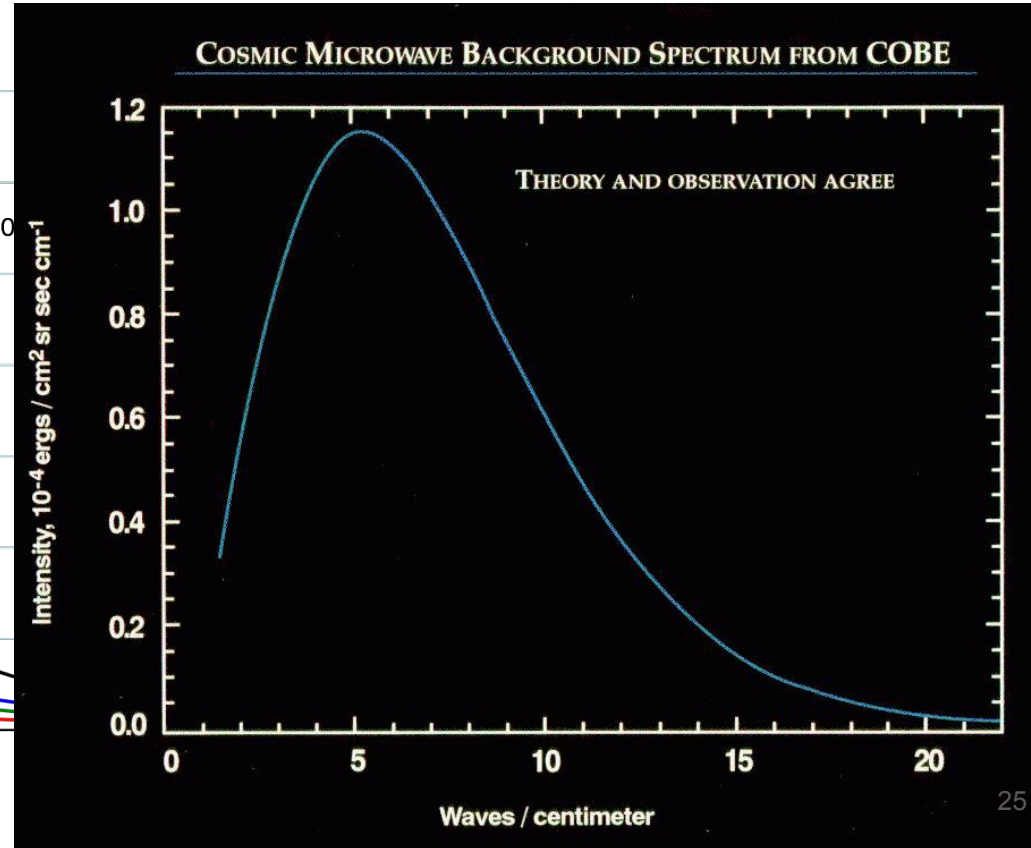
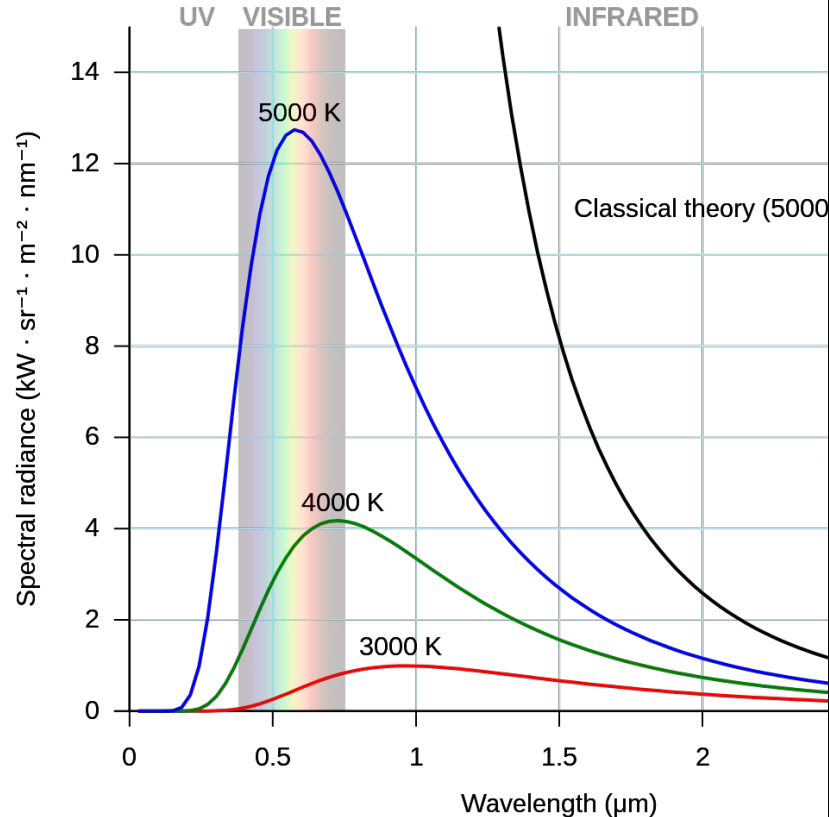
- Spoiler: a temperatura do universo era da ordem de 3000K!



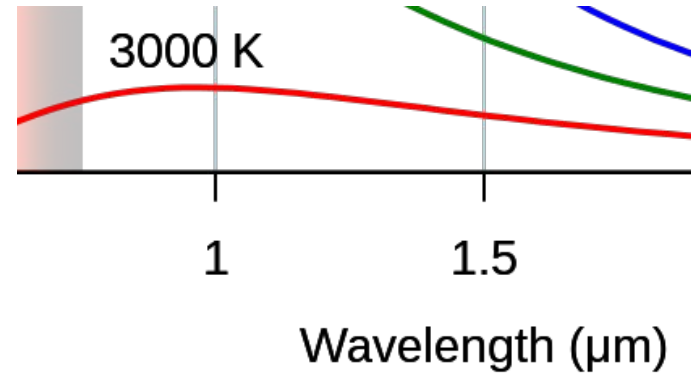
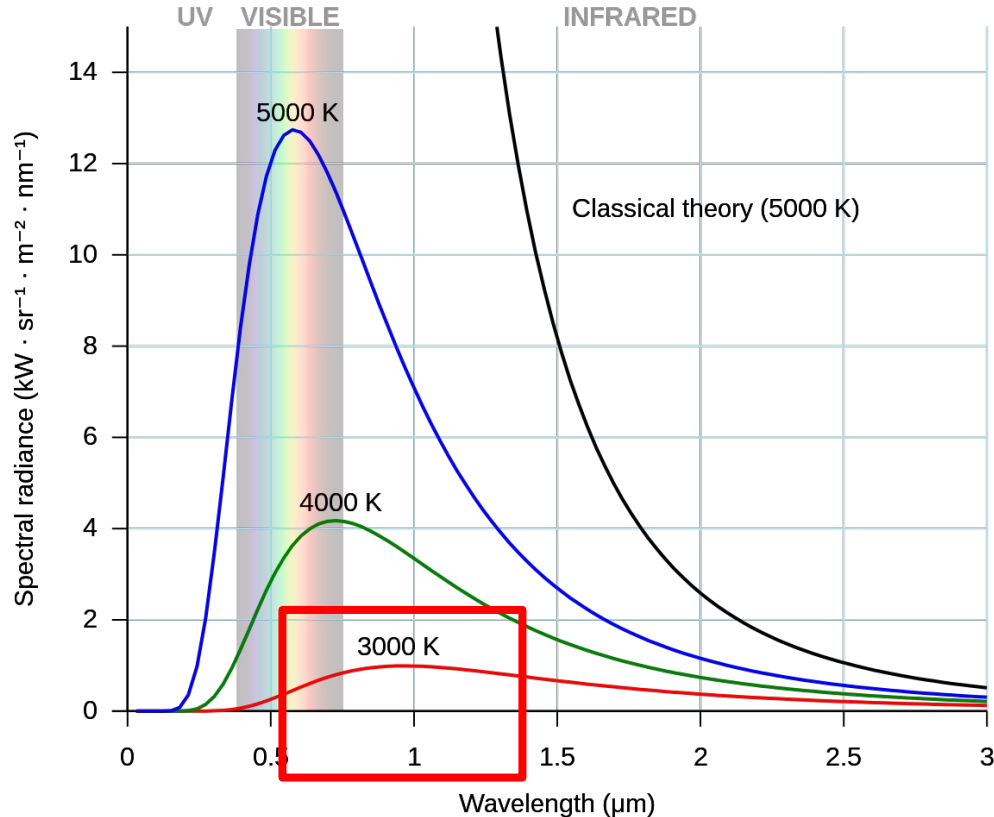
Espectro de Corpo Negro da CMB (COBE/FIRAS)



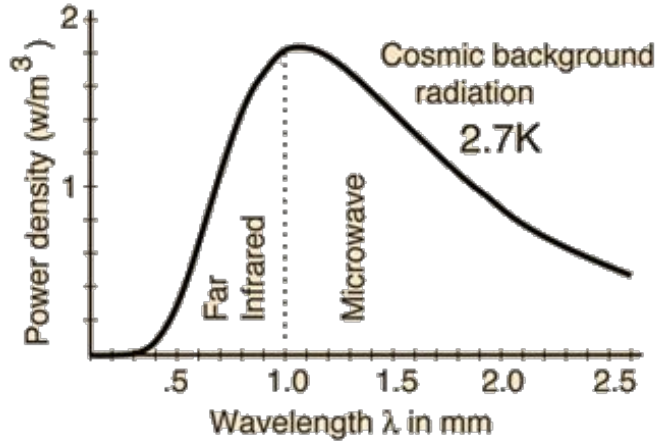
Espectro de Corpo Negro da CMB (COBE/FIRAS)



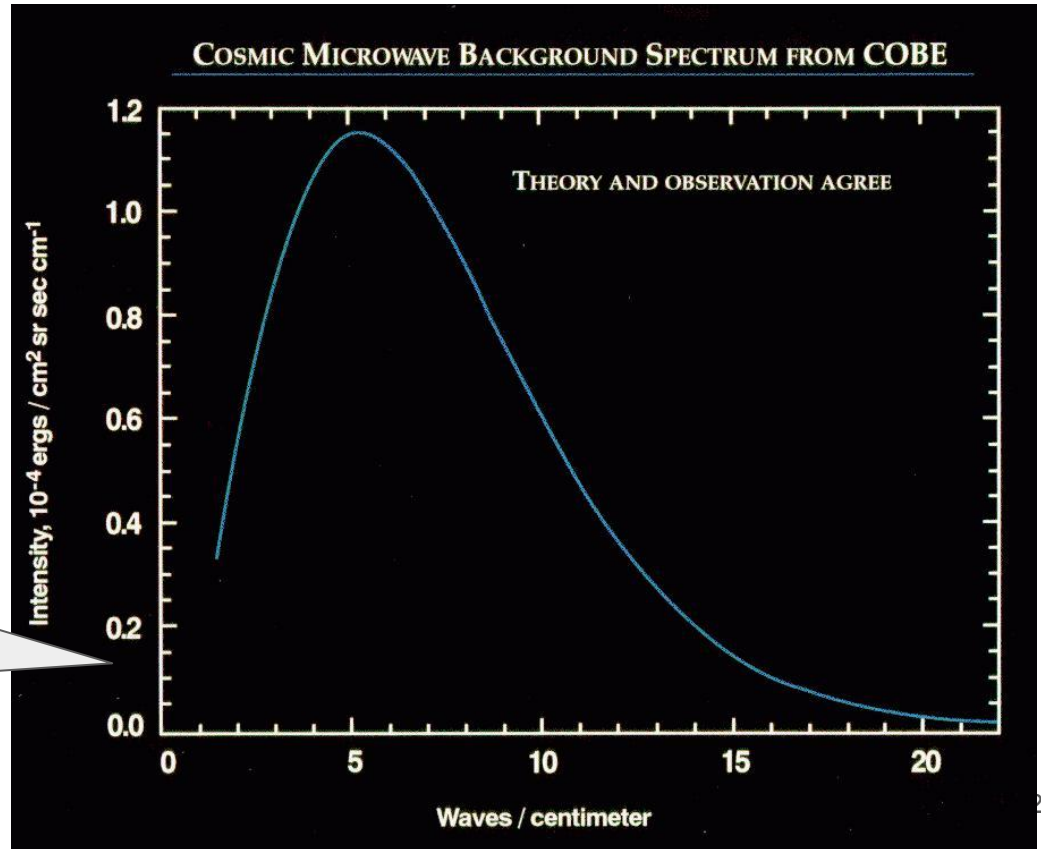
Pico antes: ~ 1 micrometro = 10^{-6}m = 0.000001m



Pico agora: ~ 1 milimetro = 10^{-3}m = 0.001m

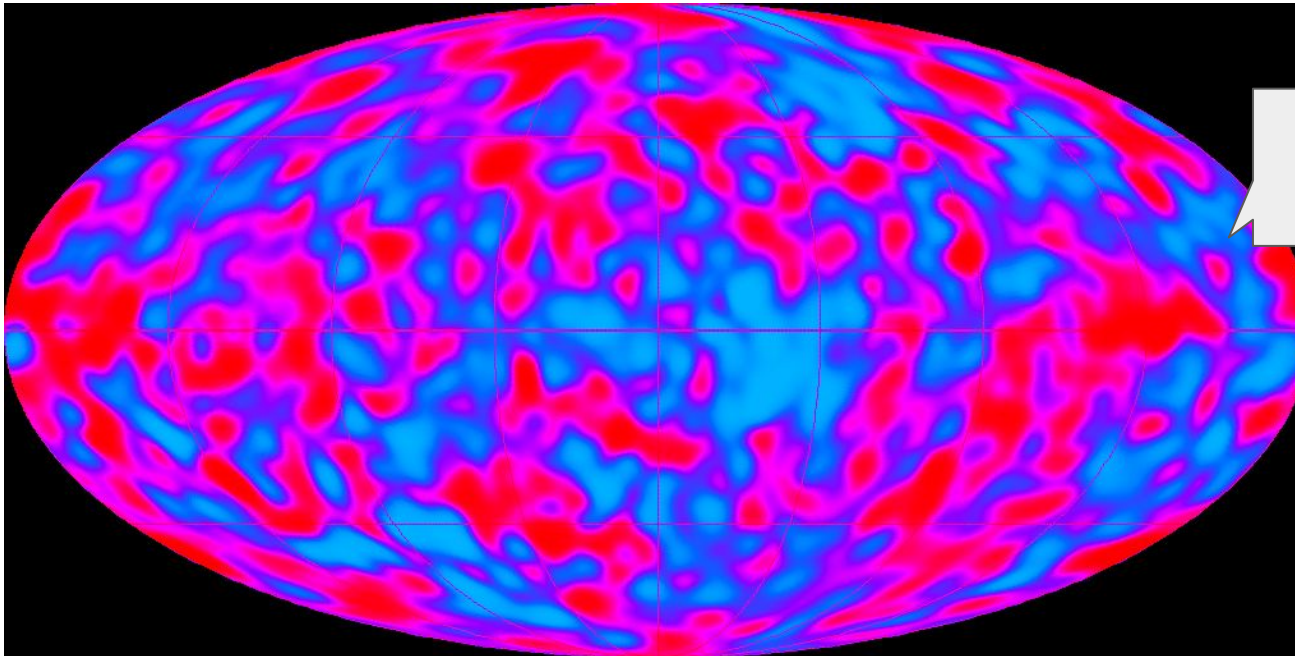


5 ondas em 10mm
1 onda com $\lambda = 2\text{mm}$



COBE também avançou no imageamento

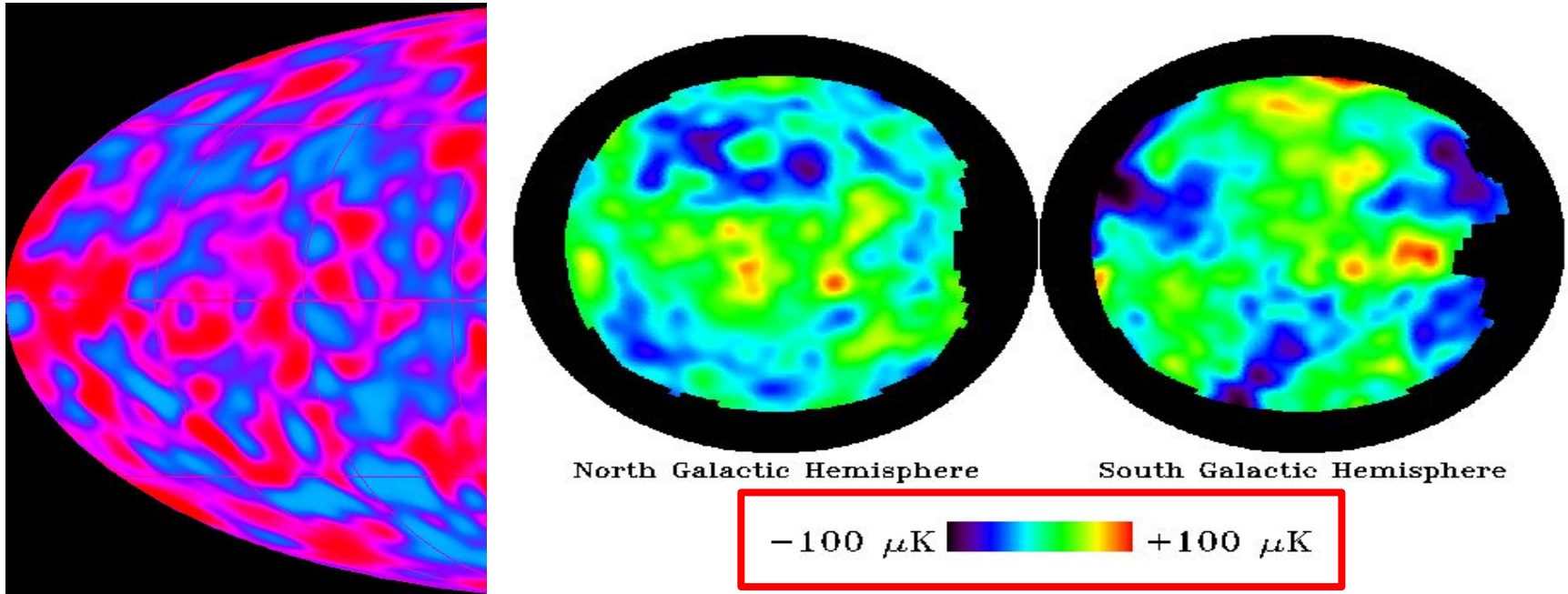
- Mapa medido pelo COBE



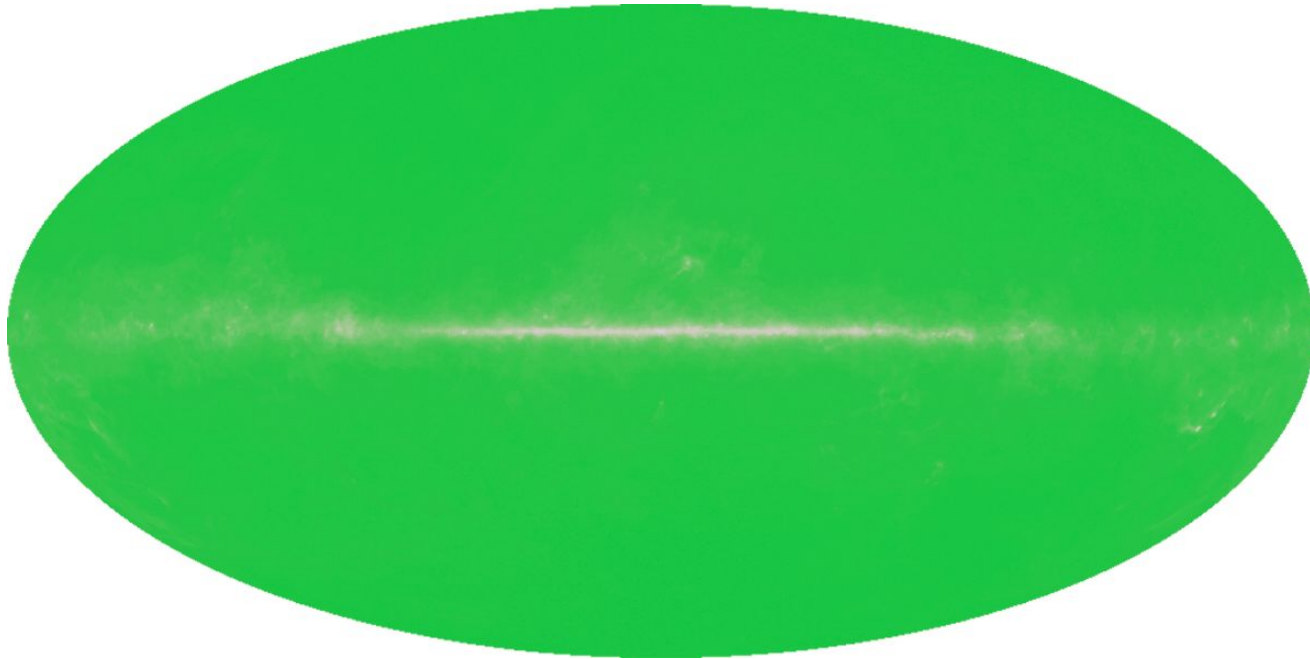
**Variações na
temperatura?**

COBE também avançou no imageamento

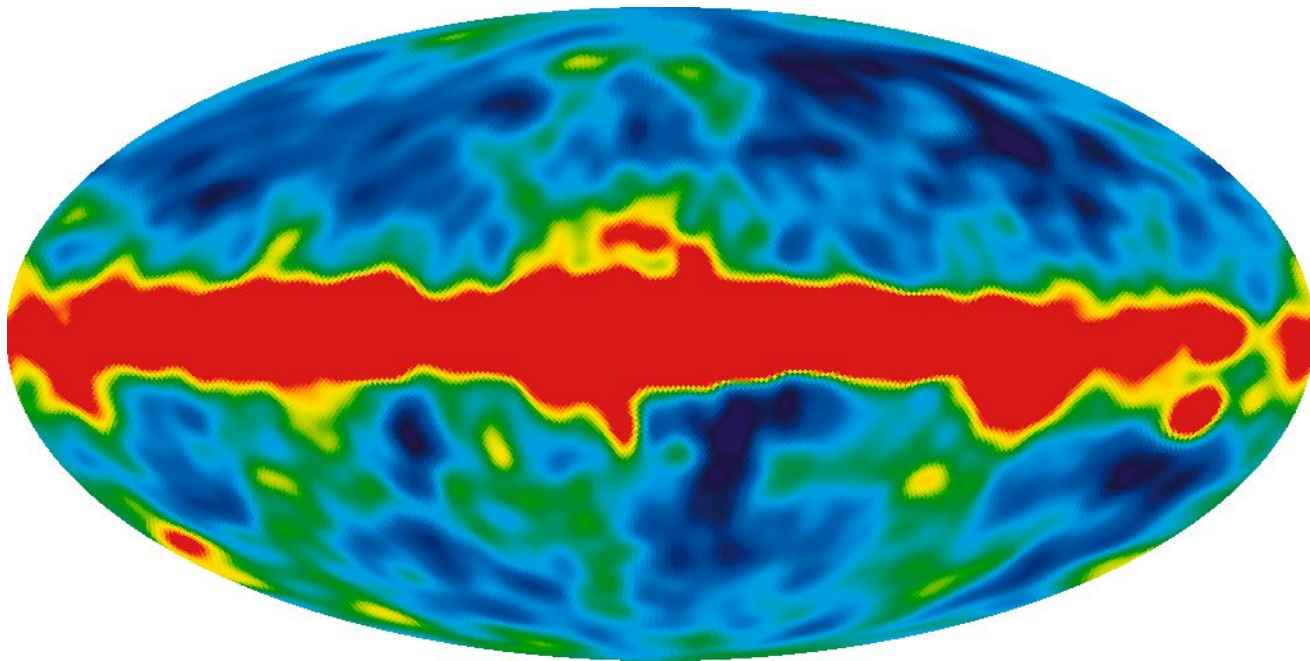
- Mapa medido pelo COBE



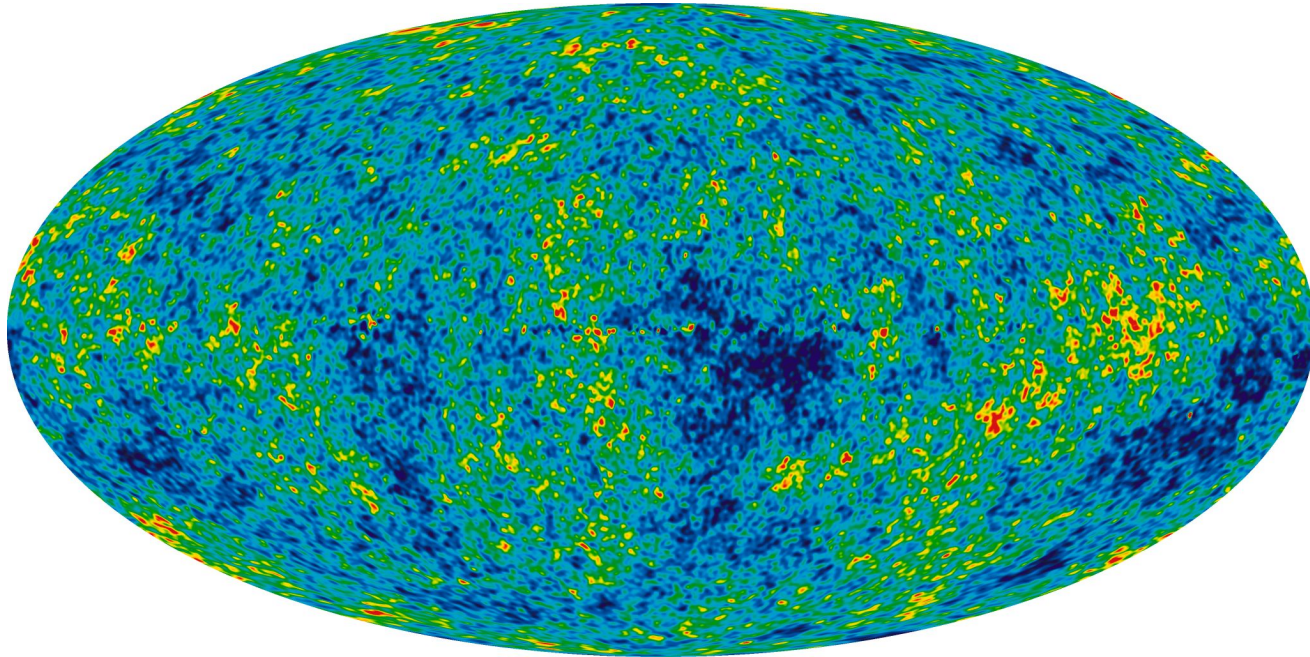
Mapa da CMB medido por Penzias e Wilson



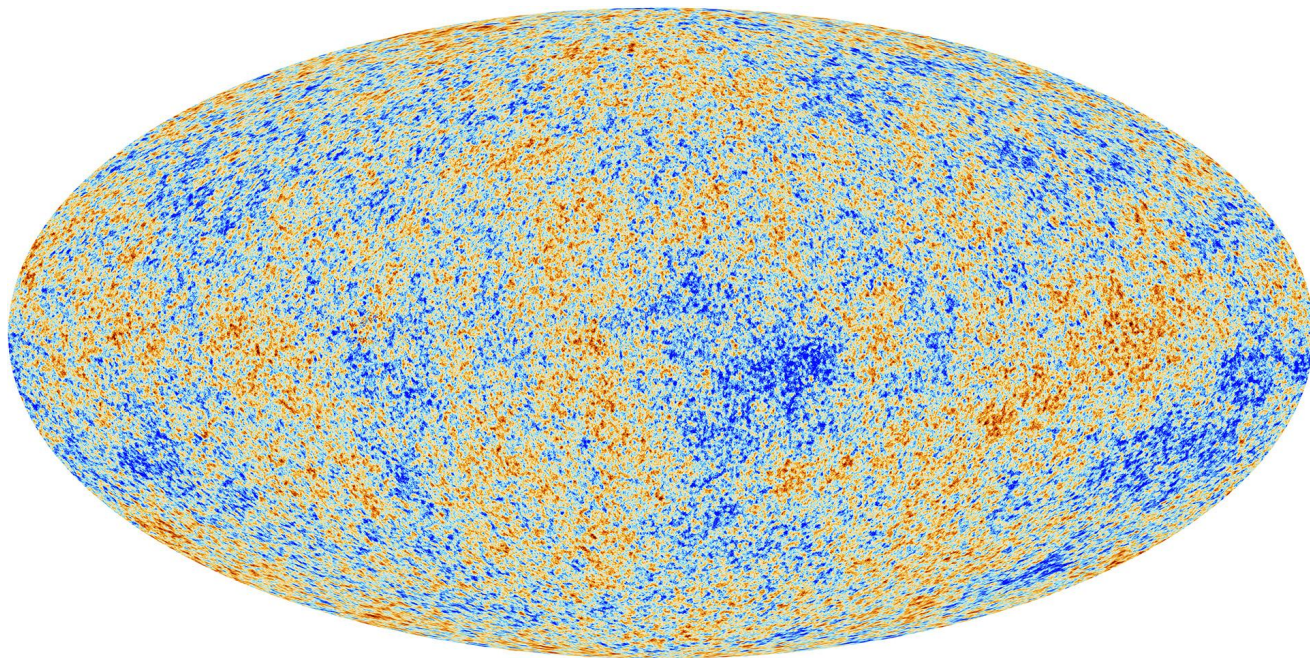
Novas imagens da CMB - COBE



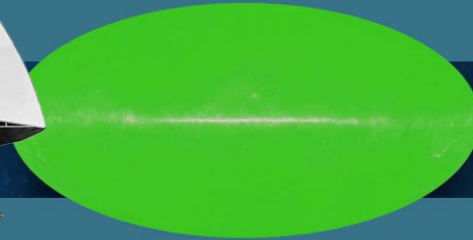
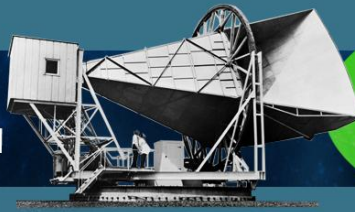
Novas imagens da CMB - WMAP



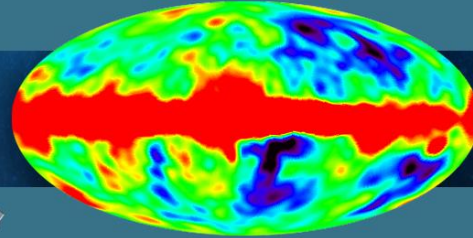
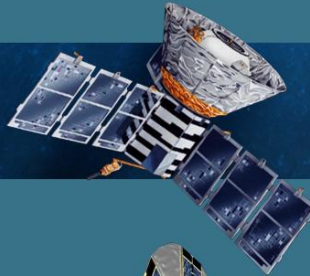
Novas imagens da CMB - Planck



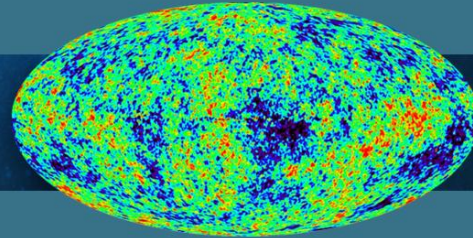
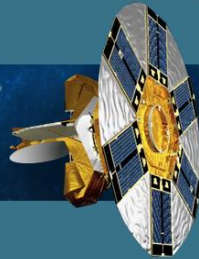
1962
PENZIAS & WILSON



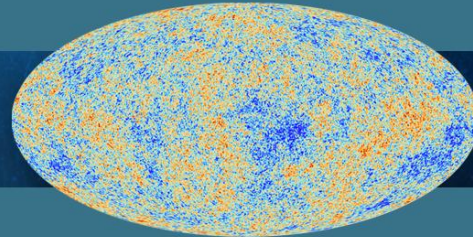
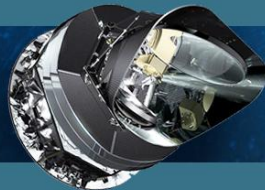
1989-1993
COBE



2001-2010
WMAP



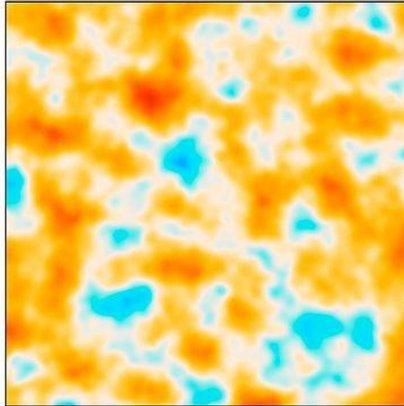
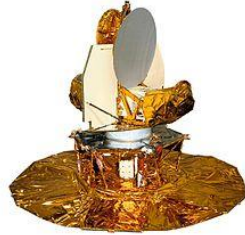
2009-2013
PLANK



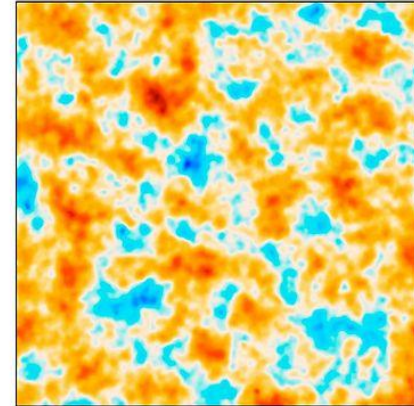
Comparativo entre satélites



COBE



WMAP

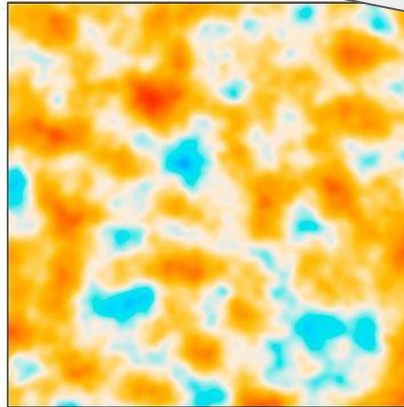


Planck

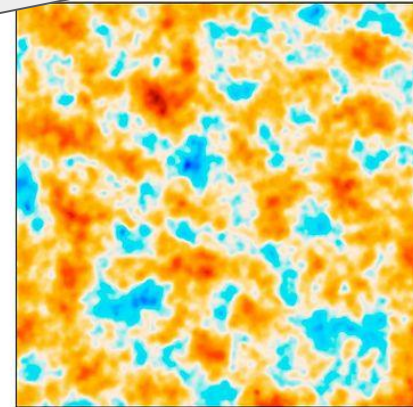
Comparativo entre satélites



COBE



WMAP



Planck

De onde vêm essas variações de temperatura?

A Física da CMB

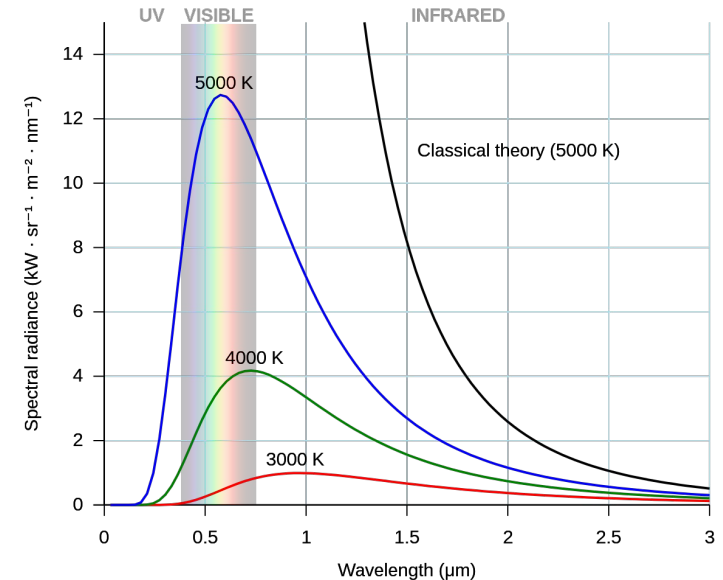
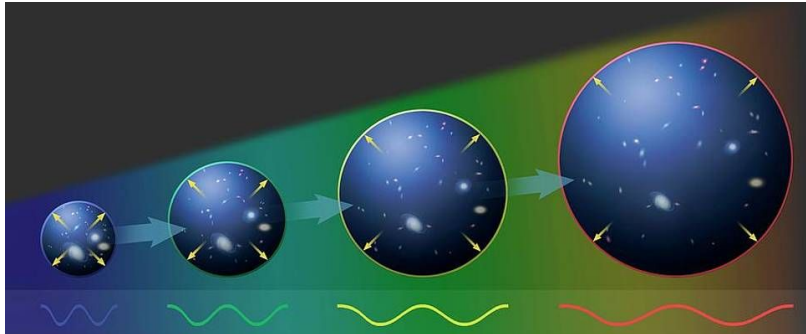
Como a CMB surgiu?

Como Gamow e Dicke postularam sua existência?

Voltando à história térmica do universo



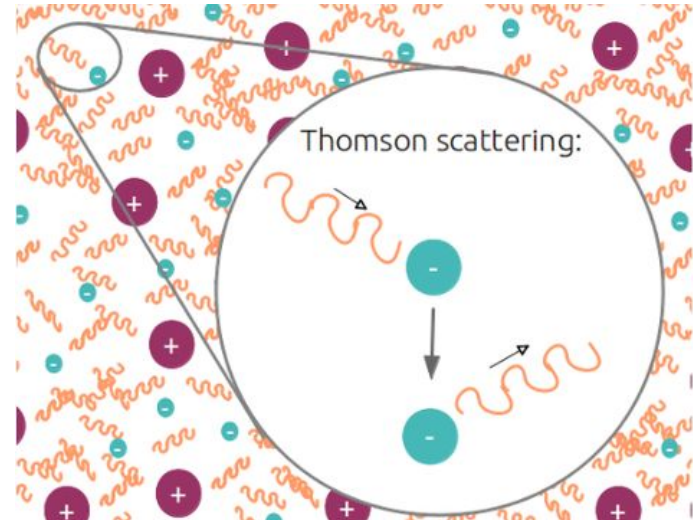
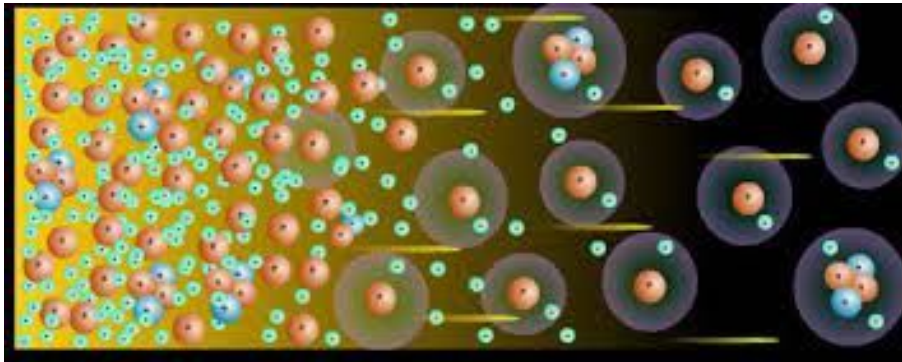
- Vamos usar o conhecimento do começo da palestra
- Evolução do universo
- Radiação de Corpo Negro
- Redshift cosmológico



Ingredientes do universo jovem: 300 mil anos!

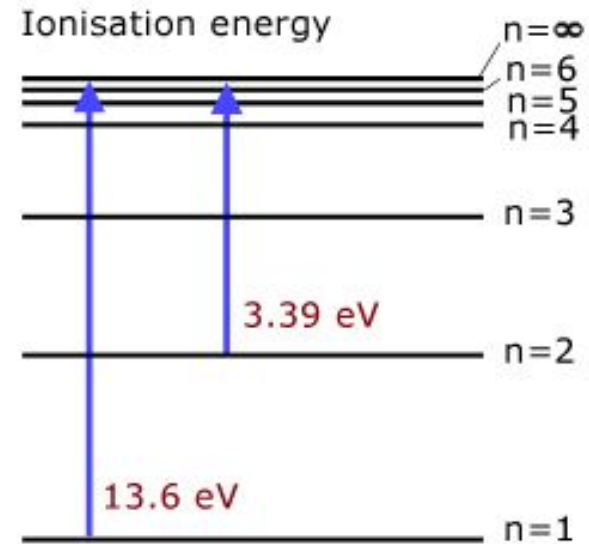
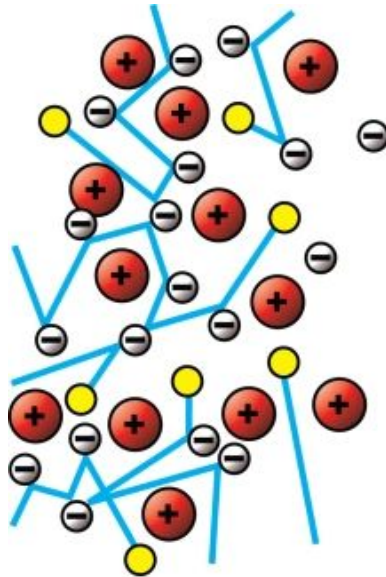


- Fótons, Bárions, Matéria Escura
- Interação Fótons vs. Hidrogênio: ionização
 - Espalhamento Thomson



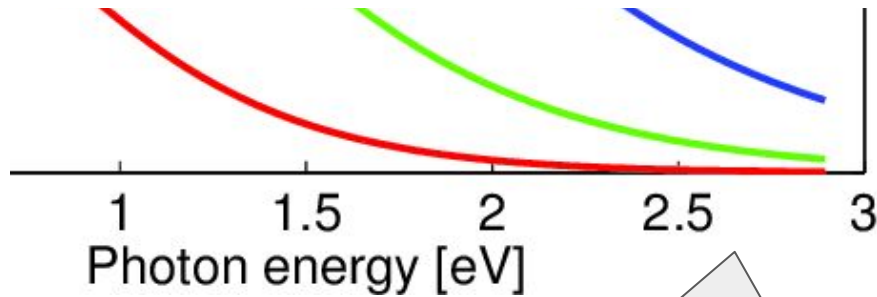
Hidrogênio é ionizado por fótons à 13.6eV

- Para $T \sim 13.6$ eV, Hidrogênio não consegue se manter neutro!

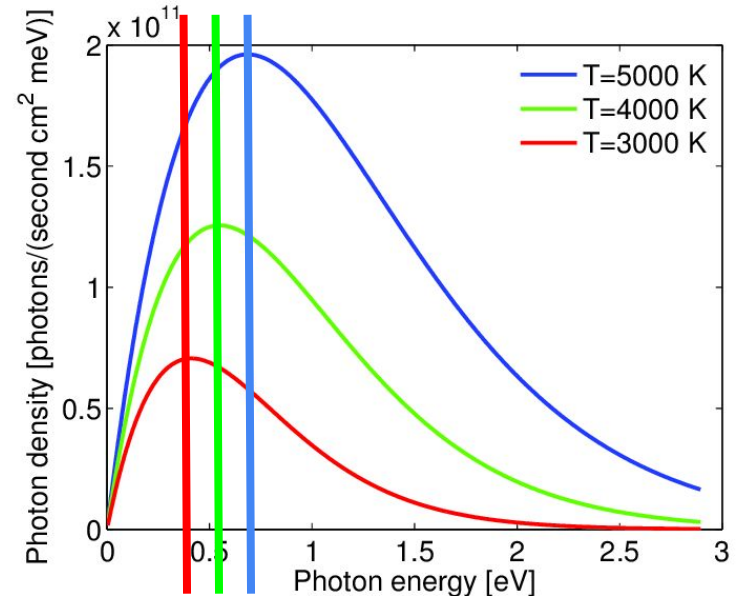


1 bárion para cada 2 bilhões de fótons

- Média inferior a 13.6eV, mas muitos fótons com essa energia!

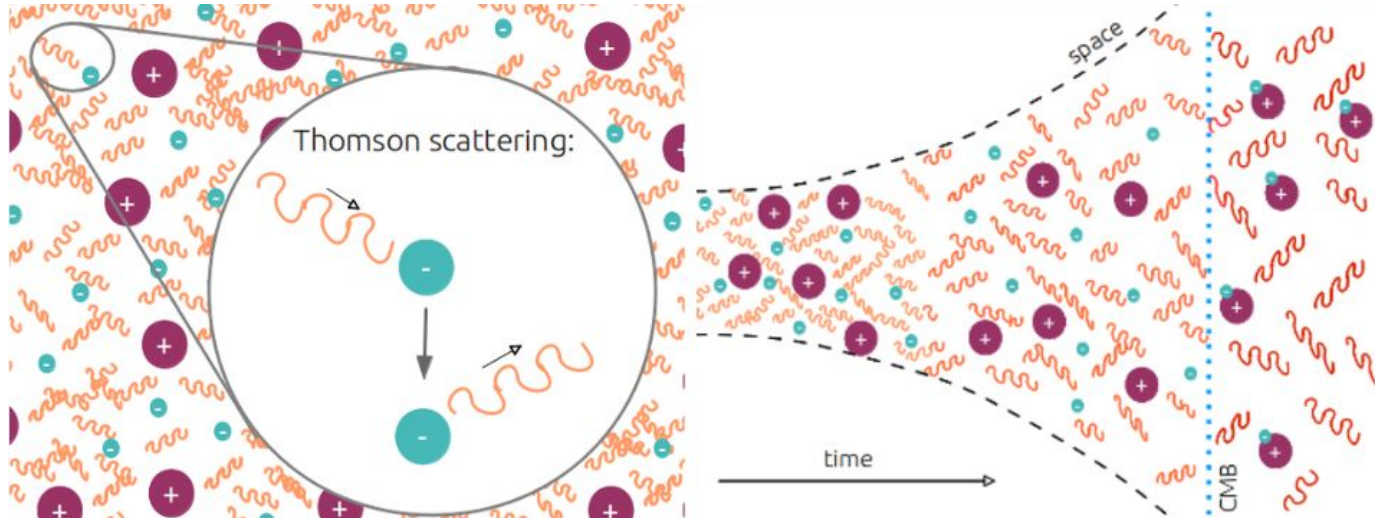


Cauda exponencial: fótons energéticos além da média!



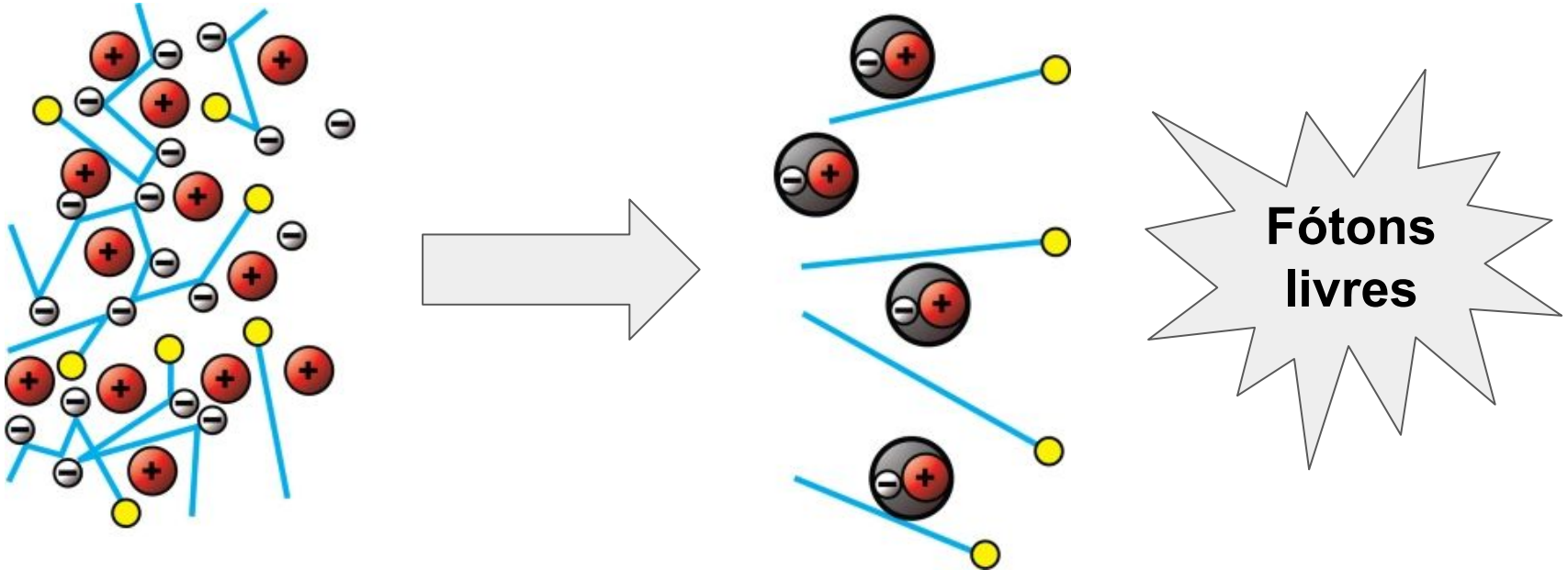
Universo expande = Fótons esfriam

- Energia média de 0.323eV, Temperatura = 3000K
- Expansão do Universo vence o Espalhamento Thomson



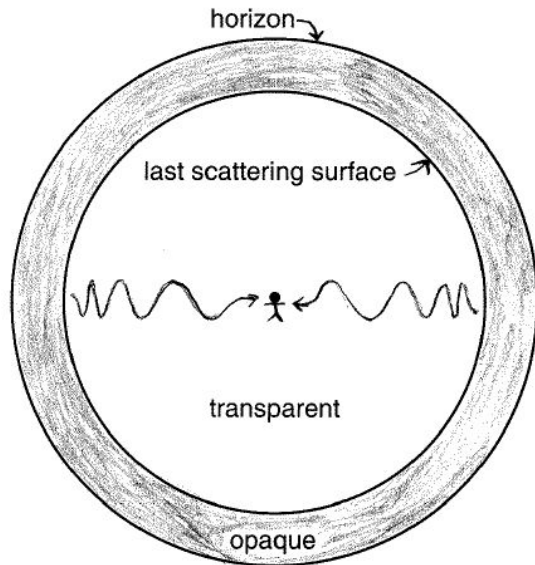
Fótons esfriam = Hidrogênio neutro

- Átomos de Hidrogênio formados!



Fótons livres, não sofrem mais espalhamento

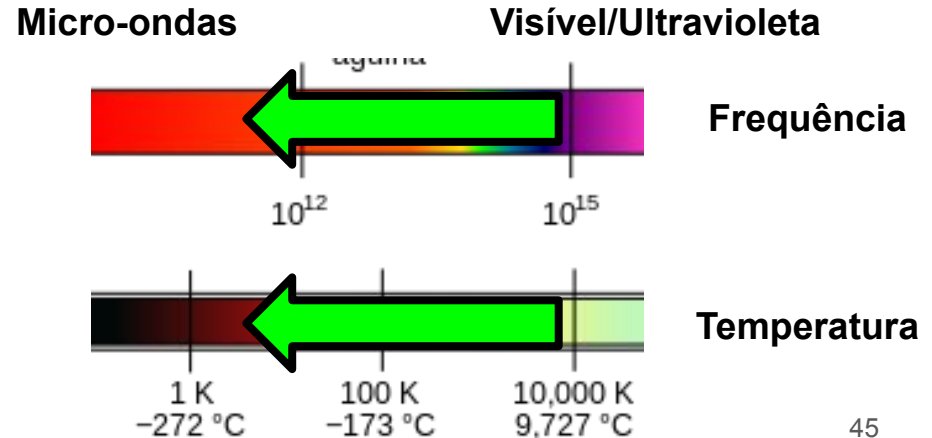
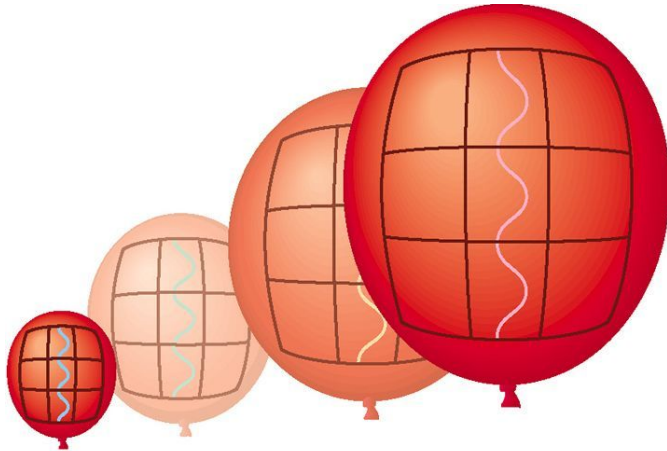
- Definição da **Superfície de Último Espalhamento**
- Idade do universo = 350.000 anos



- Extensão: ~44000 Mpc
- ~13.599.650.000 anos-luz

Temperatura de 3000K = Espectro perto do visível

- Redshift sofrido de lá até hoje: 1100 vezes!
- Comprimento de onda 1100x maior do que na época!



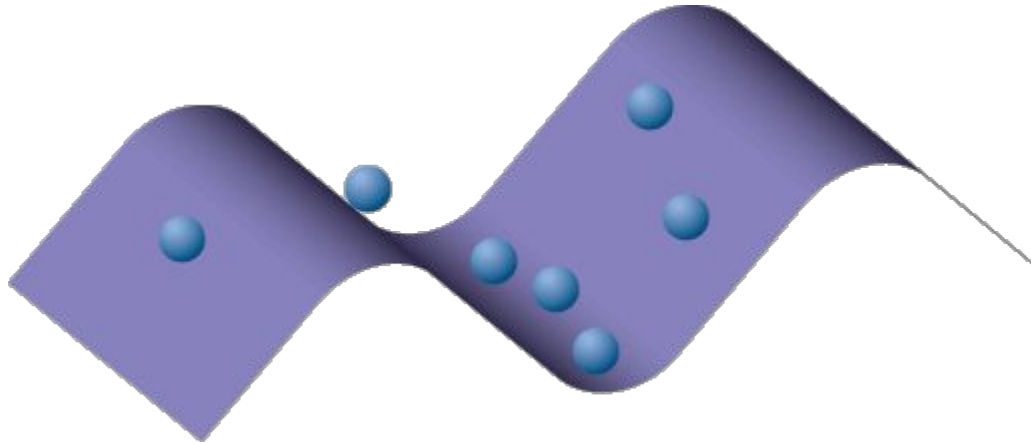
As anisotropias da CMB

Um enfoque na física pré-recombinação

Como fótons e bárions interagem antes do último-espalhamento

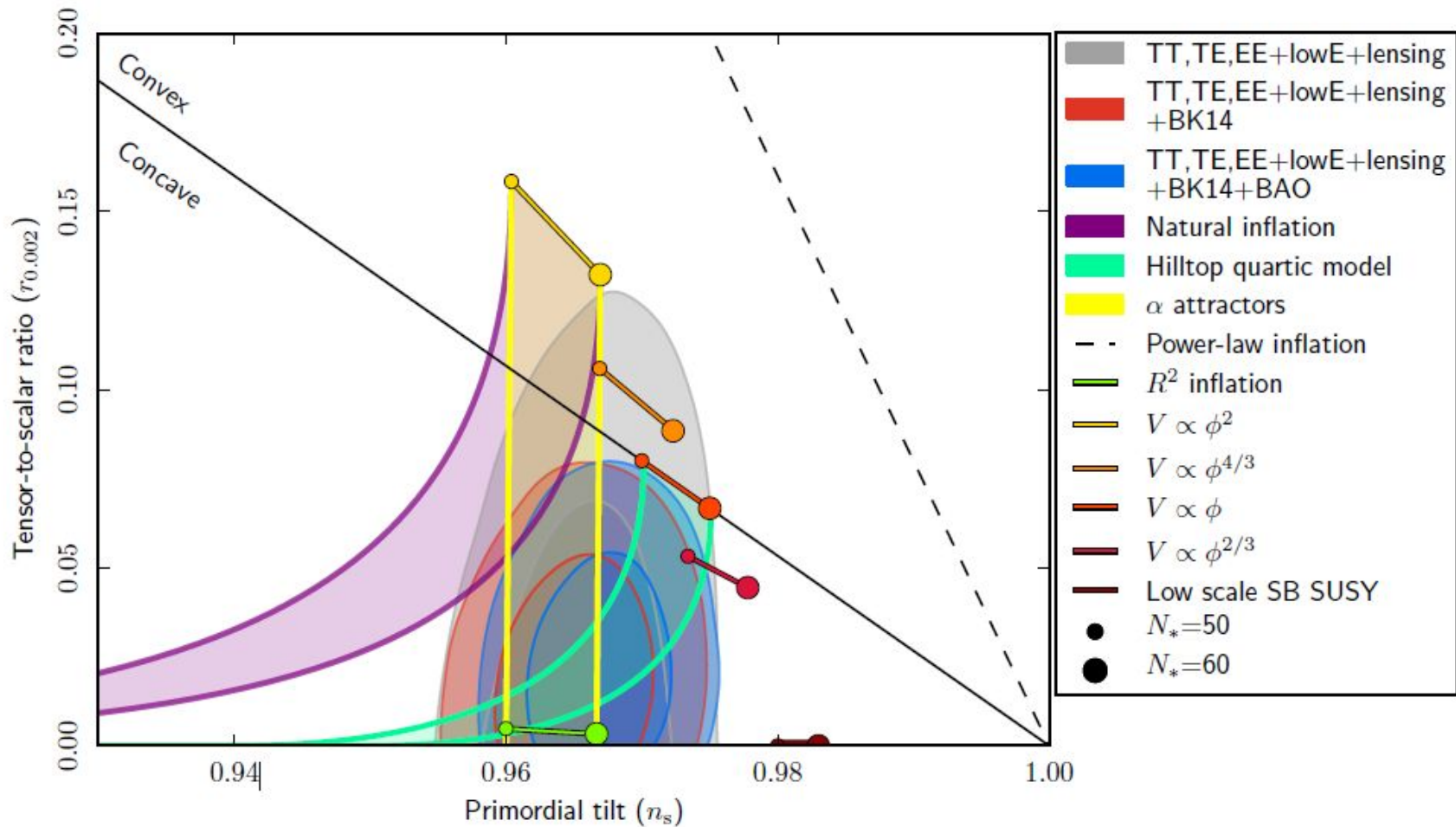
Começando pelo começo: universo primordial

- **Inflação: fase anterior ao Big-Bang**
 - **Perturbações de curvatura = Flutuações no valor do campo gravitacional**

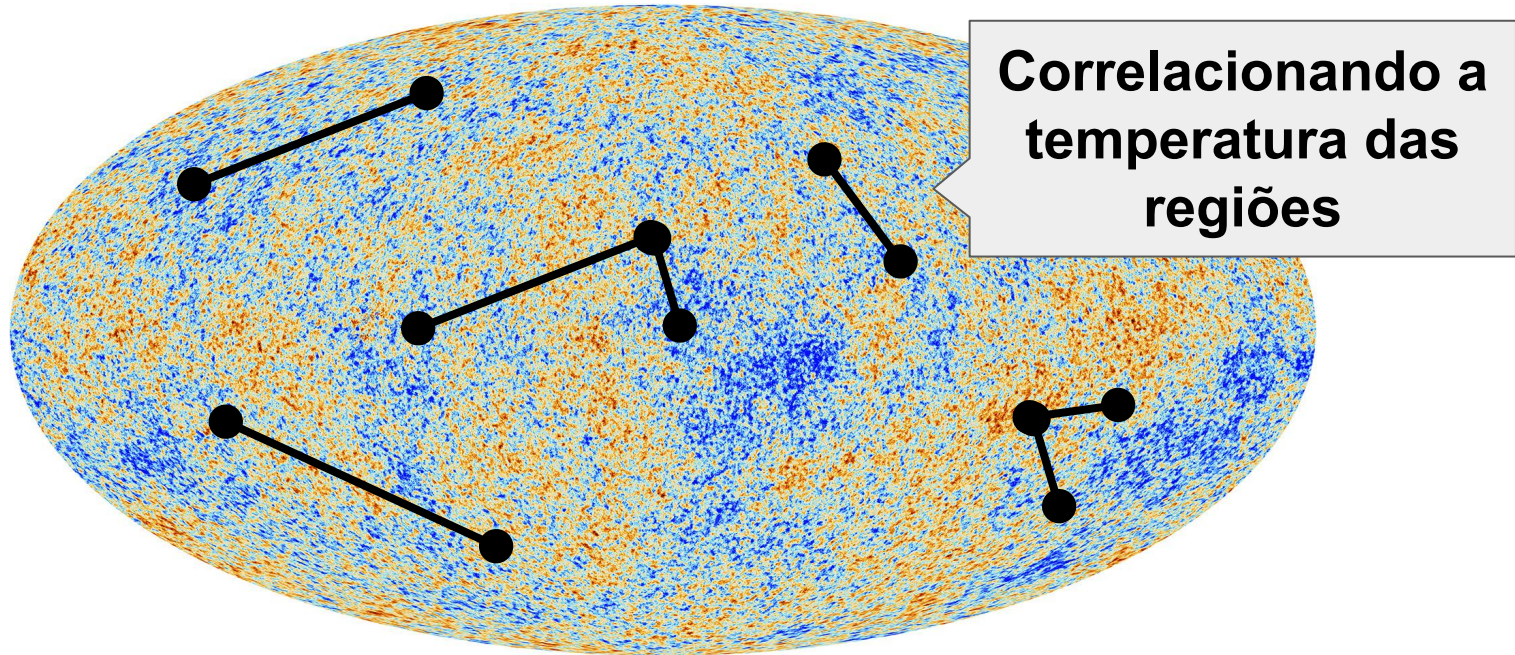


CMB e o Universo Primordial

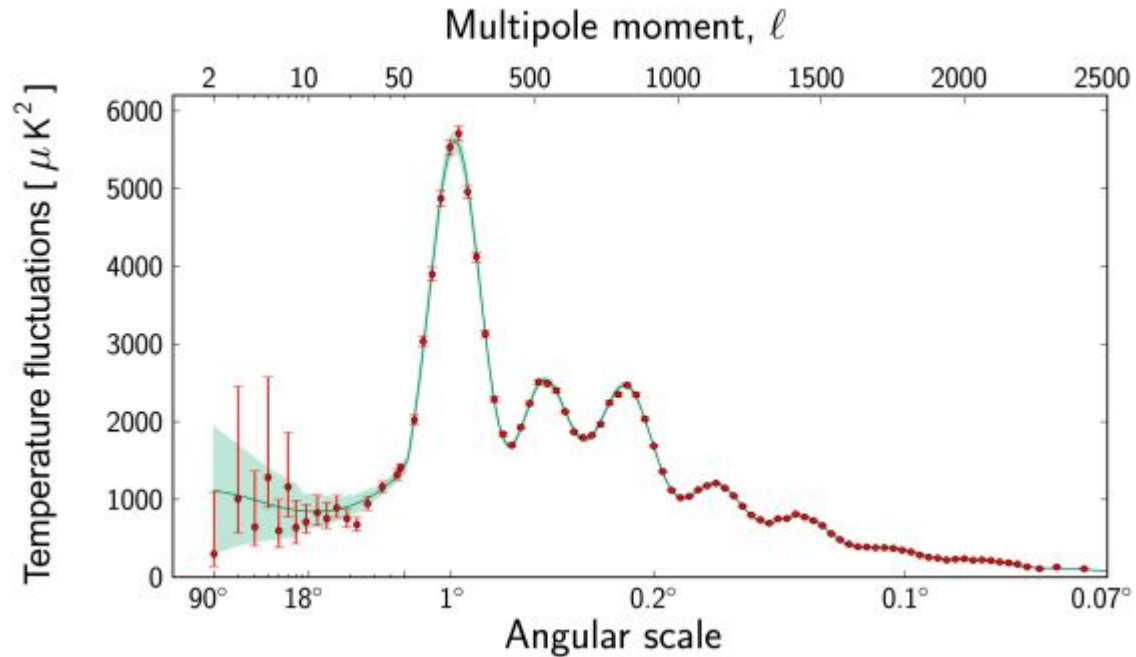
- Principal fonte de informação sobre o universo primordial
- Perturbações de curvatura: precisamos da **inflação**
- Diferentes formulações da inflação preveem diferentes *formas* para a CMB: estatística muda!
 - Índice espectral, não-Gaussianidade
- Ondas gravitacionais primordiais também



Distribuição estatística das flutuações

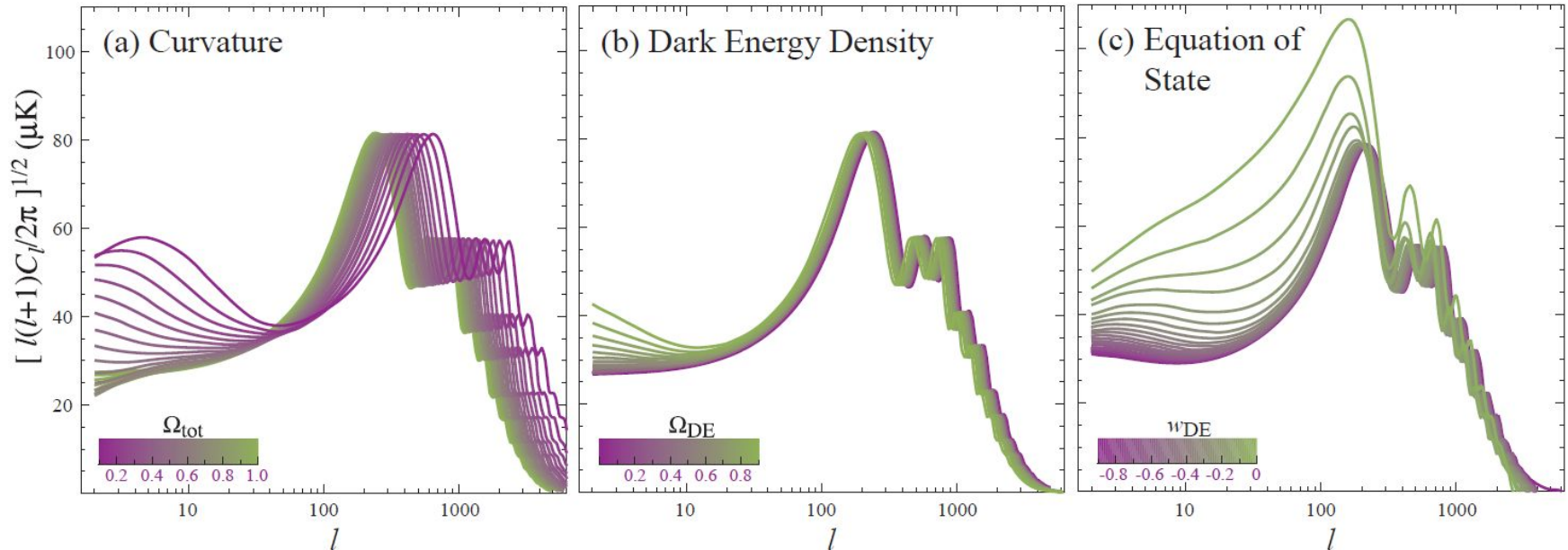


Resultado: Espectro de Potência

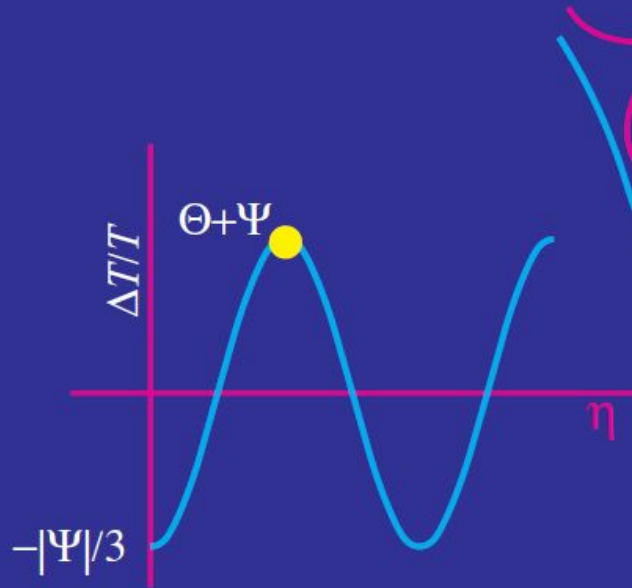


1º pico: curvatura e energia escura

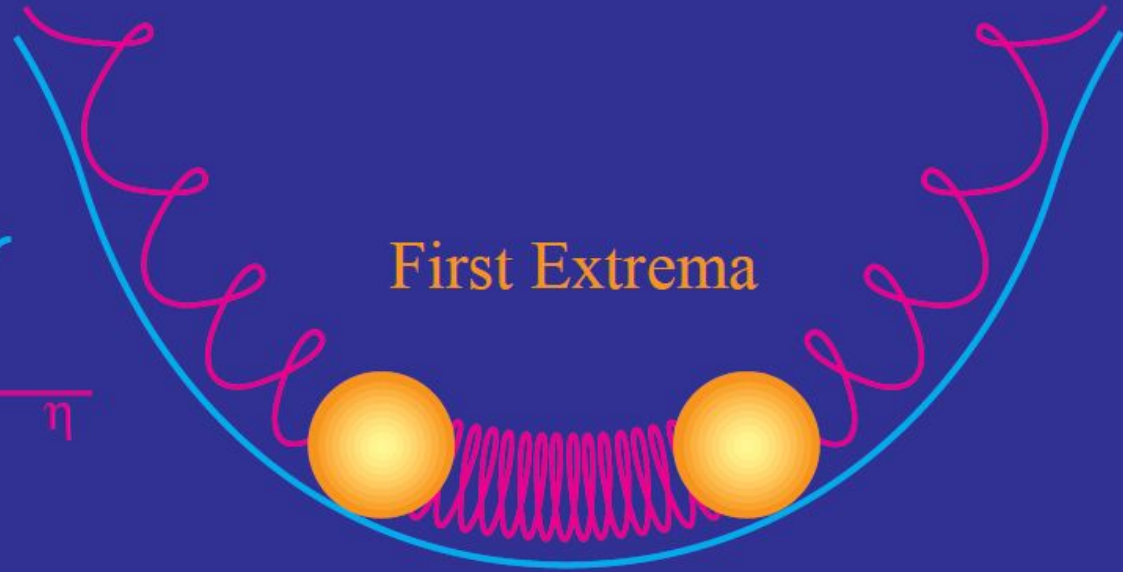
- Posição determina curvatura, amplitude relacionada a DE



1º pico: Compressão do fluido

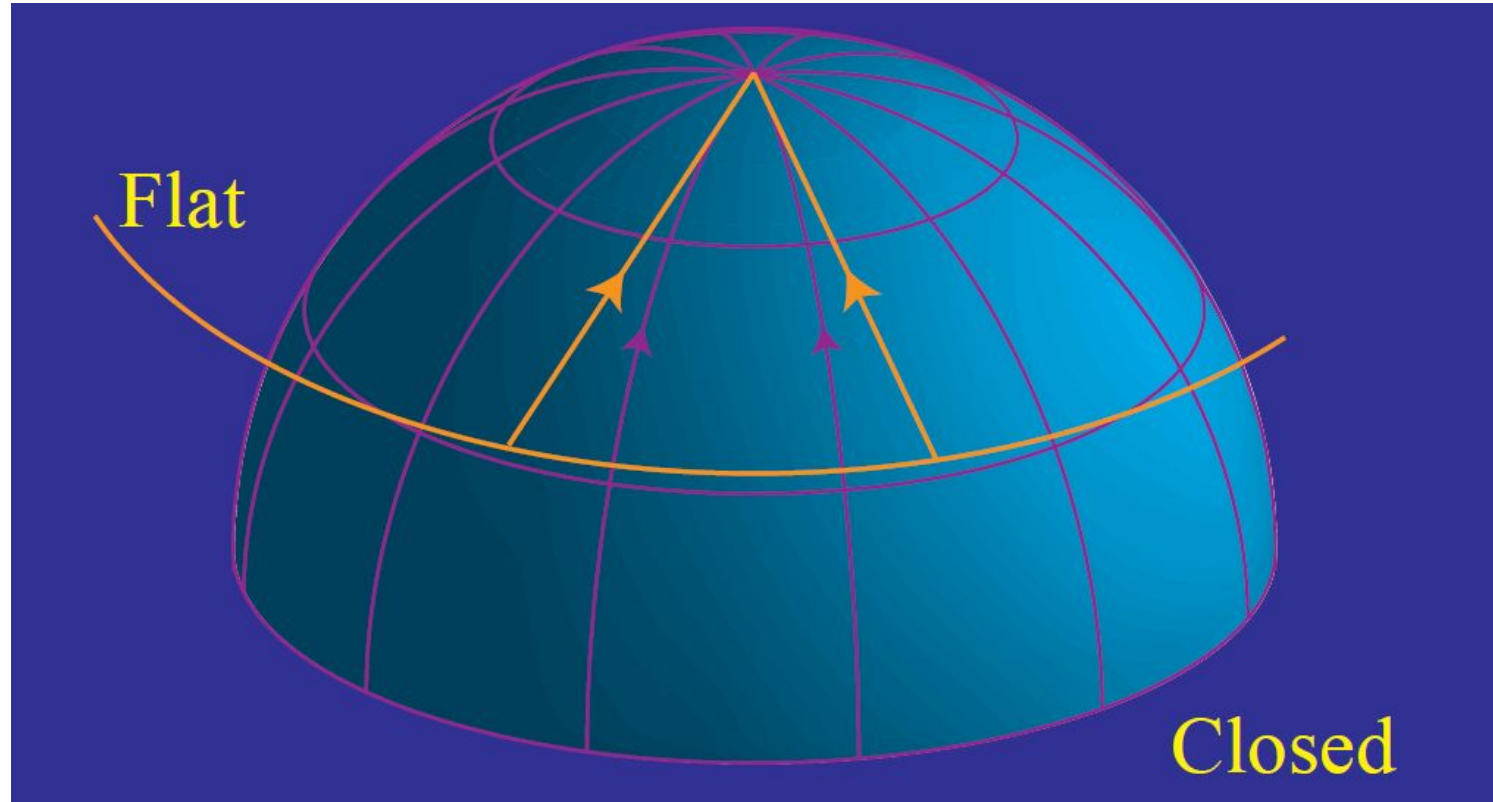


Peebles & Yu (1970)



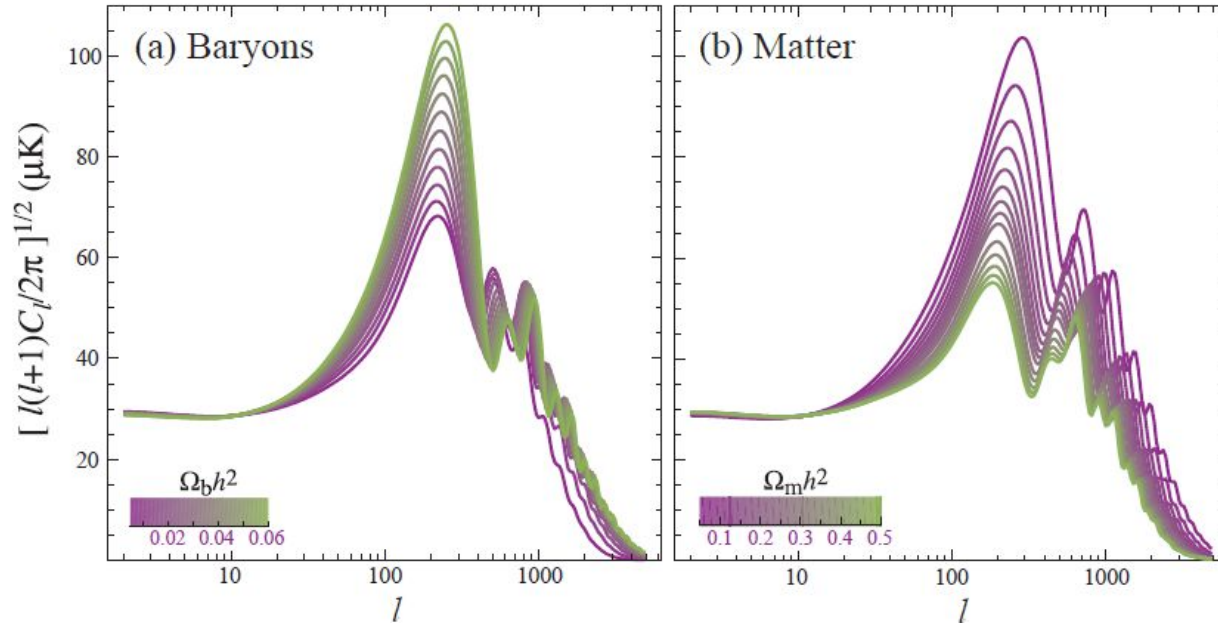
Hu & Sugiyama (1995); Hu, Sugiyama & Silk (1997)

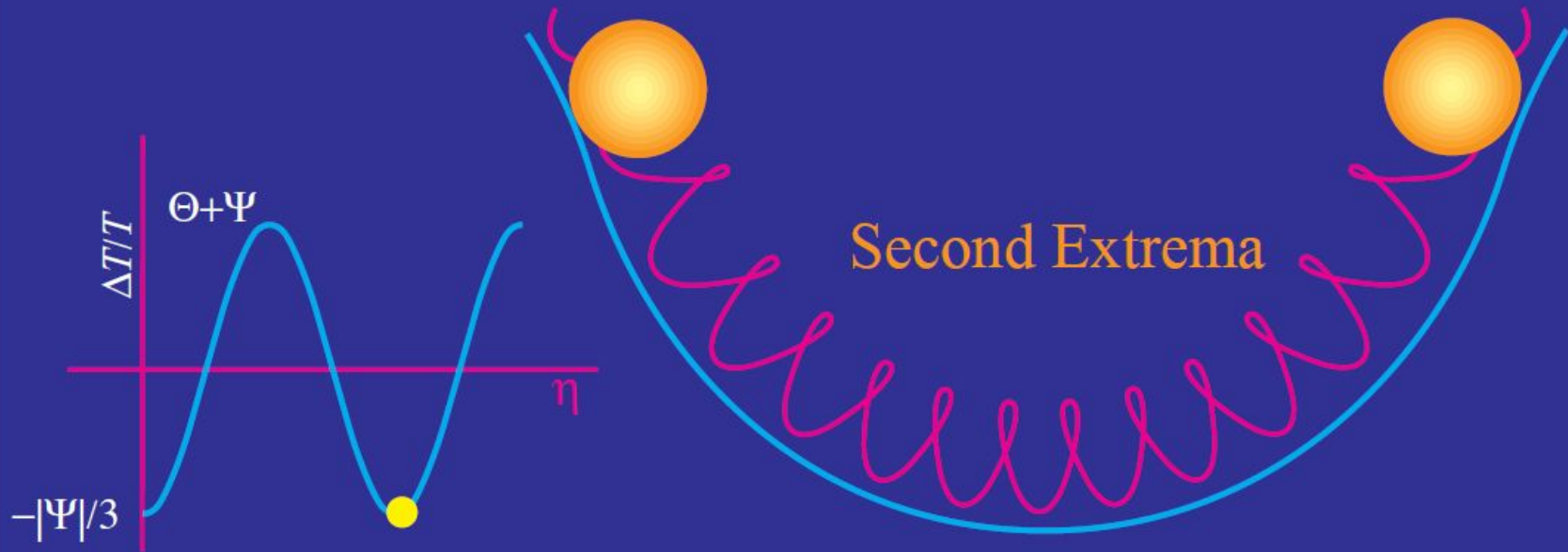
1º pico: Distância angular vs. curvatura



2º pico: bárions

- O 2º pico vem da expansão do fluido = rarefação





Peebles & Yu (1970)

Hu & Sugiyama (1995); Hu, Sugiyama & Silk (1997)

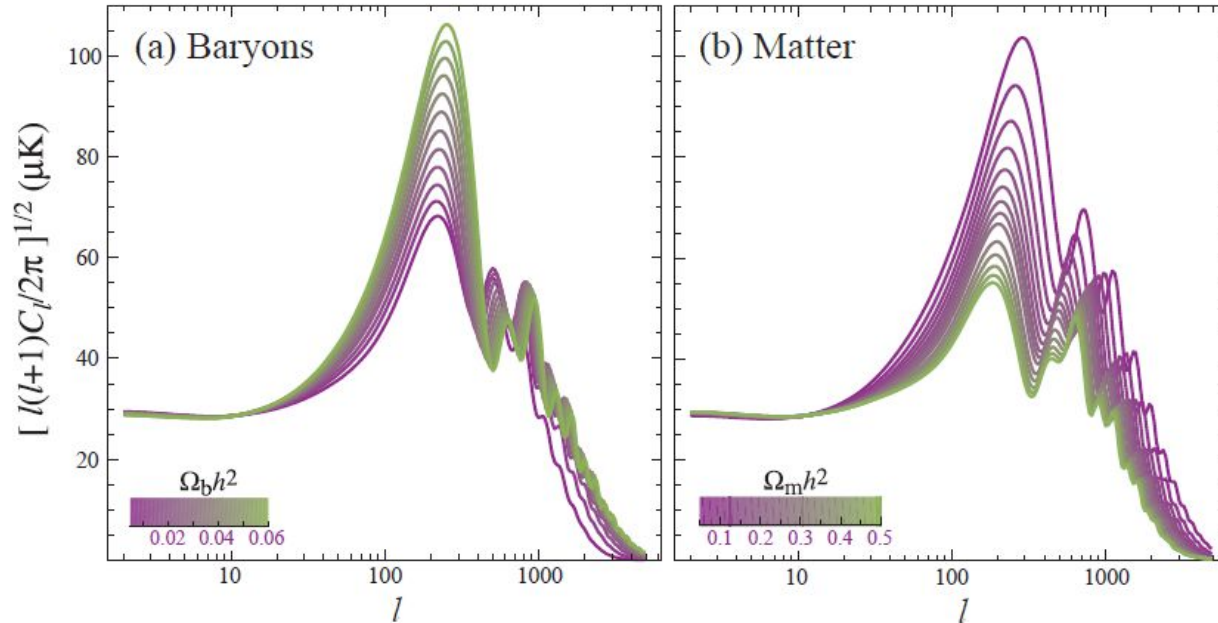
Se tem mais bárions no fluido, ele tem maior massa

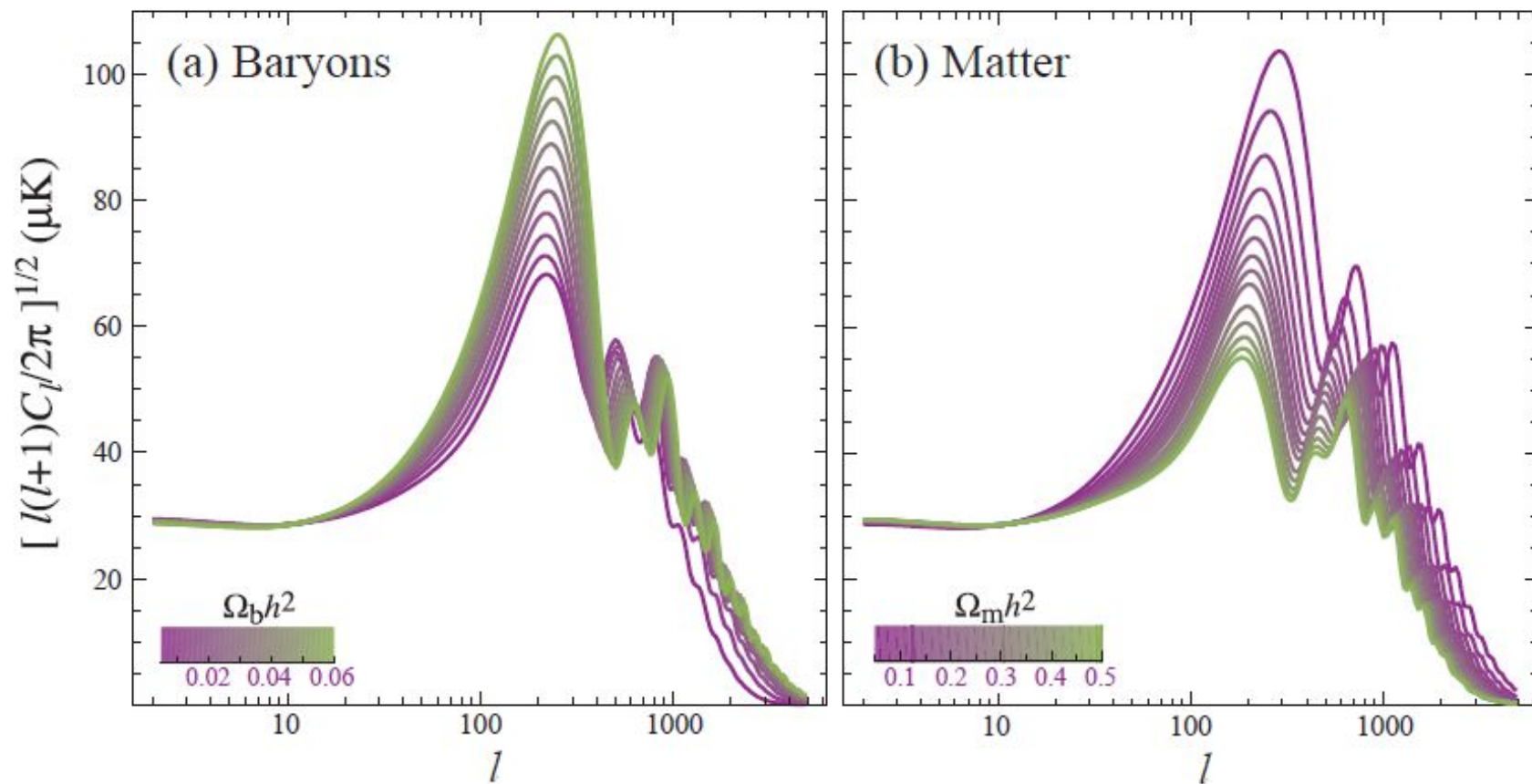
- Maior massa = expansão menor = pico menor!

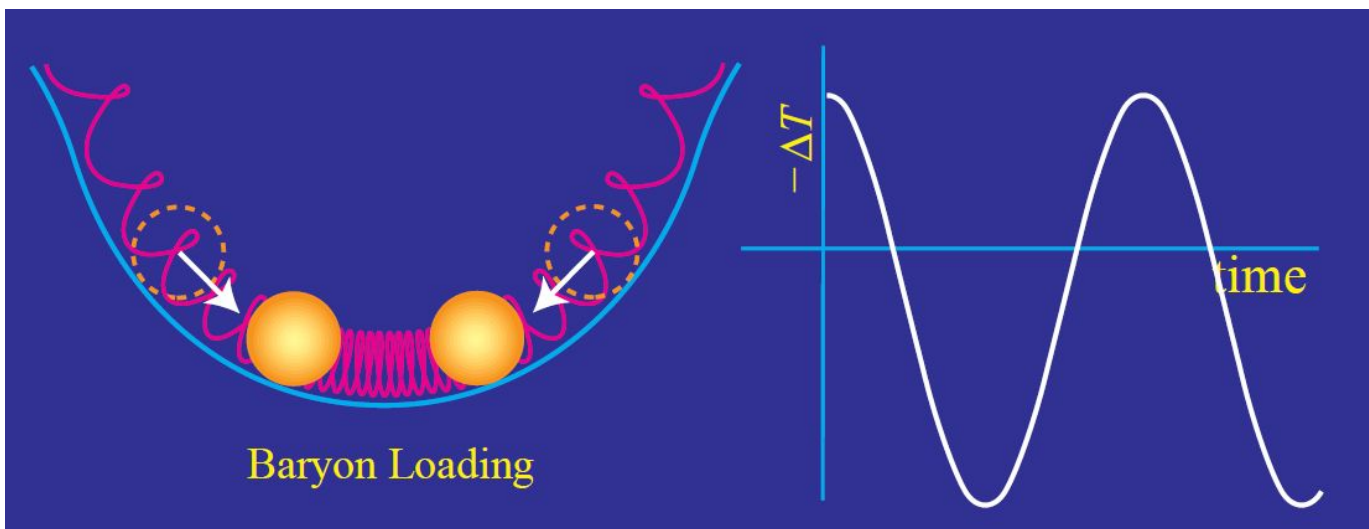
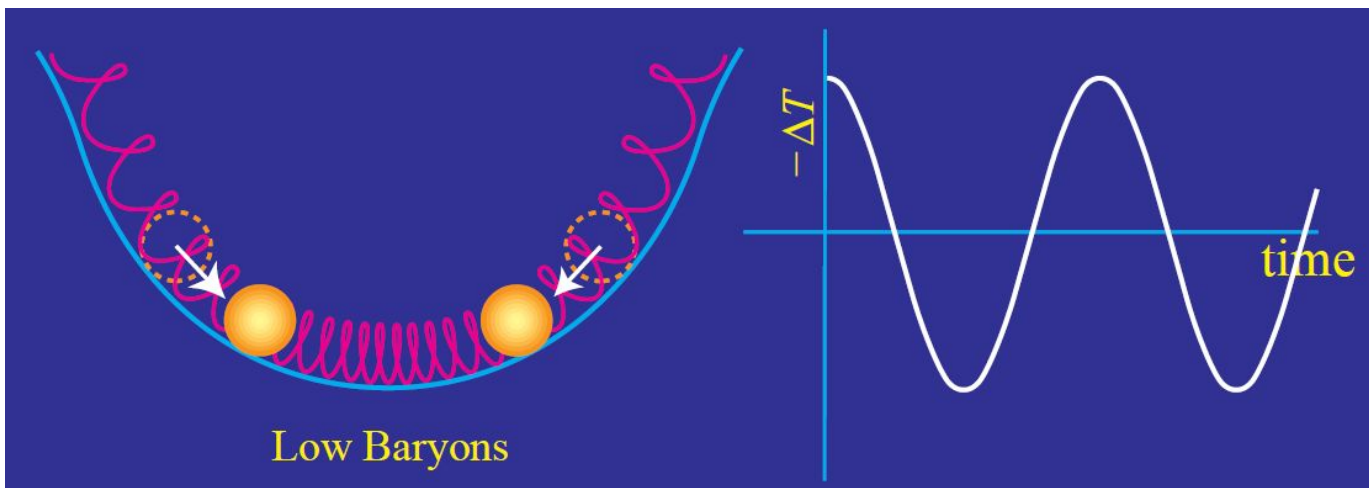


Resumo do 2º pico: bárions e rarefação

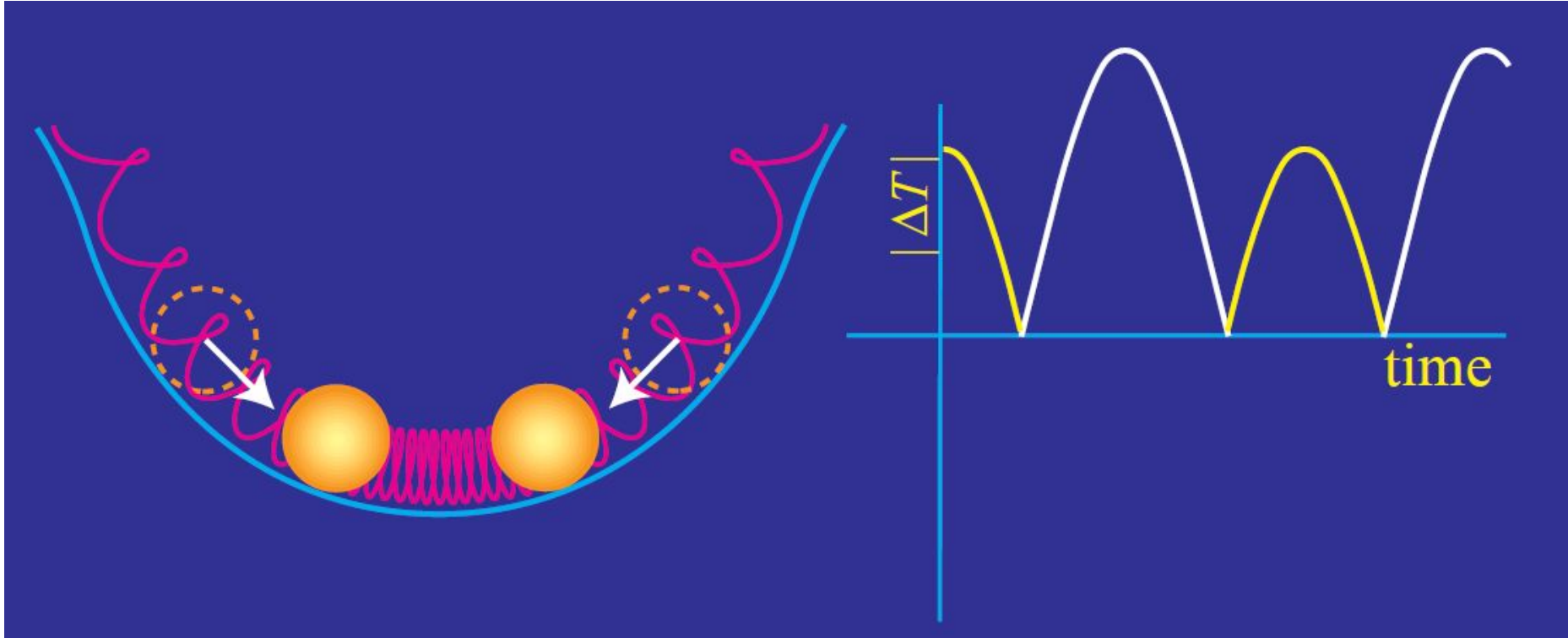
- Mais bárions = Menor rarefação





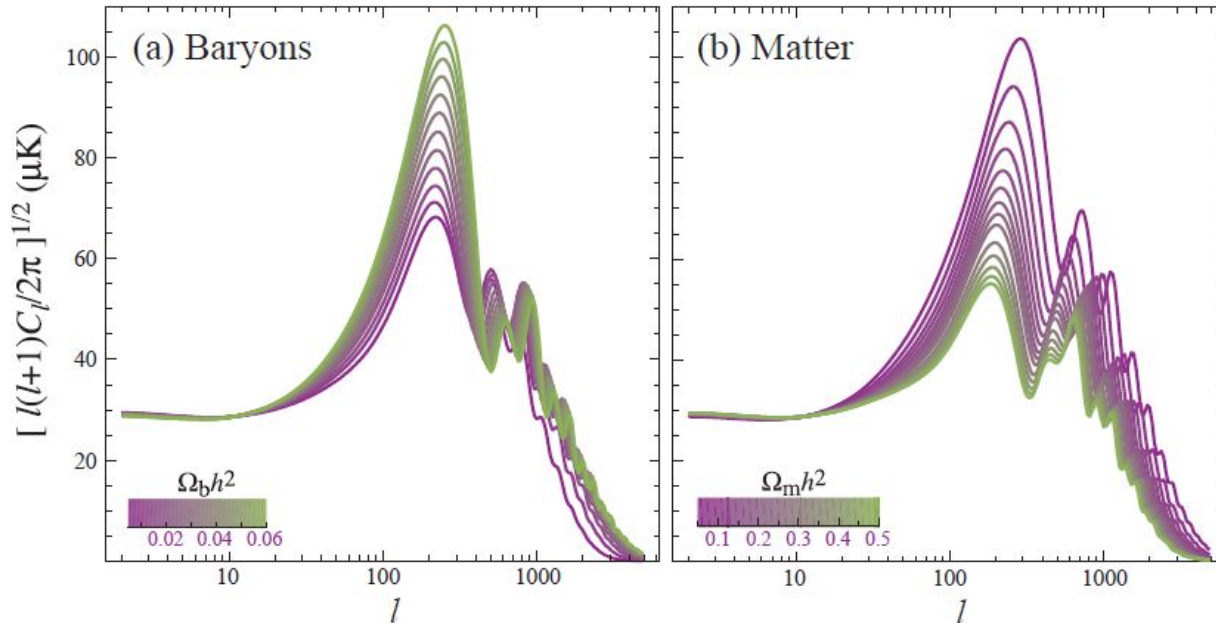


2º pico: bárions e rarefação



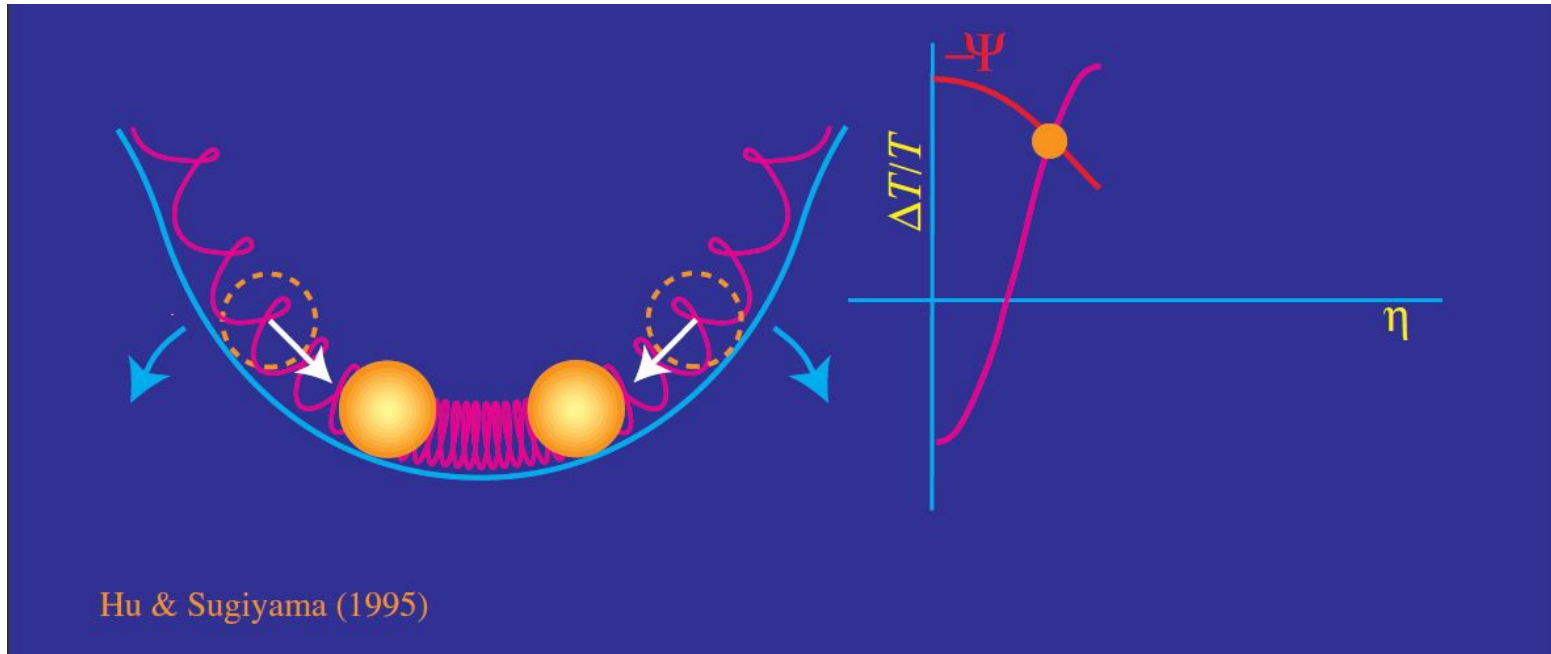
3º pico: matéria escura

- Mais matéria escura = igualdade matéria-radiação mais cedo



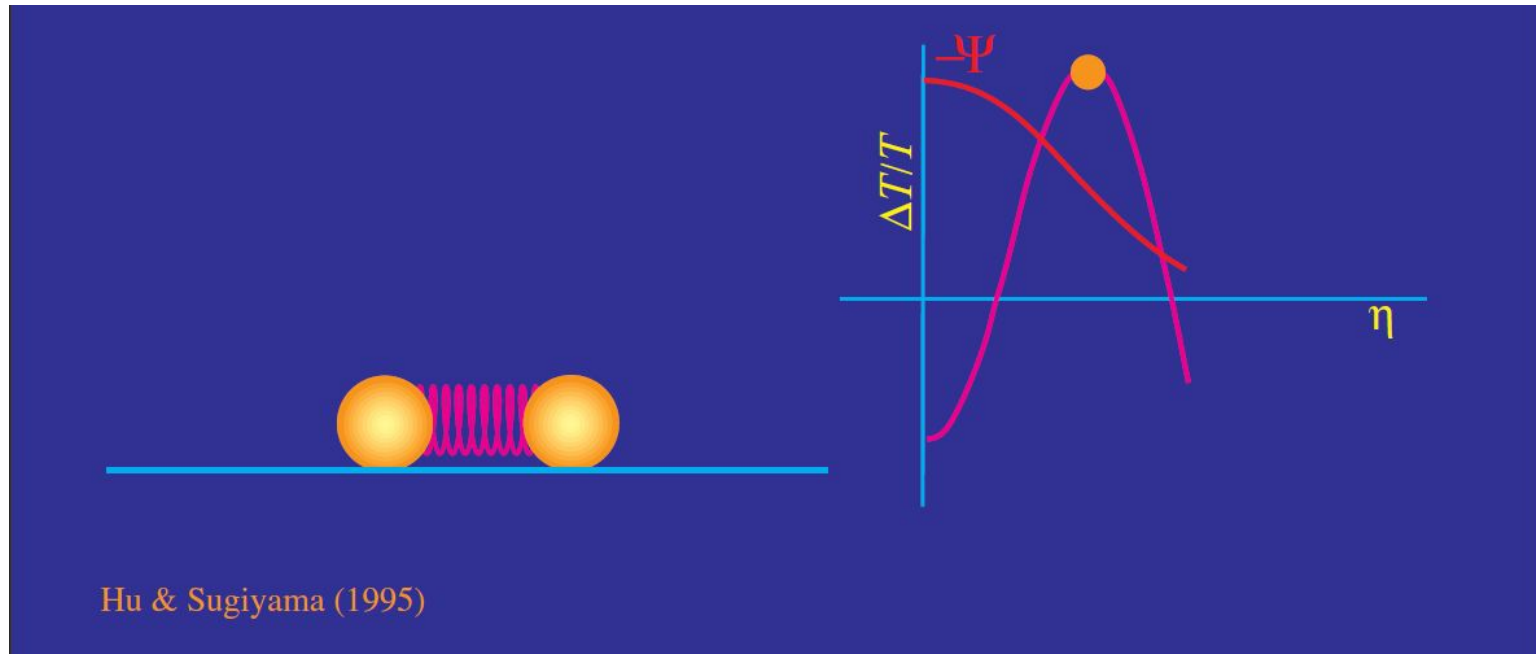
3º pico: matéria escura

- Durante época da radiação, potenciais decaem



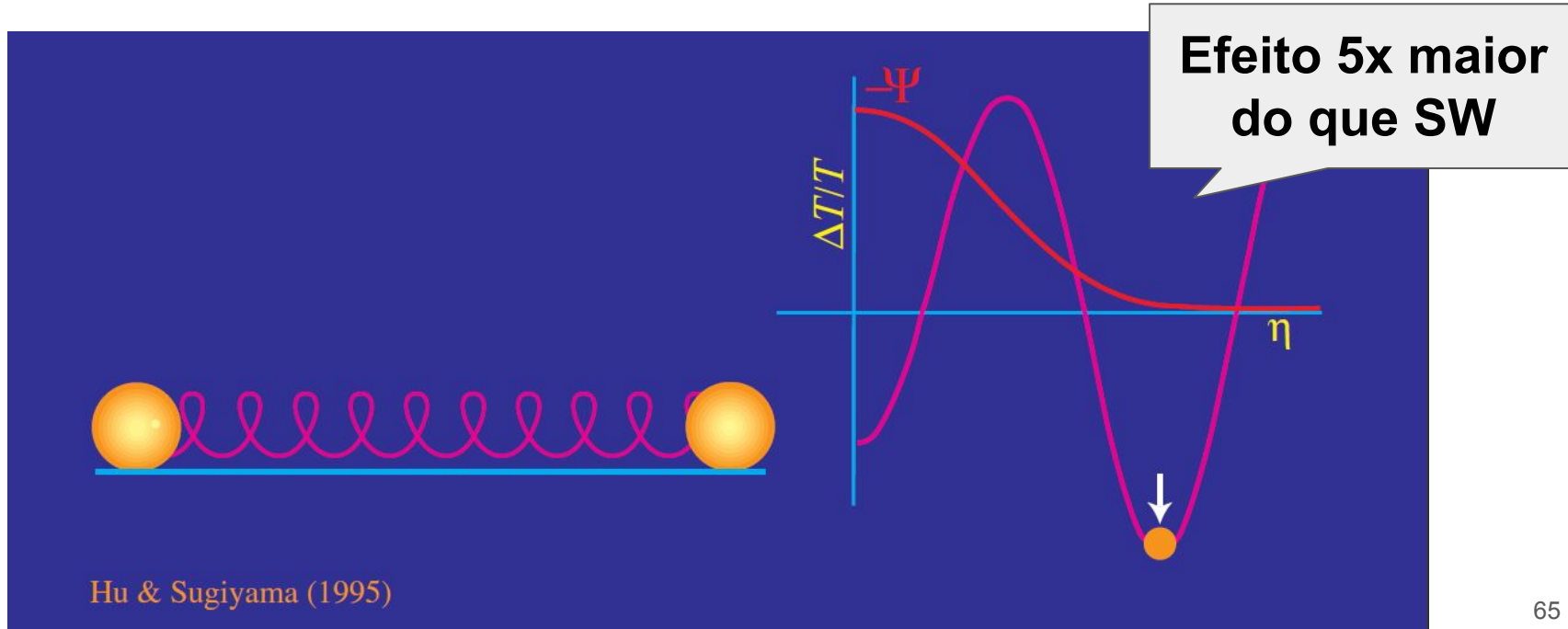
3º pico: matéria escura

- Durante época da radiação, potenciais decaem



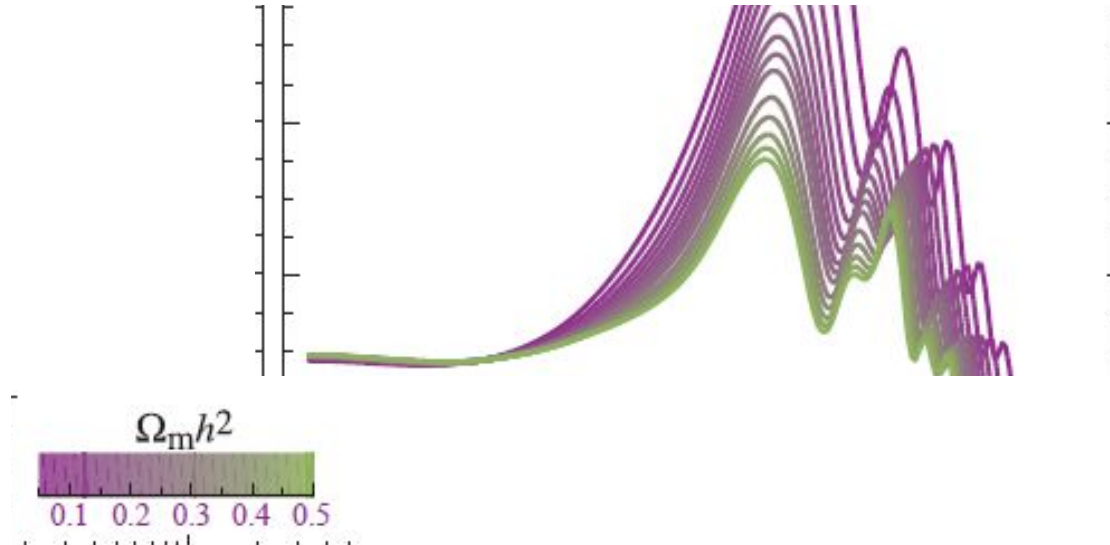
3º pico: matéria escura

- Durante época da radiação, potenciais decaem



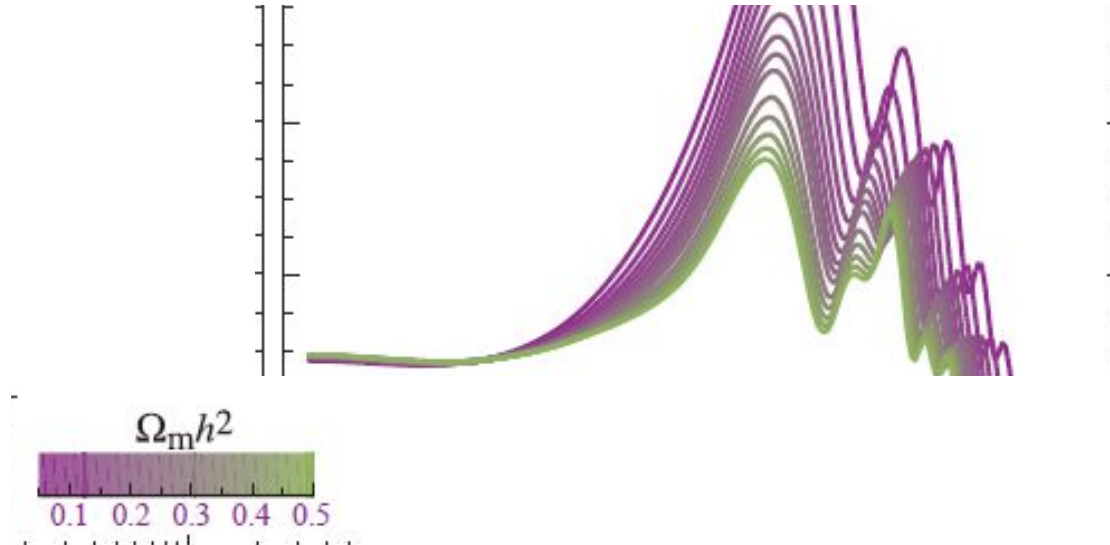
3º pico: matéria escura

- Igualdade mais cedo = menos picos durante RD



3º pico: matéria escura

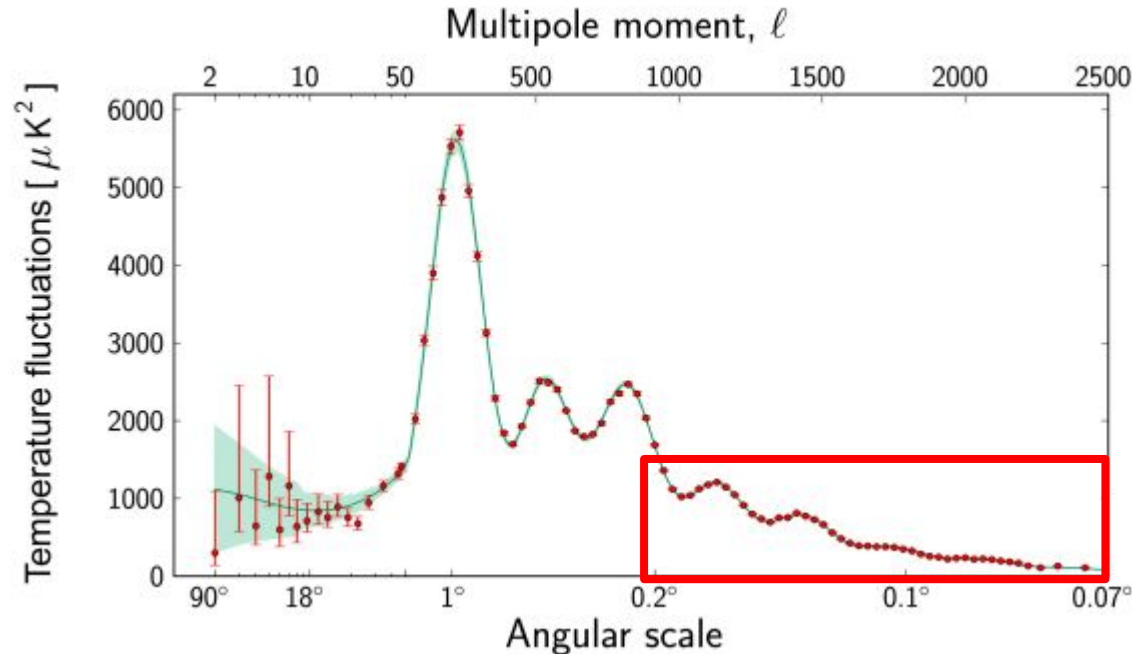
- Baryon loading persiste



**Matéria escura
prende o fluido!**

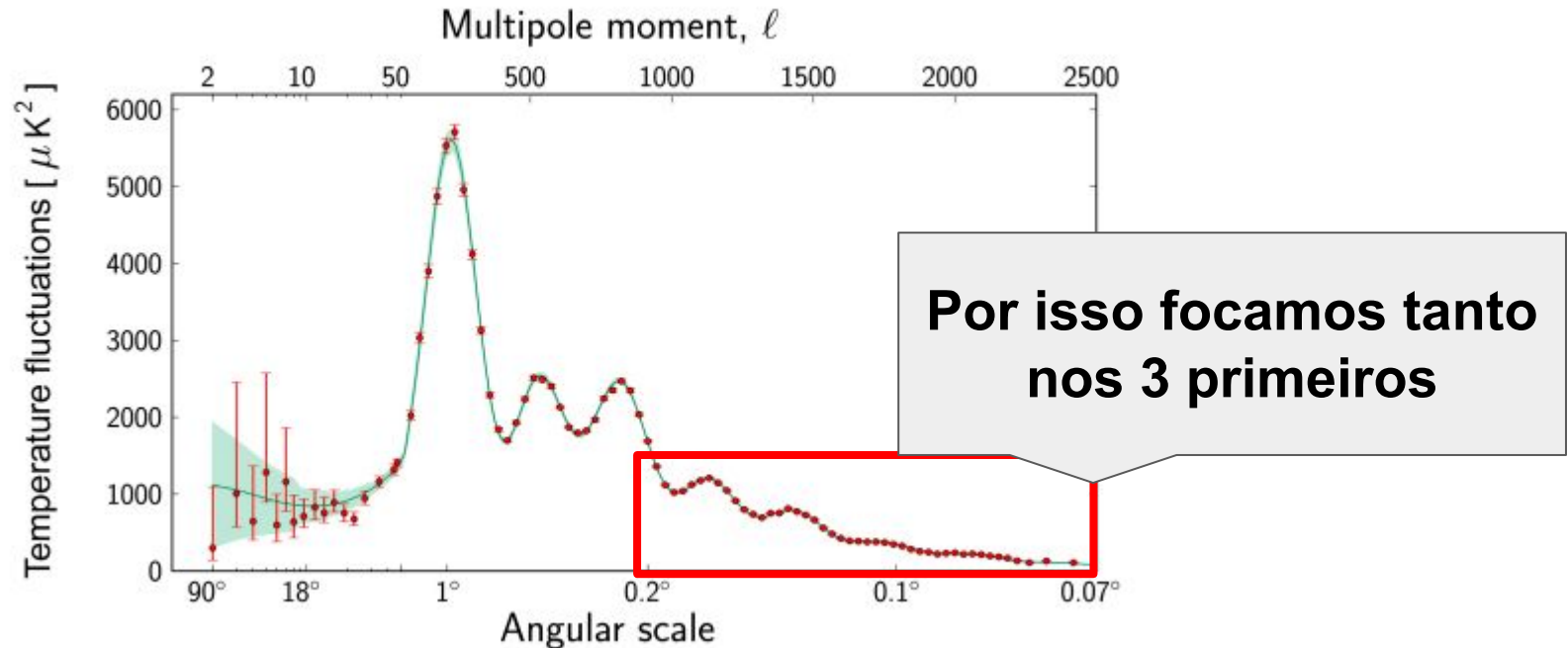
Damping: fluido não é perfeito

- Afeta principalmente picos após o 3º



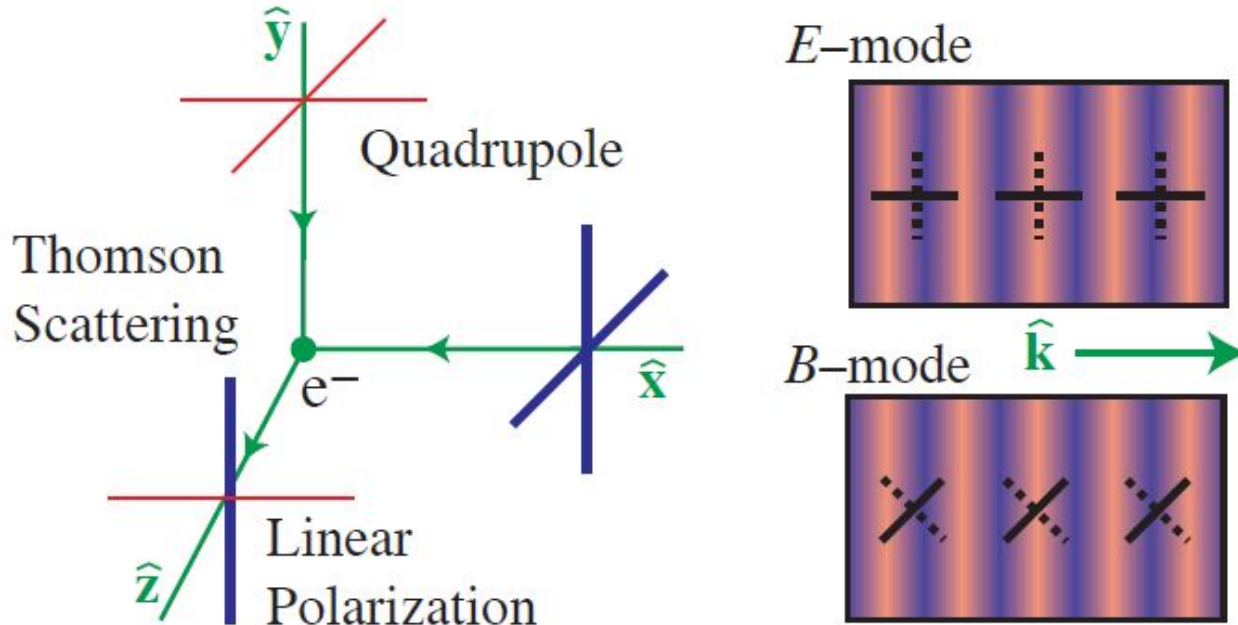
Damping: fluido não é perfeito

- Afeta principalmente picos após o 3º



Polarização na CMB

- Espalhamento Thomson: polarização linear



Decomposição da polarização

- Polarização – Modos B e Modos E
- Modos E: podem ser produzidos por escalares e tensoriais
- Modos B: produzidos apenas por perturbações tensoriais



E modes



B modes

