

O LADO ESCURO DO UNIVERSO

Pedro Abreu
LIP/IST, Lisboa
Escola
de Professores no
CERN em Língua
Portuguesa
2 Setembro 2024

NOSSO Universo!

~~**Porquê?!
Universo!**~~

O QUÊ?

COMO?

Universo!

Isto NÃO É o nosso universo!

NÃO estamos a ver tudo o que lá está!

Universo!

Estrelas (inclui buracos negros), Galáxias?

10%

Gás e poeira interestelar e intergaláctica?

84%

Hidrogénio 74%

Hélio 25%

Lítio <1%

Berílio vestígios

E o resto?!

(Gás e poeiras visíveis apenas em diferentes comprimentos de onda [da luz])

Neutrinos?

6%

Mas...isto é só a parte da matéria conhecida!

Universo!

ISTO? NÃO SABEMOS NADA!

DISTO NÃO SABEMOS MESMO NADA!

NÃO SABEMOS NADA DE NADA!

(ENERGIA ESCURA)

68,5%

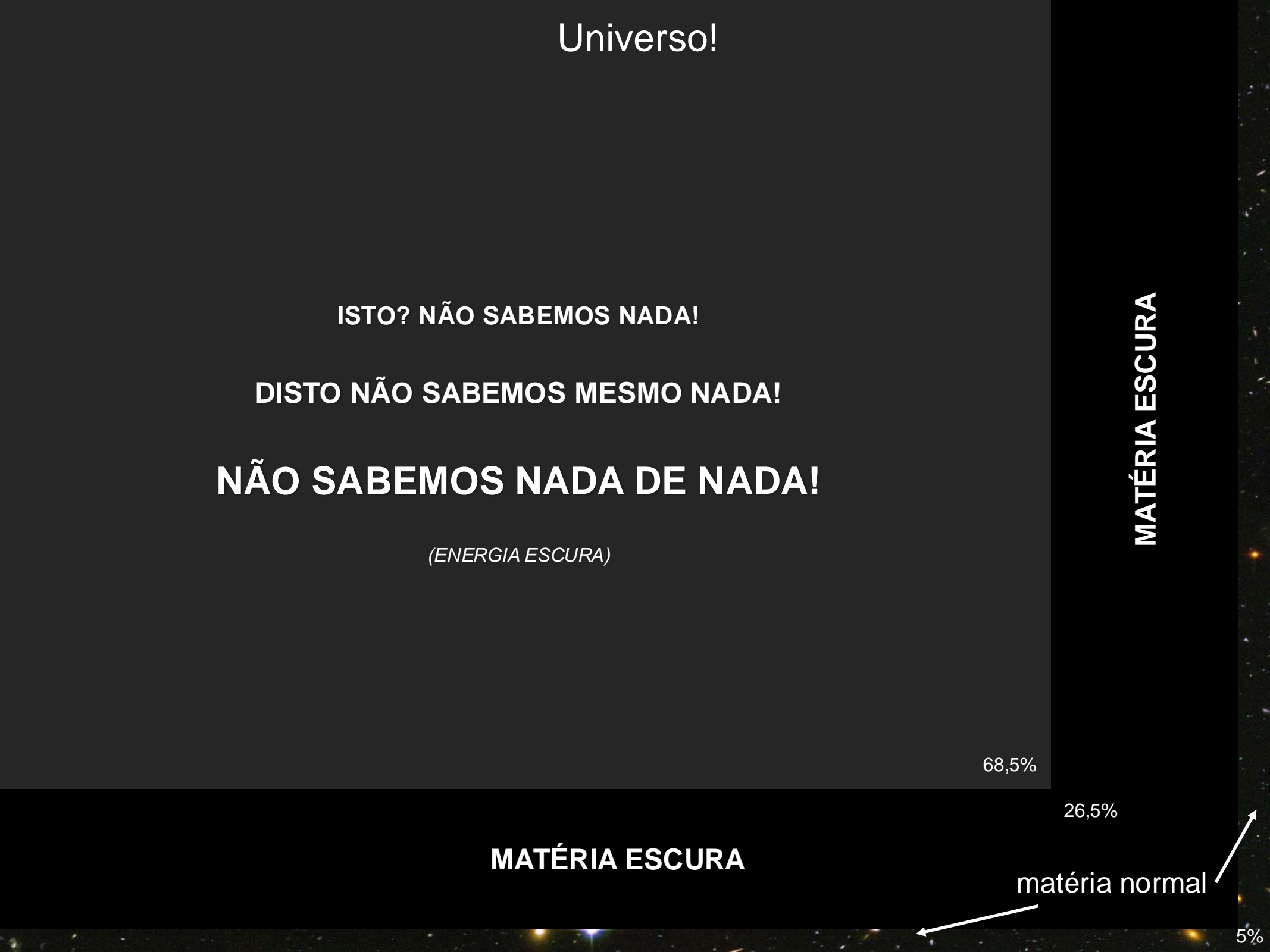
26,5%

matéria normal

MATÉRIA ESCURA

MATÉRIA ESCURA

5%



(Heinrich Wilhelm Olbers, 1823)

- Porque é que a Noite é escura?

E porque era isto um paradoxo?

Se o Universo é infinito e eterno (e com uma densidade de estrelas \pm uniforme), então todas as linhas de visão deveriam terminar na superfície de uma estrela.

Formalmente:

Cada camada contribui com n^0 estrelas $\sim r^2$

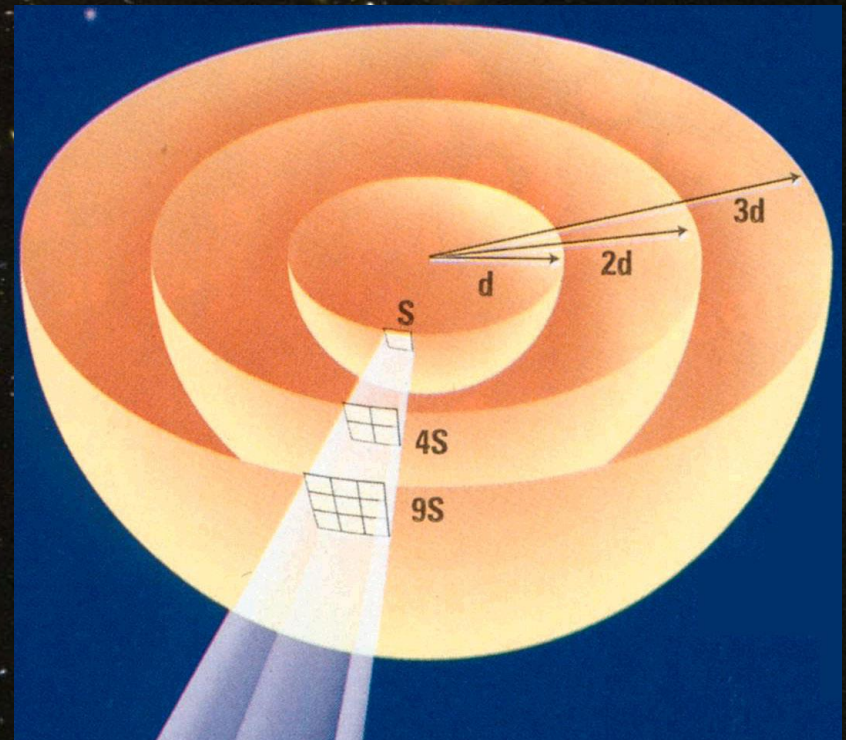
A luz diminui de intensidade com $\sim 1/r^2$

Contribuição de luz de cada camada = constante

O Céu deveria ser cheio de luz

Consequência:

**O UNIVERSO NÃO PODE SER
INFINITO E ETERNO!**



Uma teoria para o Universo: Relatividade Geral (1915 !)

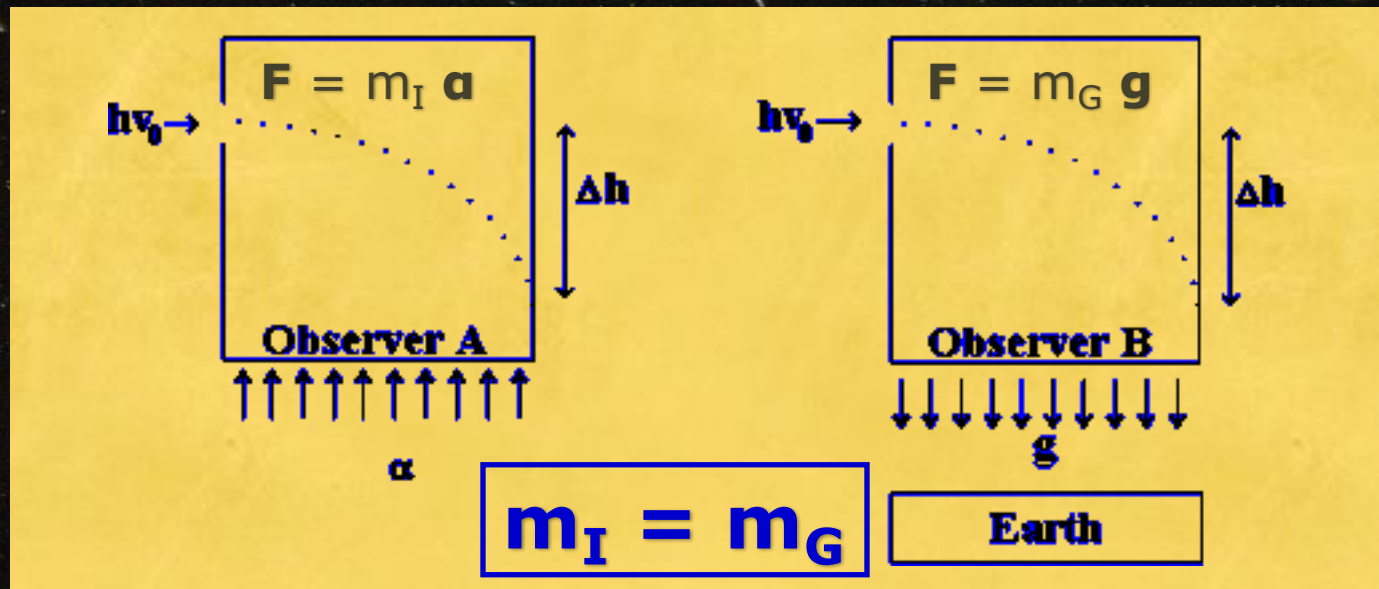
Não se pode realizar nenhuma experiência, de qualquer natureza, que nos permita distinguir um referencial acelerado e um referencial sujeito à gravidade!

Então e se ligar uma lanterna ?!



Princípio de Equivalência

1907



Massa Inercial = Massa Gravítica

Aceleração = Gravitação

“A Ideia mais feliz da minha vida” (Albert Einstein)

A Teoria da Relatividade Geral

O caminho mais curto no espaço-tempo é definido pela trajetória dos raios de luz.

Elevador acelerado: luz segue uma trajetória parabólica

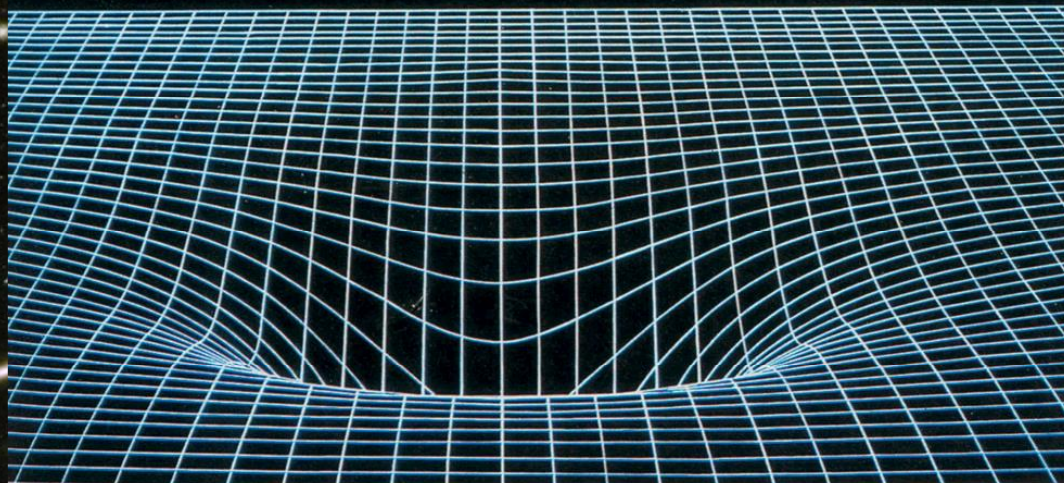
Campo Gravítico: raios de luz são curvados!

Espaço e Tempo são curvos!

Albert Einstein (1912-15) : Relatividade Geral

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} \cdot G/c^4$$

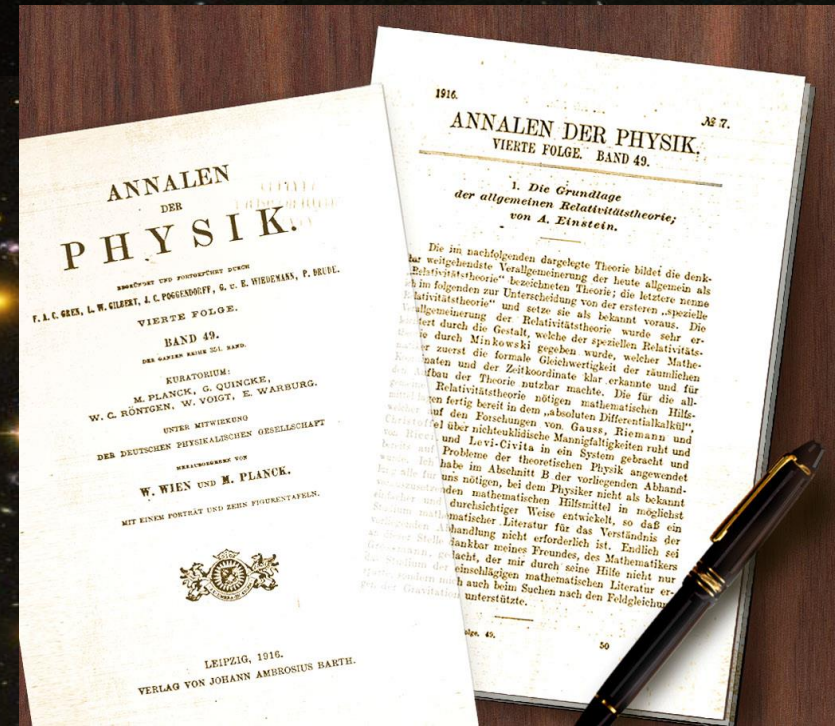
Matéria diz ao Espaço como se curva
Espaço diz à Matéria como é que se move



$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N kg}^{-2}\text{m}^2$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$\pi = 3,14159265359 \dots$$



Einstein 1917:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(Constante Cosmológica)

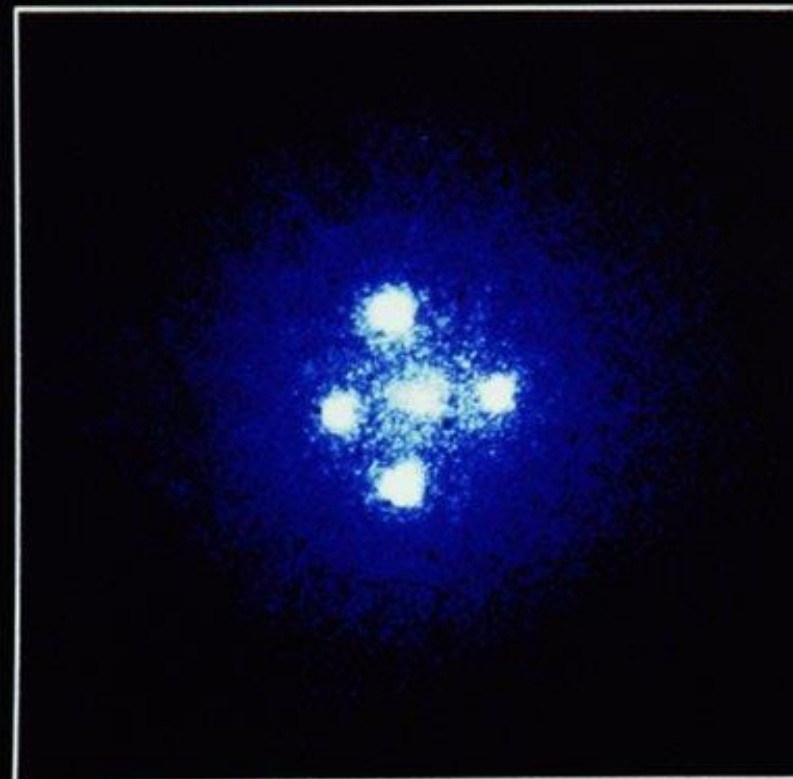
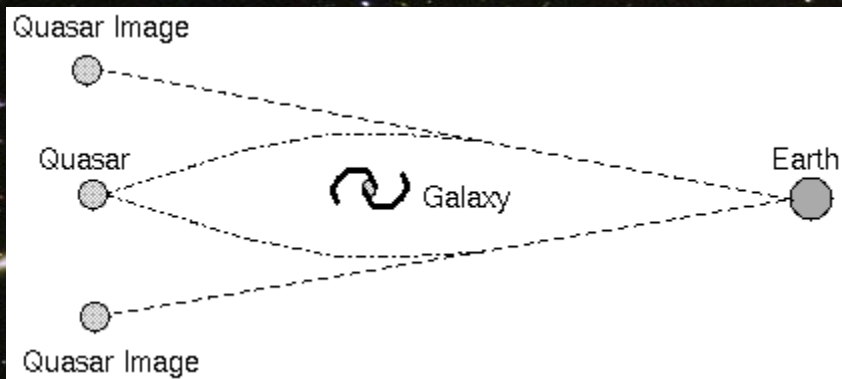
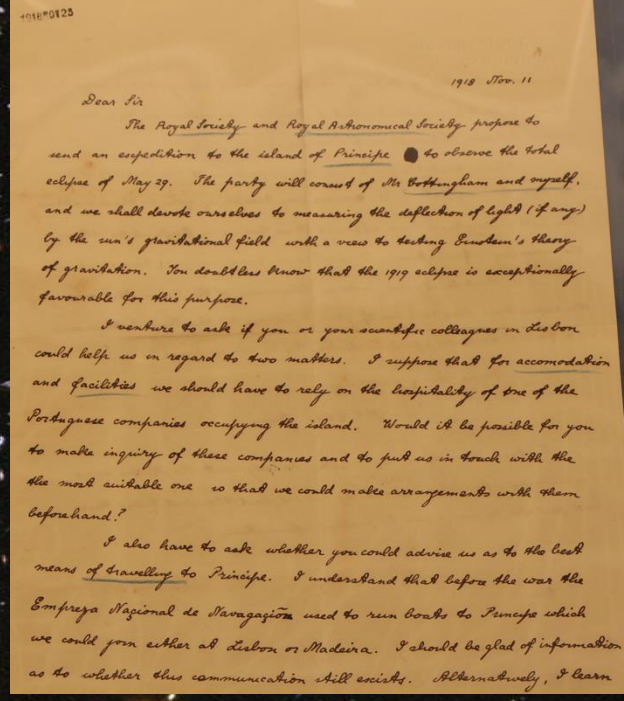
$$\begin{aligned}
 R_{\eta\eta} = & -\frac{2a^2 \frac{\partial \psi}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2ac \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{a \frac{\partial c}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{2a^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}}{\delta \psi^2} \\
 & - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} c \frac{\partial c}{\partial \delta}}{\delta \psi^2} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial c}{\partial \delta}}{\delta \psi^2} - \frac{a \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial c}{\partial \eta}}{\delta \psi^2} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial \delta} \frac{\partial c}{\partial \eta}}{\delta \psi^2} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} \frac{\partial b}{\partial \delta} c}{\delta \psi^2} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} \frac{\partial b}{\partial \eta} c}{\delta \psi^2} \\
 & - \frac{2a^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial \delta}\right)}{\delta \psi^2} \\
 & + \frac{ab \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} b^2 c \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{a^2 b \frac{\partial b}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \delta} b^2 \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} + \frac{\frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \delta}}{4d^2} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \delta} c \frac{\partial d}{\partial \delta}}{4\delta d} \\
 & - \frac{3a \frac{\partial a}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \delta}}{\delta \psi} \\
 R_{\eta\theta} = & -\frac{2a}{\delta} \\
 & + \frac{a^2 \frac{\partial a}{\partial \delta} b}{\delta^2 \psi} \\
 & - \frac{2}{\delta} \\
 & + \frac{ac \frac{\partial d}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta d \psi} \\
 & - \\
 & + \frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \\
 & + \frac{2ab}{\delta} \\
 & + \\
 & + \frac{\partial \psi}{\partial \delta} \\
 & + \frac{2b}{\delta} \\
 R_{\theta\theta} = & -\frac{2ab \frac{\partial \psi}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2bc \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial d}{\partial \delta} \cot \theta}{d} - \frac{c \frac{\partial c}{\partial \delta} \cot \theta}{\delta} + \frac{\frac{\partial b}{\partial \eta} c \cot \theta}{2\delta} + \frac{a \frac{\partial b}{\partial \delta} \cot \theta}{2\delta} \\
 & - \frac{2ab \frac{\partial^2 \psi}{\partial \delta^2}}{\delta \psi} - \frac{2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial \delta^3}}{\psi} - \frac{2ab \left(\frac{\partial \psi}{\partial \delta}\right)^2}{\delta \psi^2} + \frac{6 \left(\frac{\partial \psi}{\partial \delta}\right)^2}{\psi^2} + \frac{4bc \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial \delta}}{\delta \psi^2} - \frac{ab \frac{\partial d}{\partial \delta} \frac{\partial \psi}{\partial \delta}}{\delta d \psi}
 \end{aligned}$$

A Luz desviada pelo Sol (1919 !)



Confirmado por
Sir Arthur Eddington
Ilha do Príncipe,
29 de Maio de 1919

(resultado idêntico e
simultâneo em Sobral, Brasil)

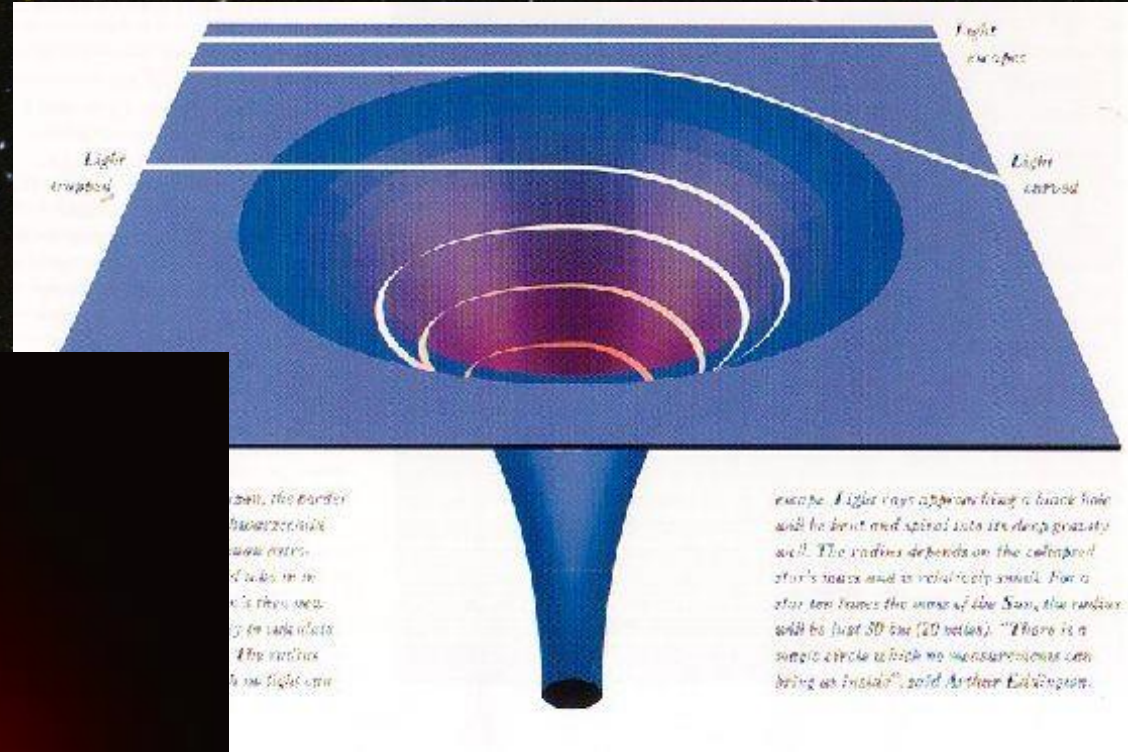


Gravitational Lens G2237+0305

Caso limite: Buraco Negro

John Mitchell (1728)

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2G_N M}{r}} > c$$



$$r_S = \sqrt{\frac{2G_N M}{c^2}}$$

Sol: 2953 m

Terra: 8,87 mm

BH_{min}: 5115 m

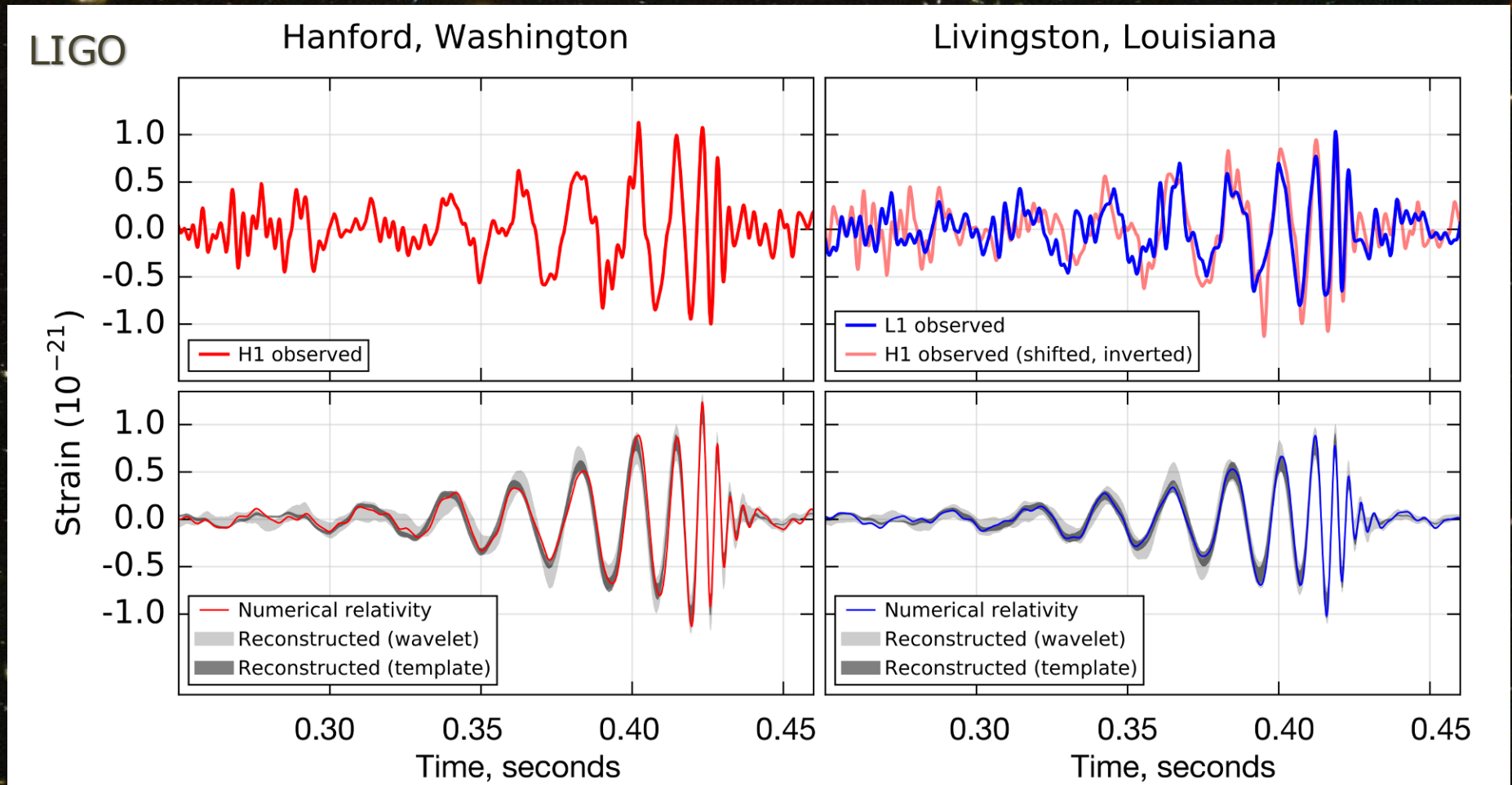
BH (Via Láctea, 4,1 MM_{\odot}): $1,1 \times 10^5$ km

BH (este, 6,6 GM_{\odot}): $4,6 \times 10^6$ km

Ondas Gravitacionais

LIGO (USA)

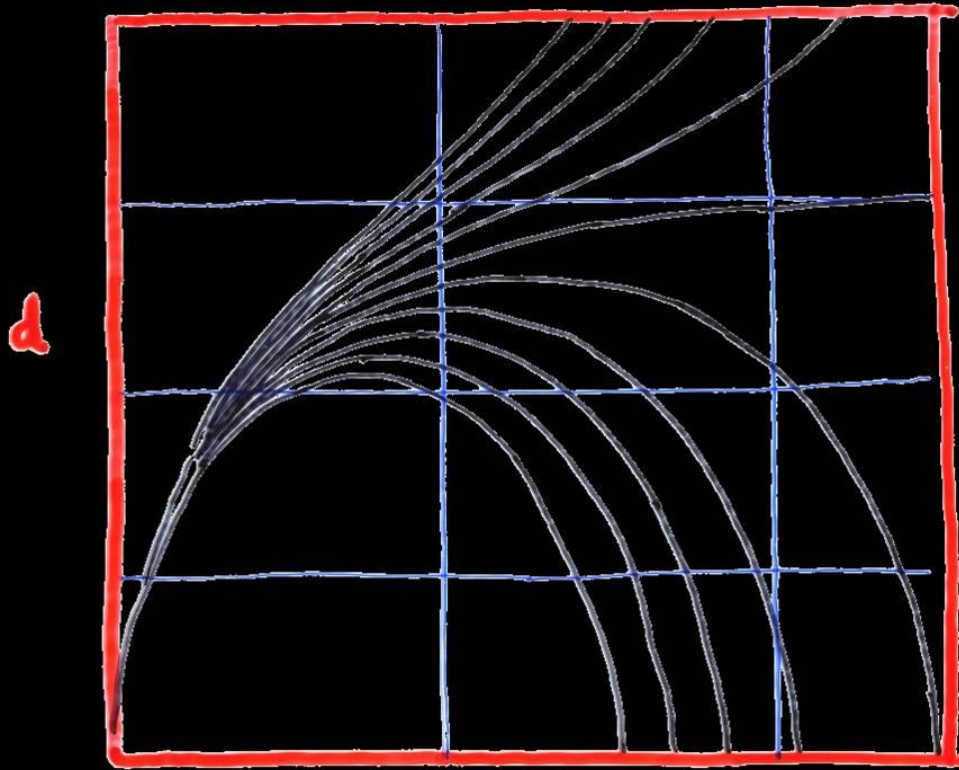
Virgo/EGO (Itália/França)



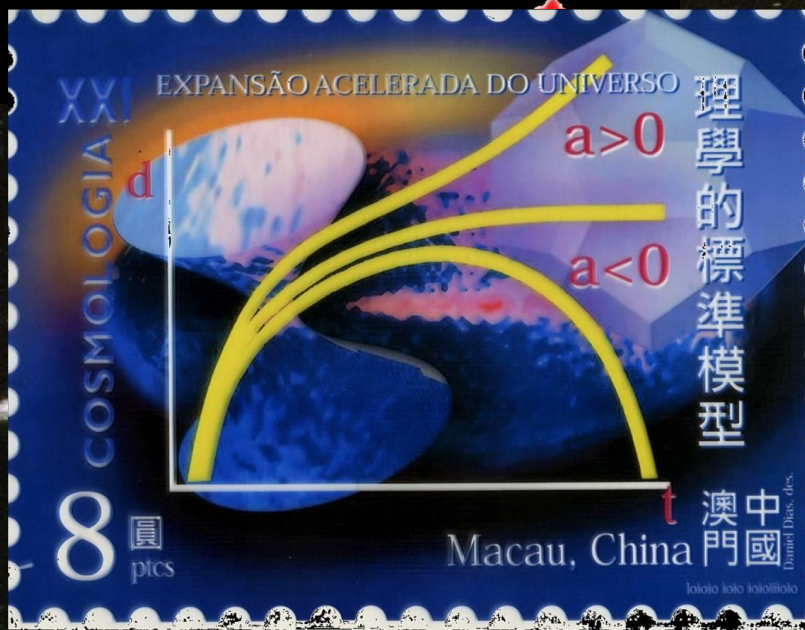
https://youtu.be/Zt8Z_uzG71o

<https://youtu.be/ZD4TXK4wQgU>

EXPANSÃO DO UNIVERSO!



G. Lemaître, 1927



George Lemaître (1927)

Todo o Universo Expande!
Um 'átomo primordial quente' ?

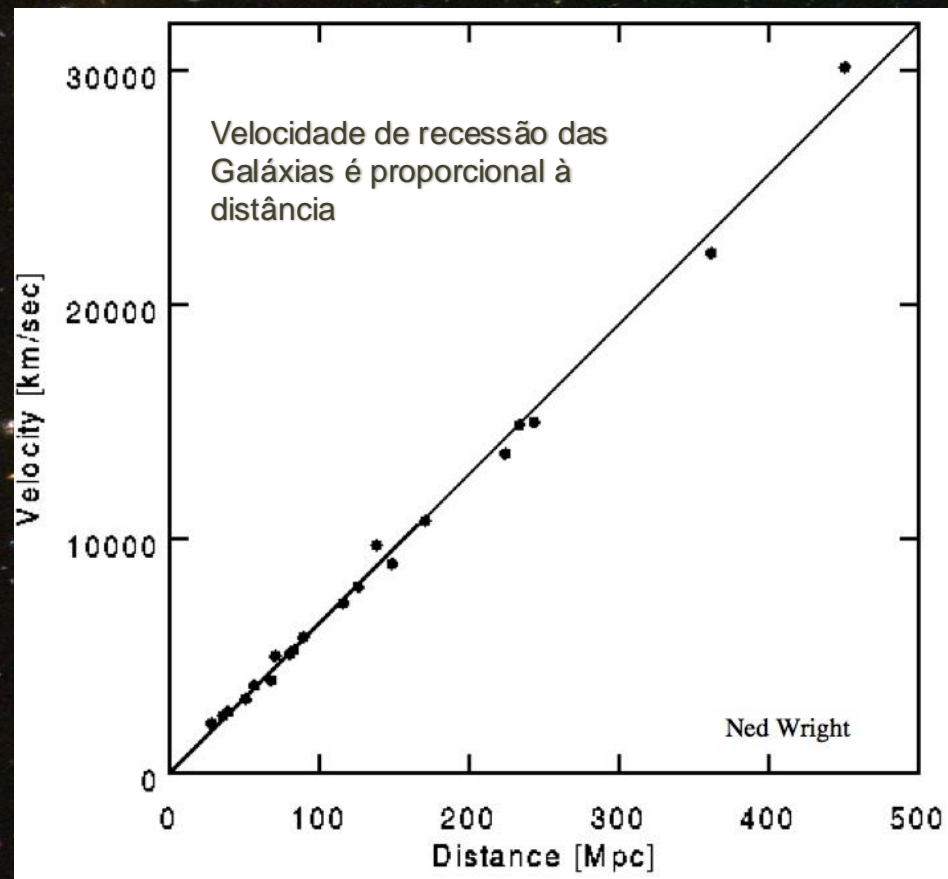
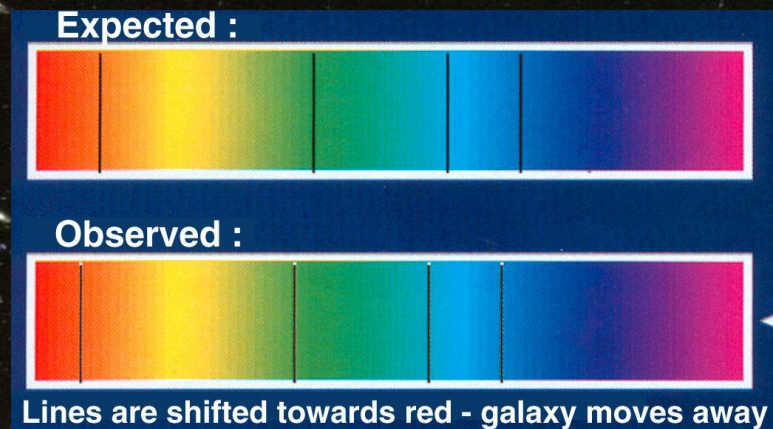
EXPANSÃO DO UNIVERSO!



Edwin Hubble (1929)
Mt. Palomar telescope

Einstein afirma:

a constante cosmológica = 'o meu maior erro'



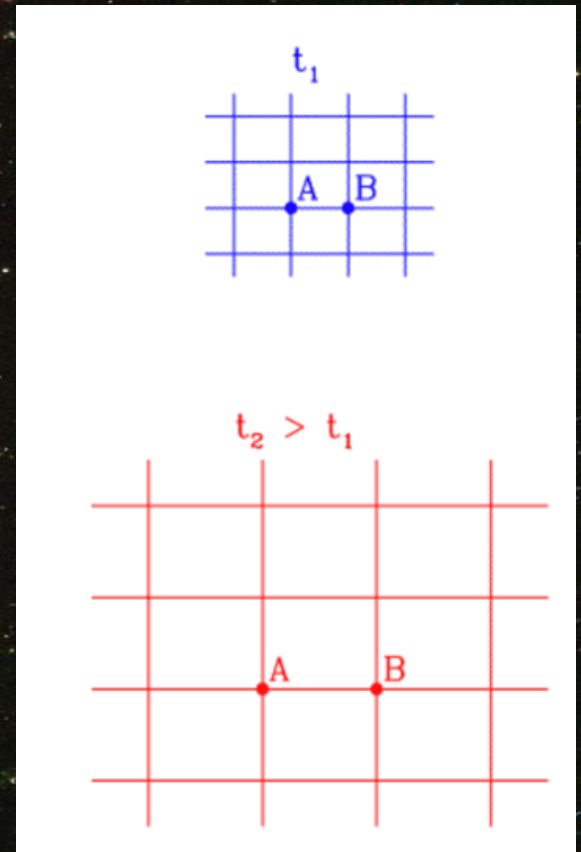
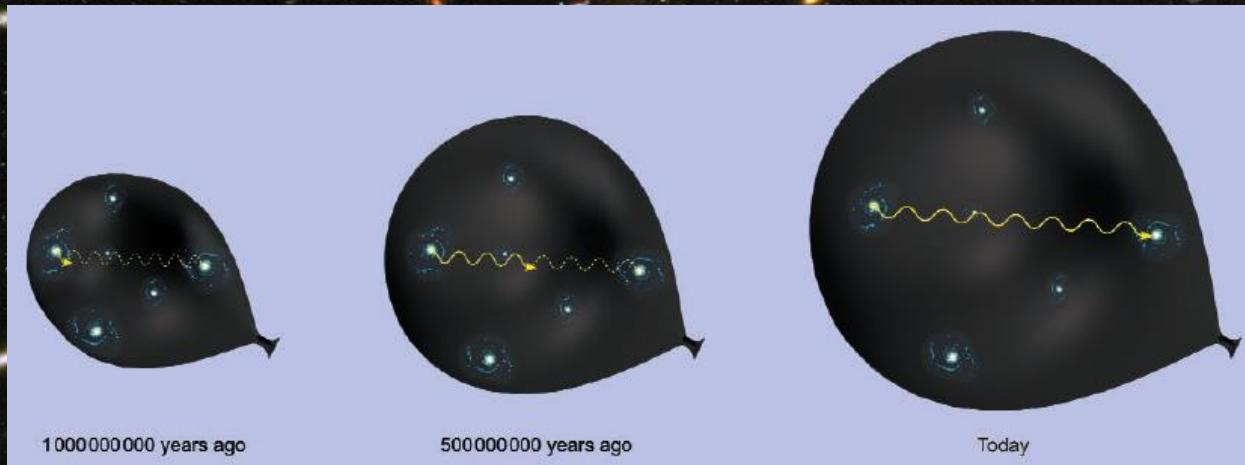
EXPANSÃO DO UNIVERSO!

Friedmann escreveu a evolução do Universo em função da escala $a(t)$

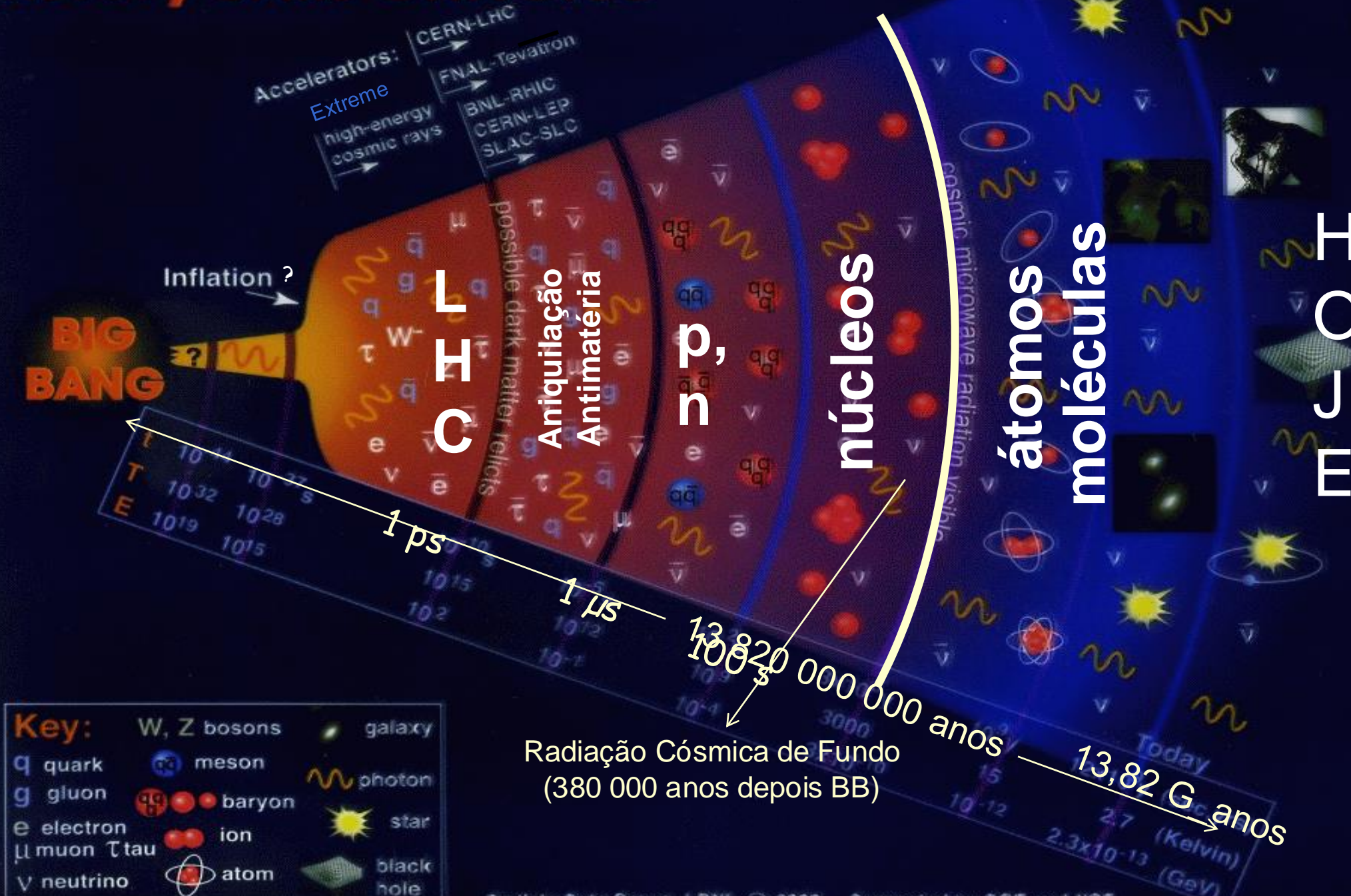
$$r_{AB}(t) = a(t)x_{AB}$$

As suas equações relacionam a densidade média " ρ " e a curvatura K com a taxa de expansão da escala:

$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \bar{\rho} - \frac{K}{a^2}$$



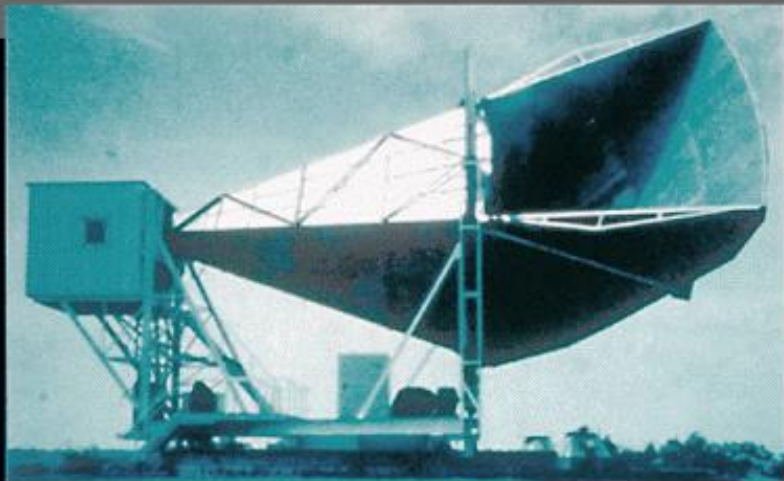
History of the Universe



Particle Data Group, LBNL © 2000. Supported by DOE and NSF

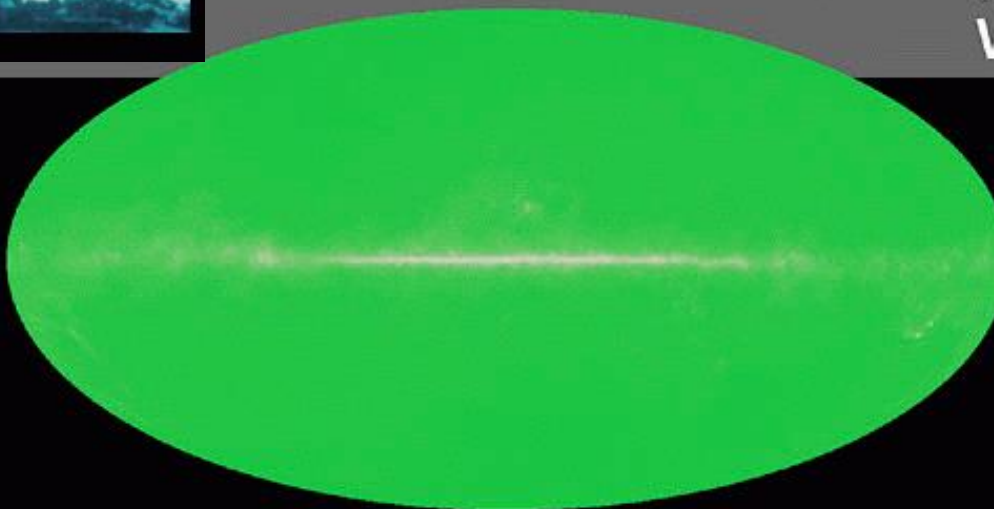
A Radiação C3smica de Fundo

1965

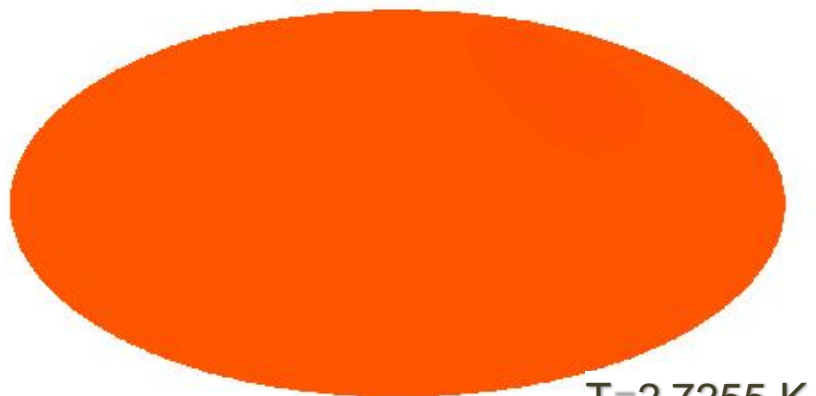


Penzias and
Wilson

Pr3mio Nobel 1978

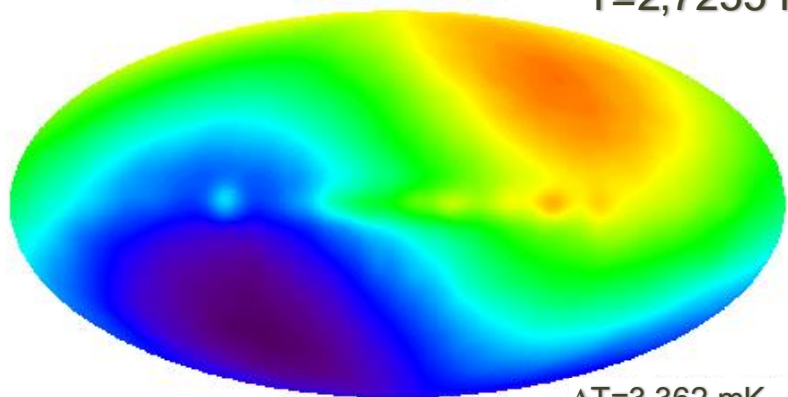


Estudo da Radiação C3smica de Fundo (COBE)
(Pr3mio Nobel da F3sica 2006)



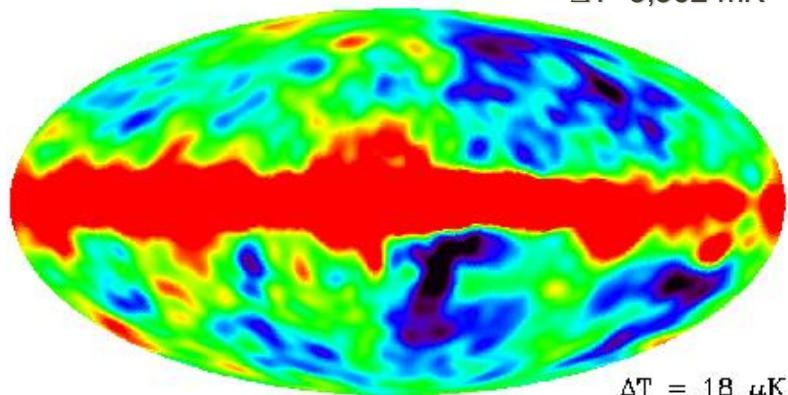
$T=2,7255 \text{ K}$

$T = 2.7255 \text{ K}$ Penzias & Wilson, 1965
(depois da subtra33o da nossa gal3xia)



$\Delta T = 3,362 \text{ mK}$

$\Delta T = 3.362 \text{ mK}$ (0,003 362 K)
(depois da subtra33o do fundo comum)

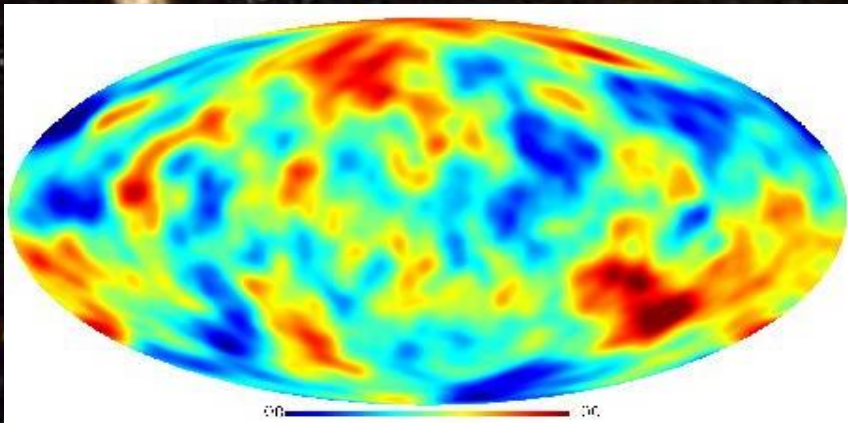


$\Delta T = 18 \mu\text{K}$

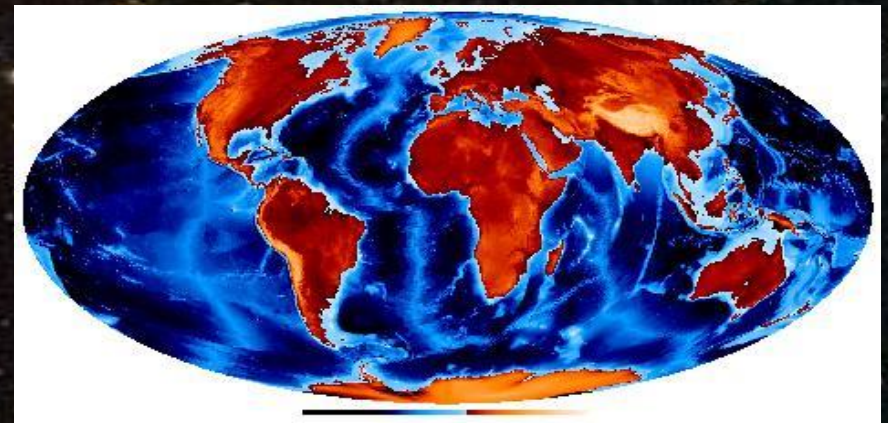
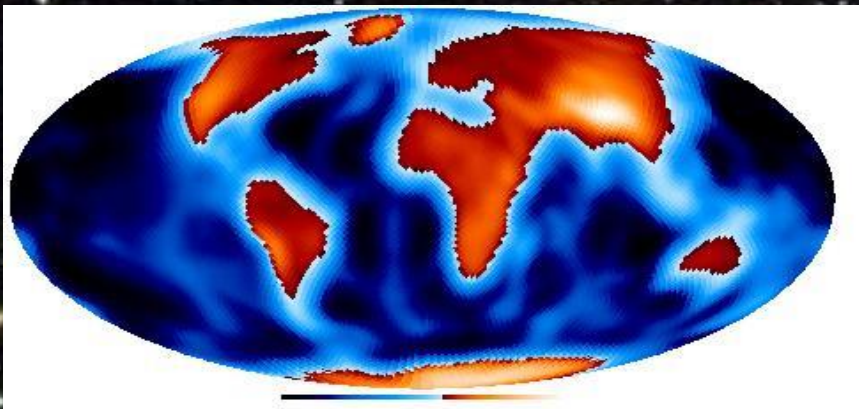
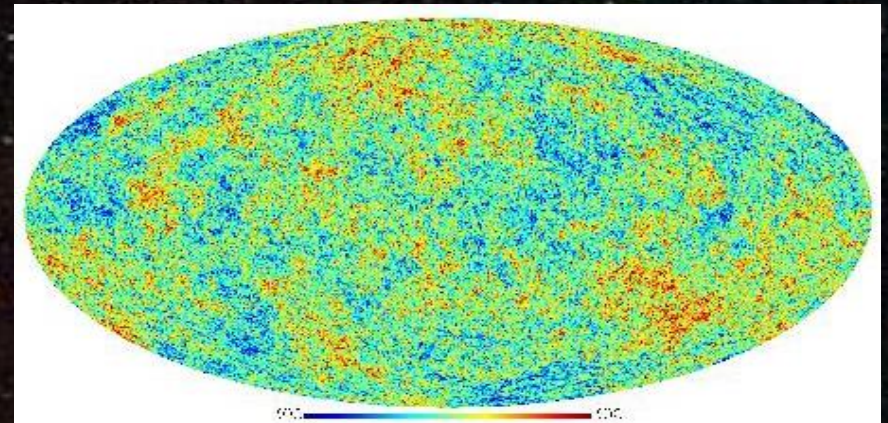
$\Delta T_{\text{RMS}} = 18 \mu\text{K}$ (0,000 018 K)
(depois de corrigido para o mov. Terra)

WMAP (2003): uma observação mais precisa

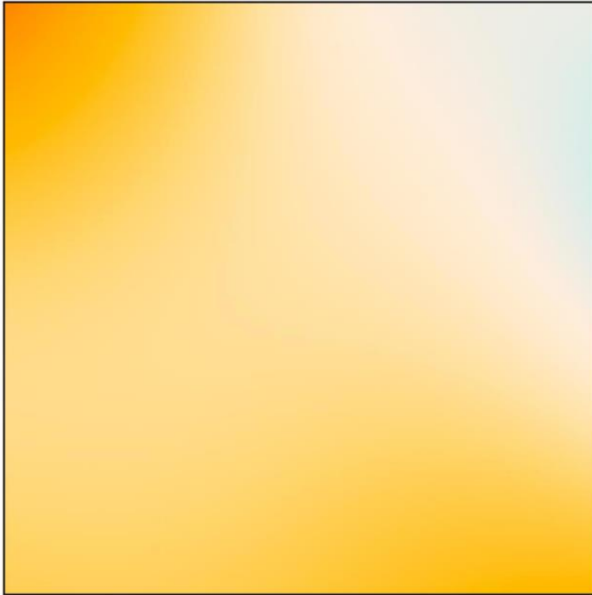
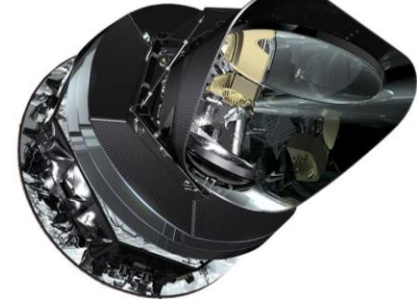
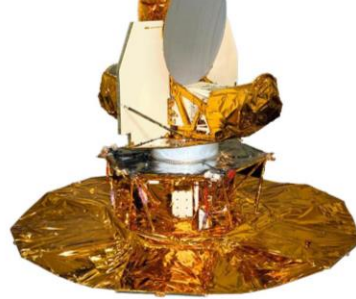
COBE
(7 degree resolution)



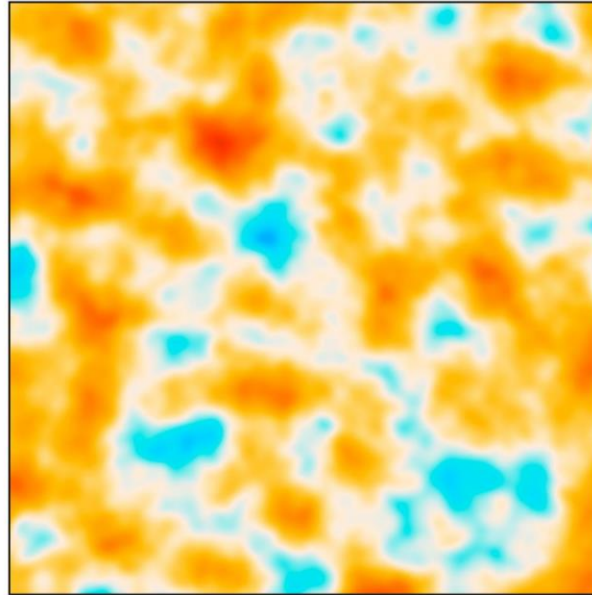
WMAP
(0.25 degree resolution)



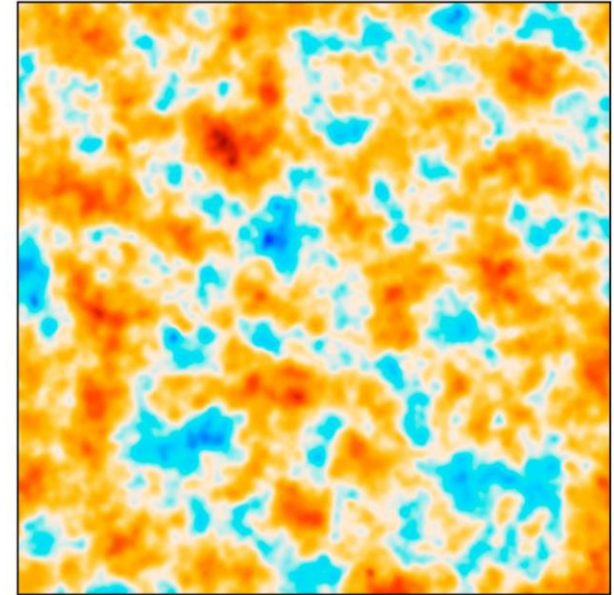
PLANCK (2013): uma observação AINDA mais precisa



COBE
1990



WMAP
2003

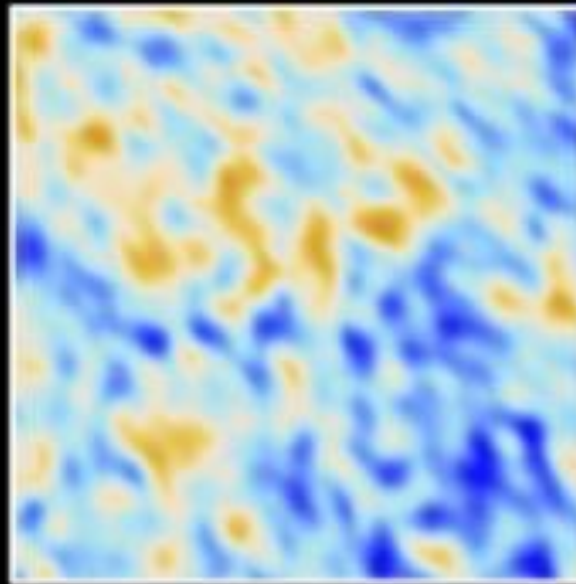
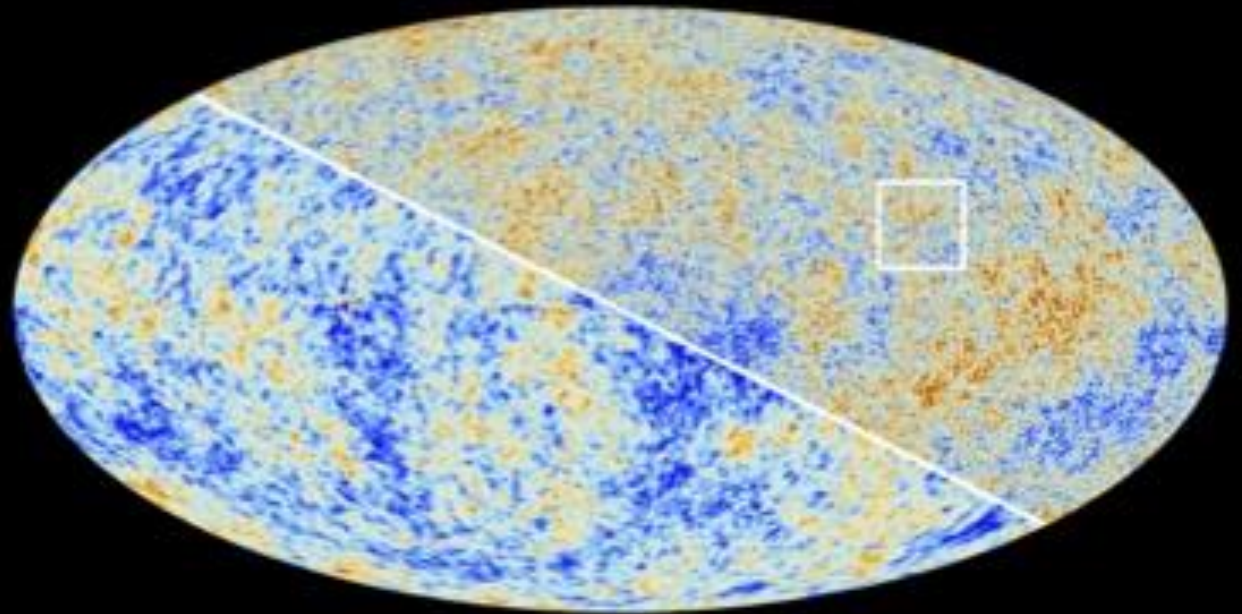


Planck
2013

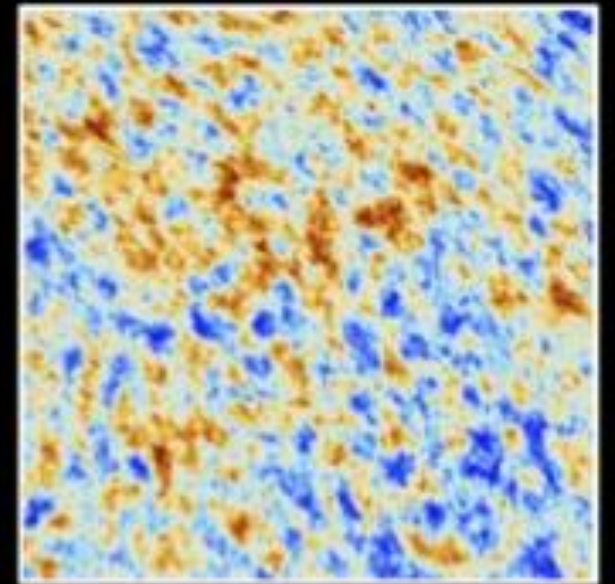
PLANCK (2013):

uma observação
AINDA
mais precisa

The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



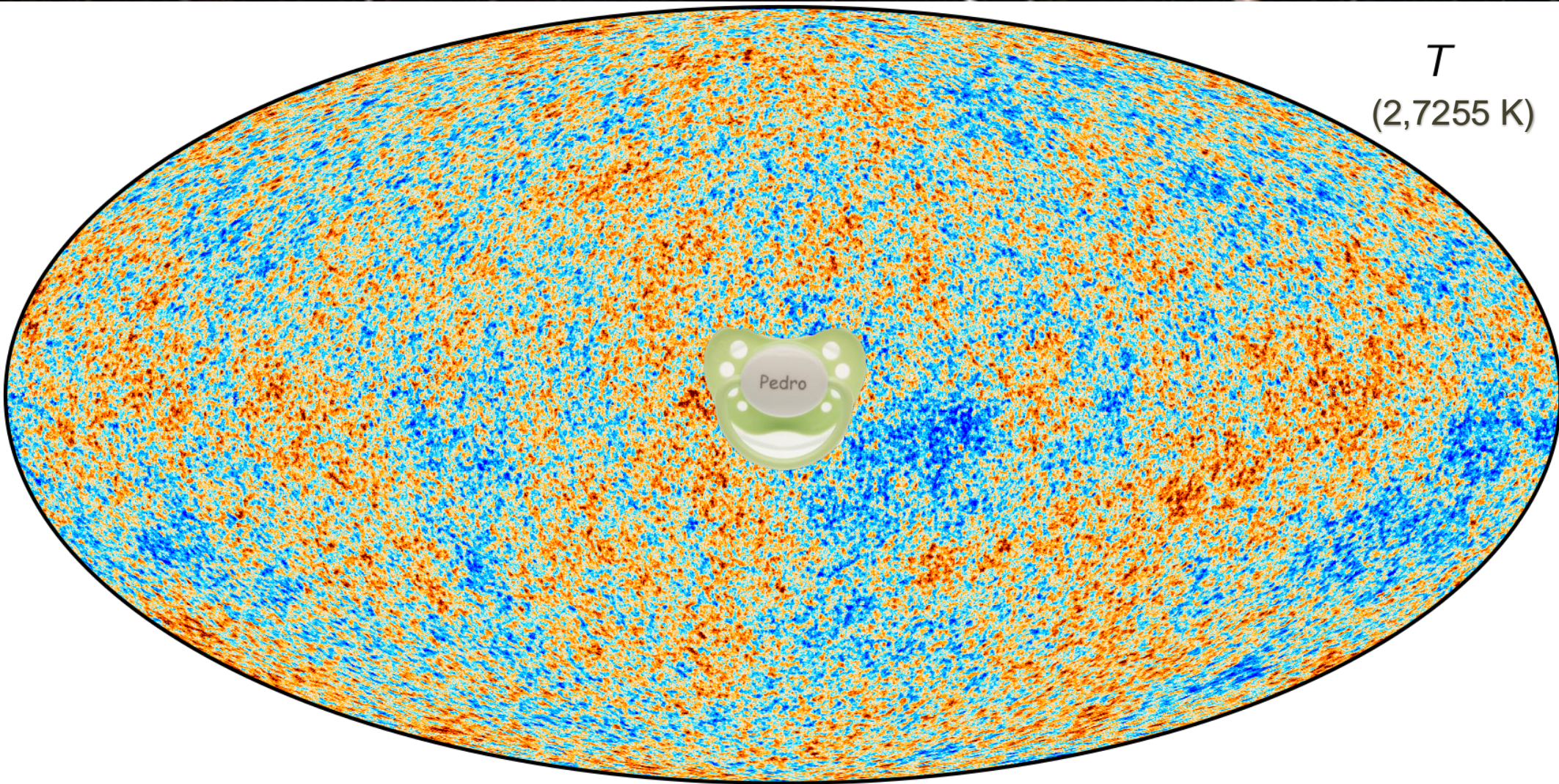
WMAP



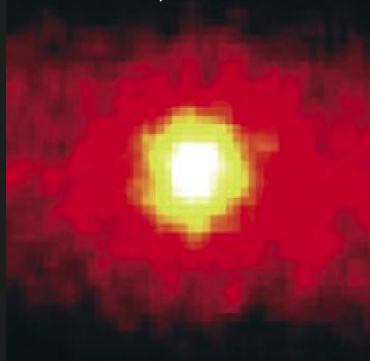
Planck

PLANCK (2018)

Uma fotografia do Universo bebé
(idade de 380 000 anos)



(Sol em) neutrinos



Raios C3smicos de Energia Extrema

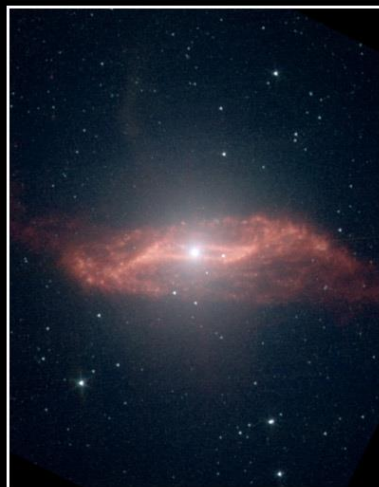


O UNIVERSO INVISÍVEL

3tico



InfraVerm.



UltraVioleta



Raios-X



Ondas R3dio



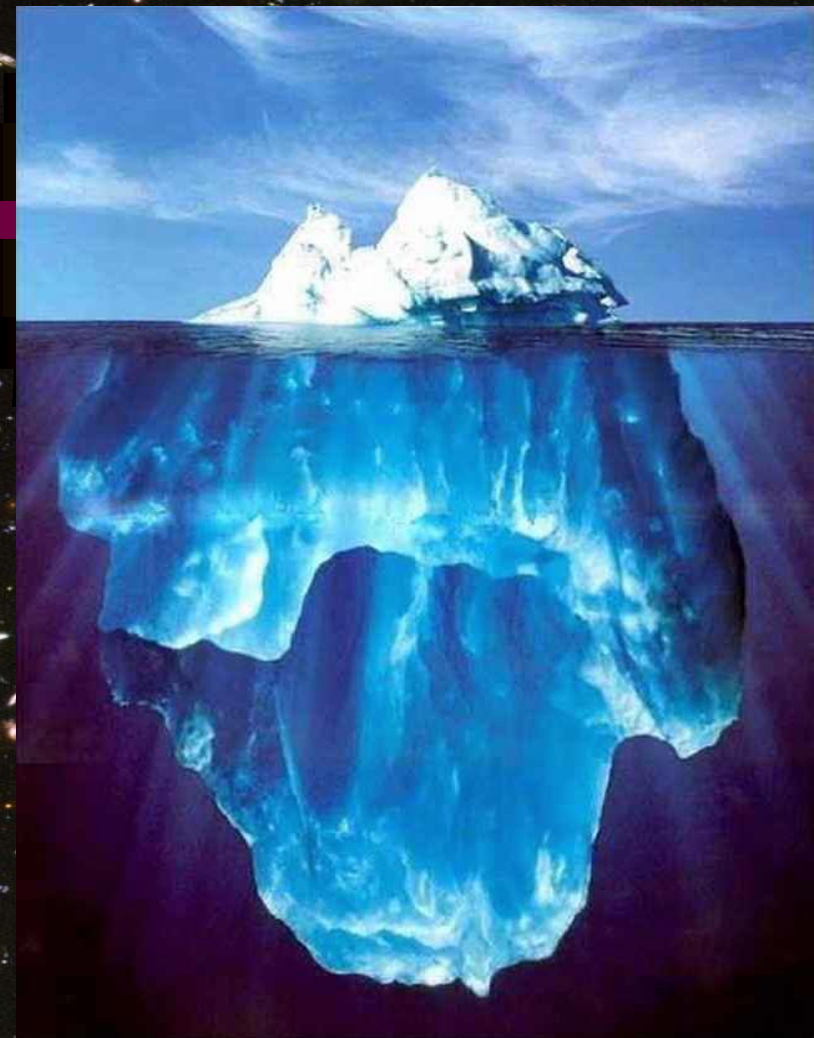
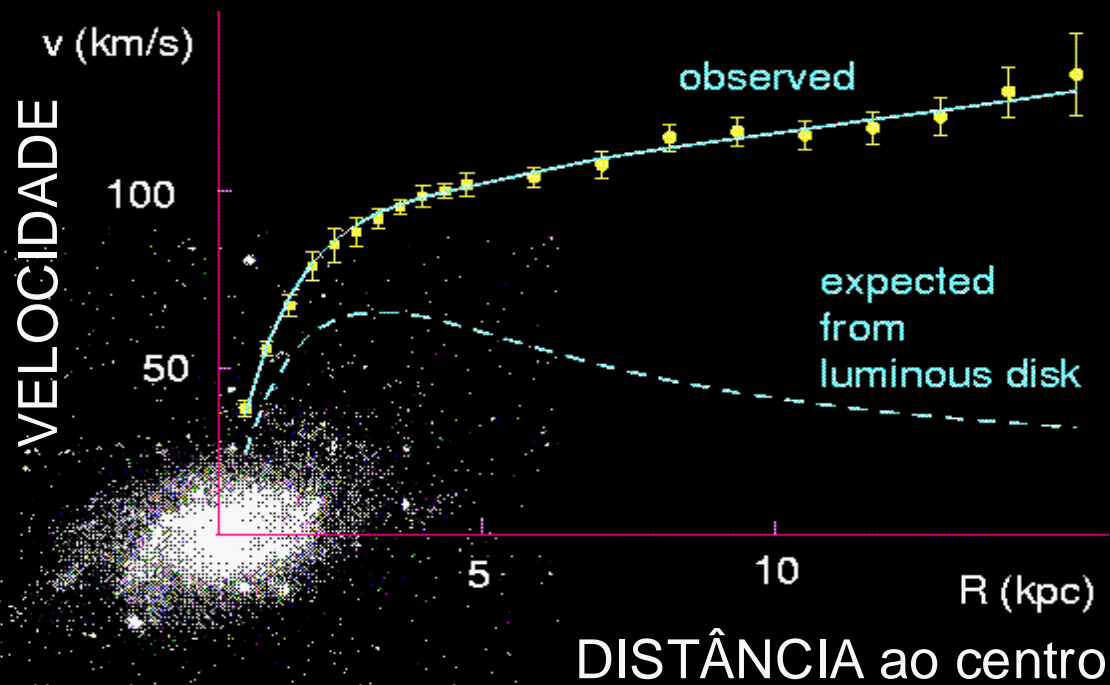
© 2008 3ngel R. L3pez-S3nchez

©2011 Jorge Dias de Deus

pedro abreu – O Lado Escuro do Universo

©2011 Sofia Andringa

A evidência para a Matéria Escura



©A. De Angelis

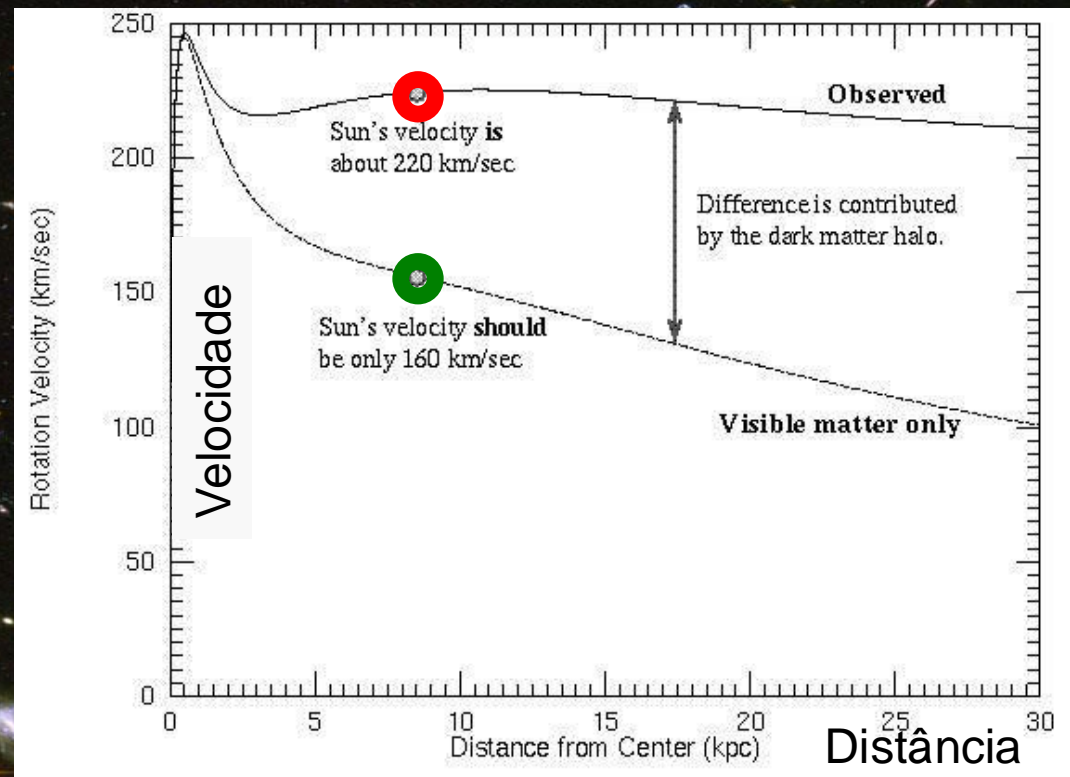
Maior fração de massa não brilha! O que será?!

Matéria escura na Via Láctea!

© COBE

Milky Way

M100 \approx Milky Way



- Distribuída na Galáxia, não agrupada!
- Nenhuma forma de matéria conhecida!

Matéria Escura na colisão de Aglomerados de Galáxias

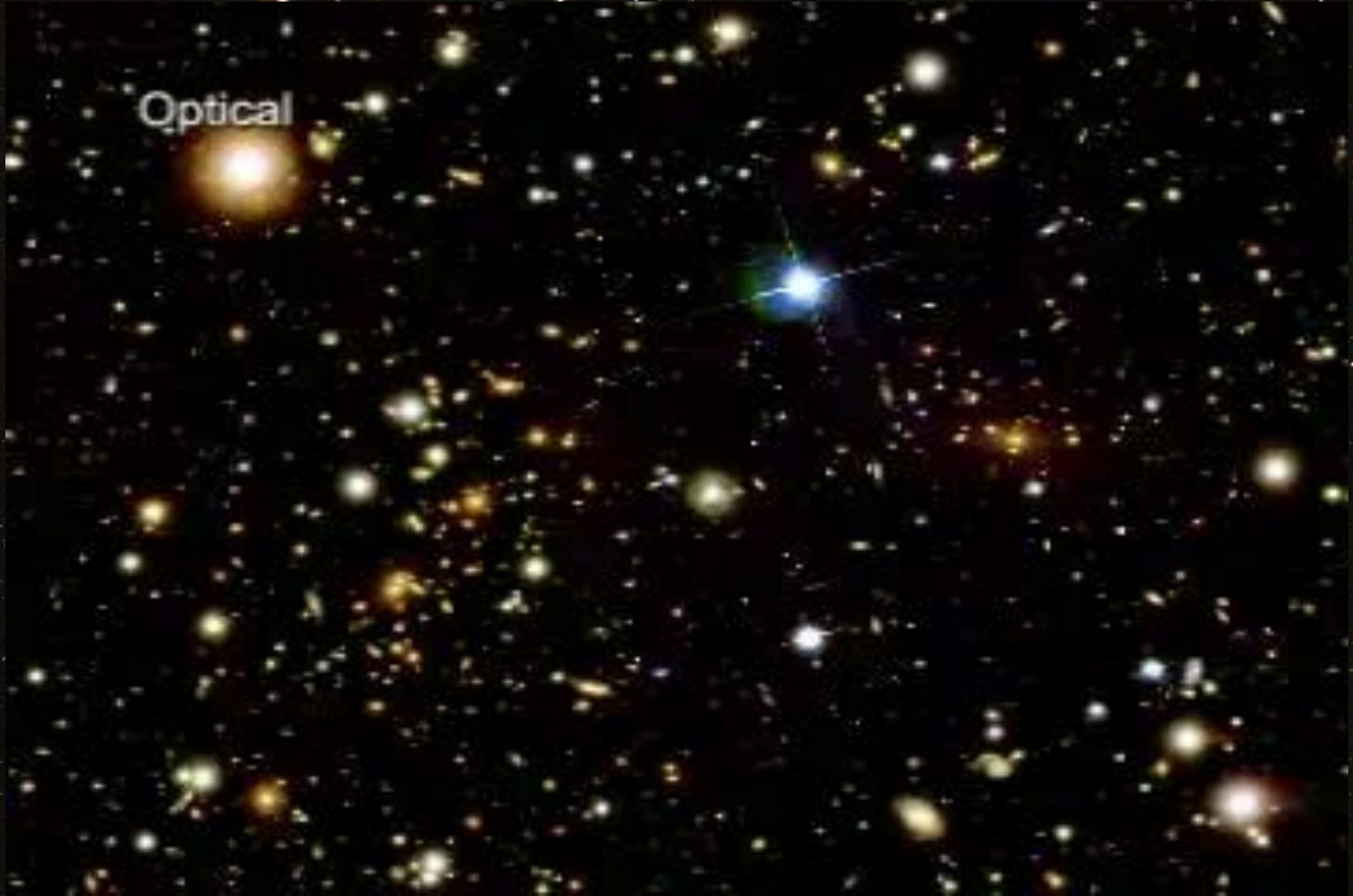
© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



©2011 Carlos Herdeiro

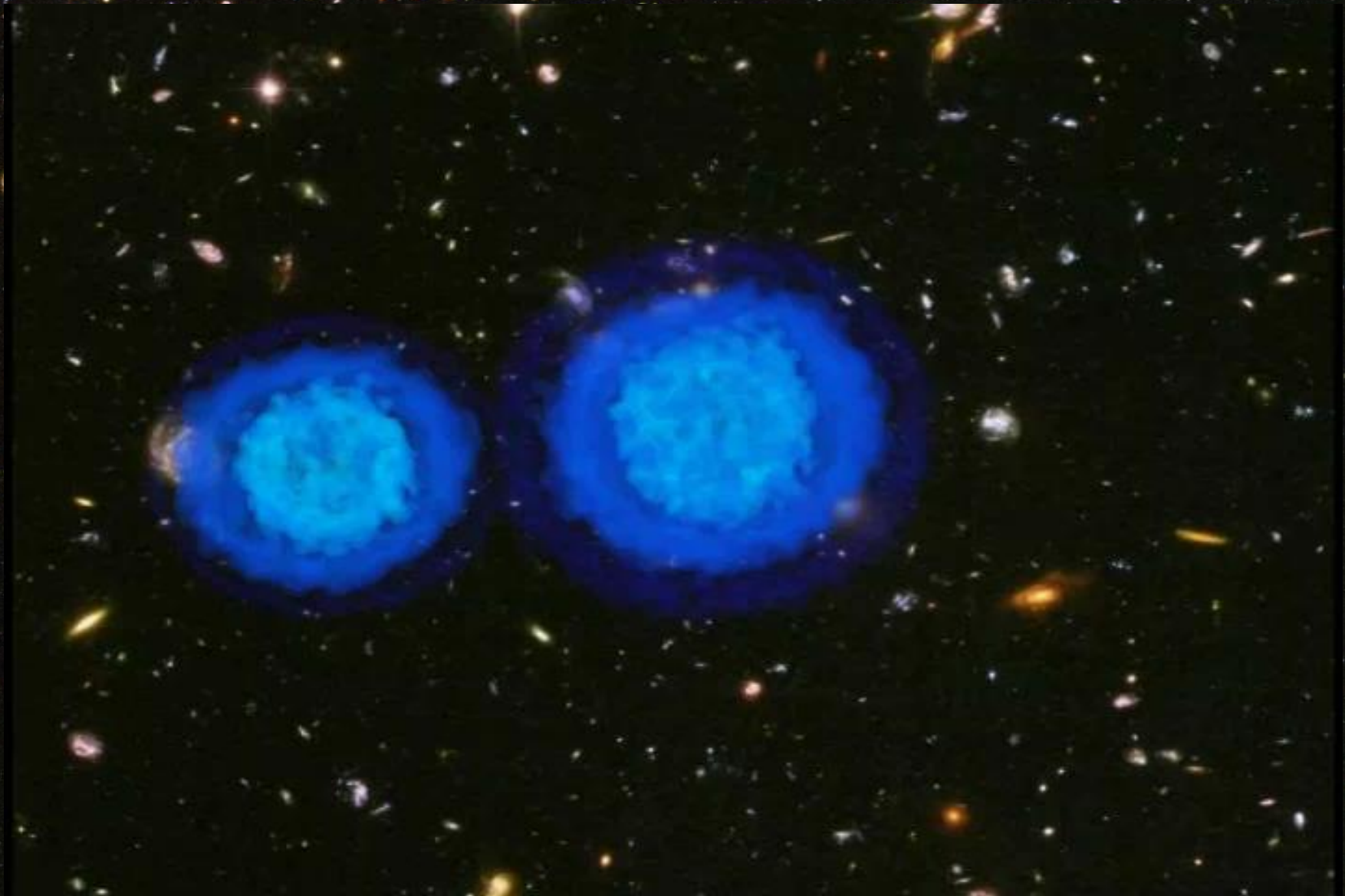
Matéria Escura na Colisão de Aglomerados de Galáxias

© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



A formação do Bullet Cluster

© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



Matéria Escura na Colisão de Aglomerados de Galáxias

© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY

Matéria Escura
(reconstruída)

**Matéria
normal**

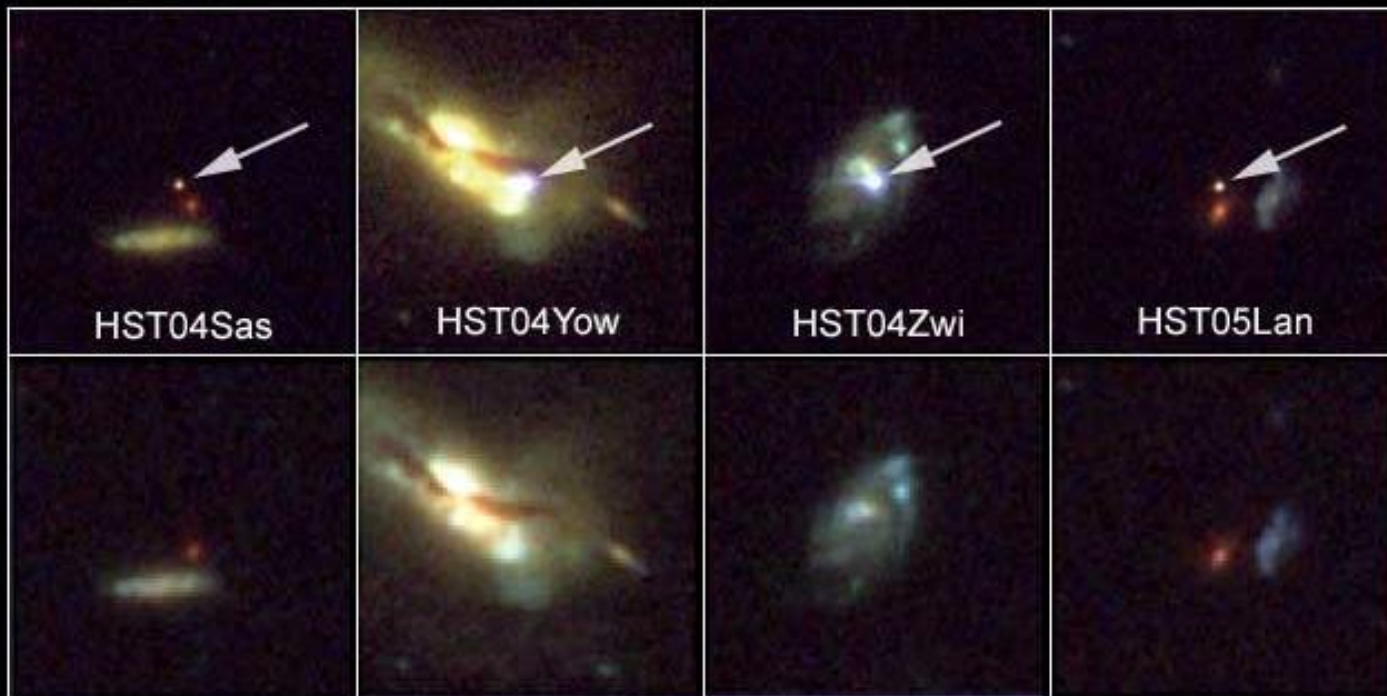
Matéria Escura
(reconstruída)

O Problema da 'Energia Escura'

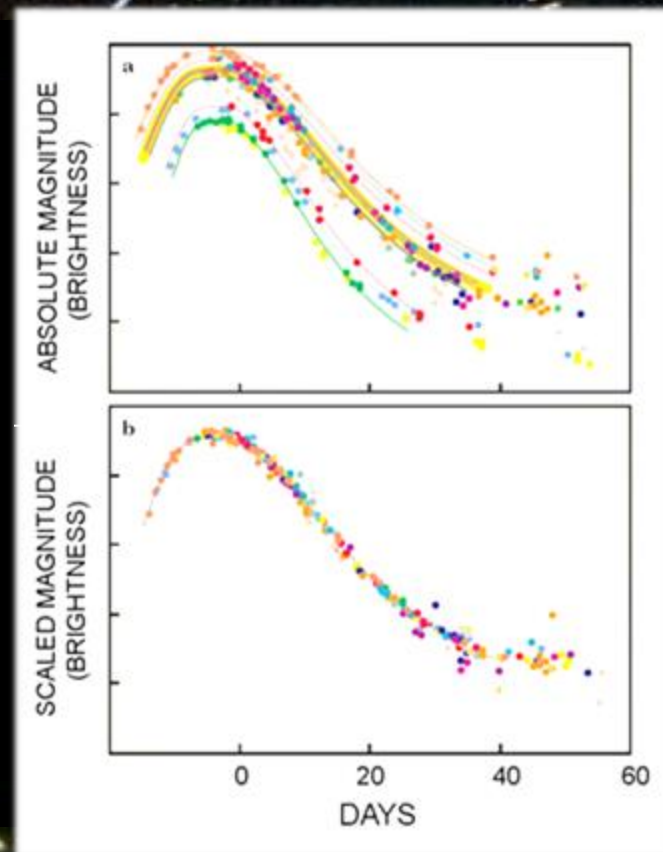
Cientistas estudam supernovae distantes para medir a evolução da expansão do Universo.

Esperavam que a taxa de expansão diminuísse desde o Big-Bang.

Host Galaxies of Distant Supernovae Type Ia

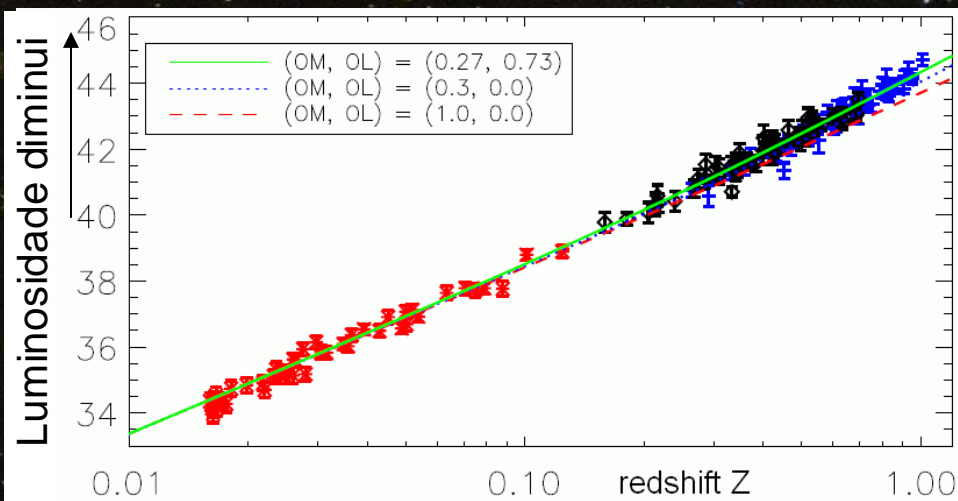


NASA, ESA, and A. Riess (STScI)

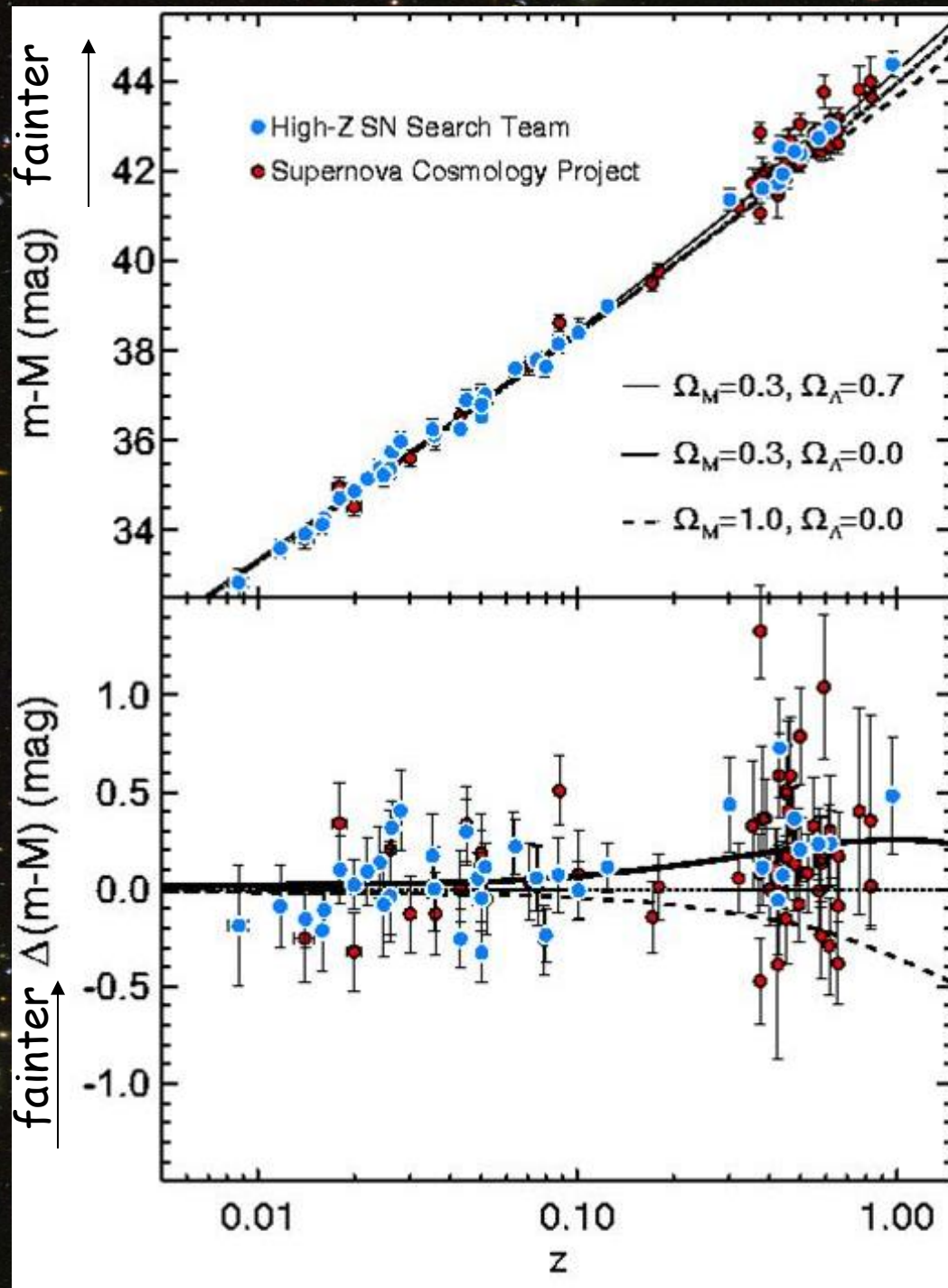
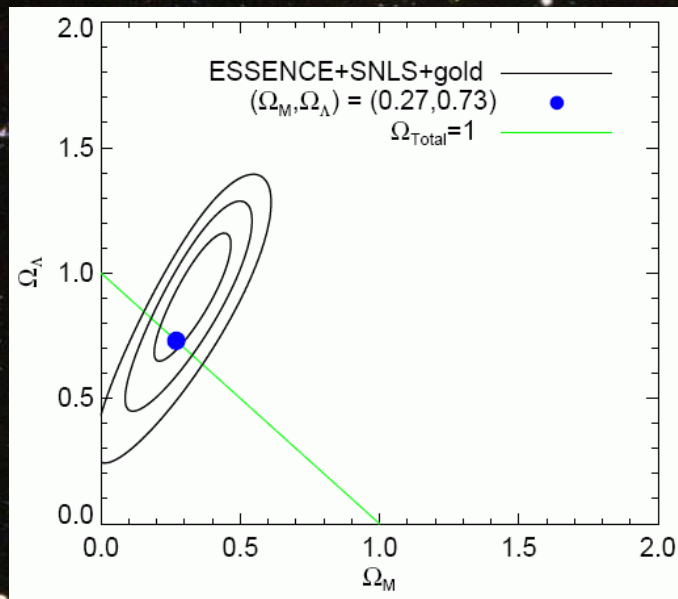


...socorro!!!

E mais recentemente:

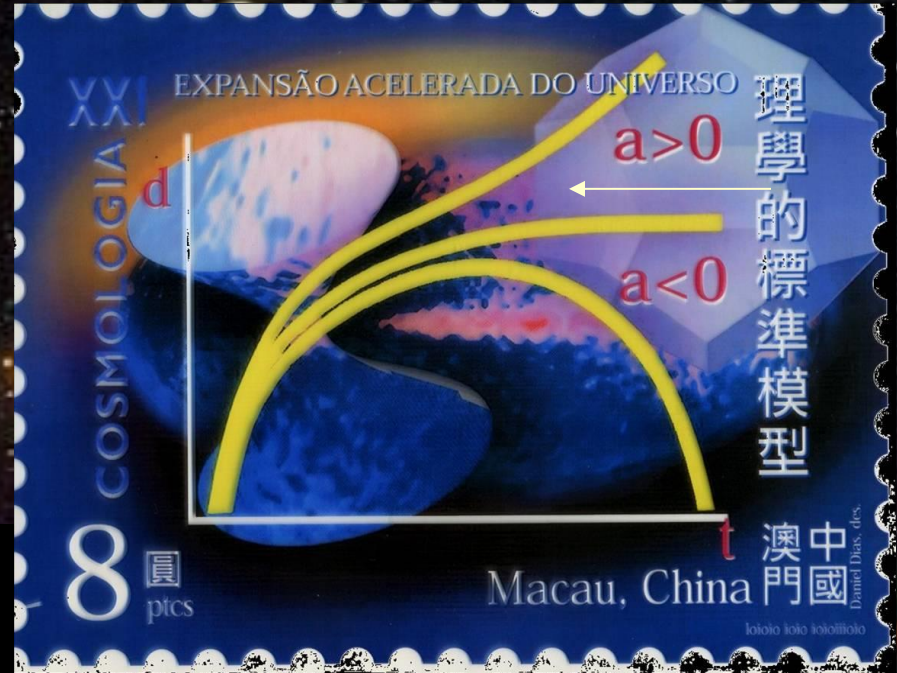


Densidade Não-Matéria
vs.
Densidade Matéria
(Escura + Ordinária)



Oops... não está a diminuir!

- A Expansão do Universo está acelerando!!!
- Algo se está a sobrepôr à gravidade
- Cientistas chamam-lhe 'Energia Escura'

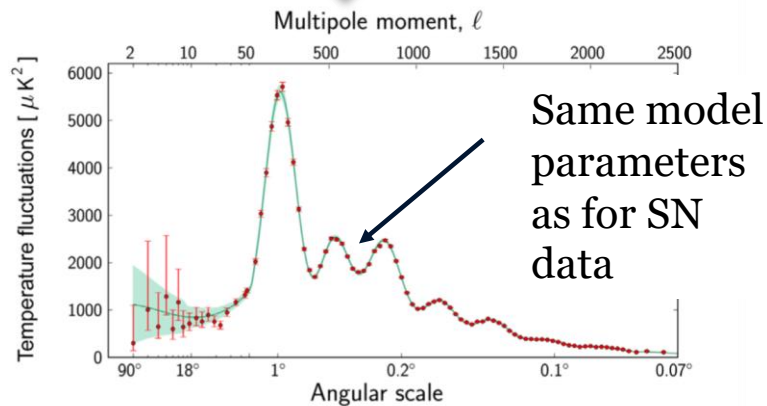
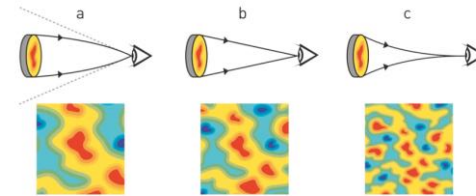
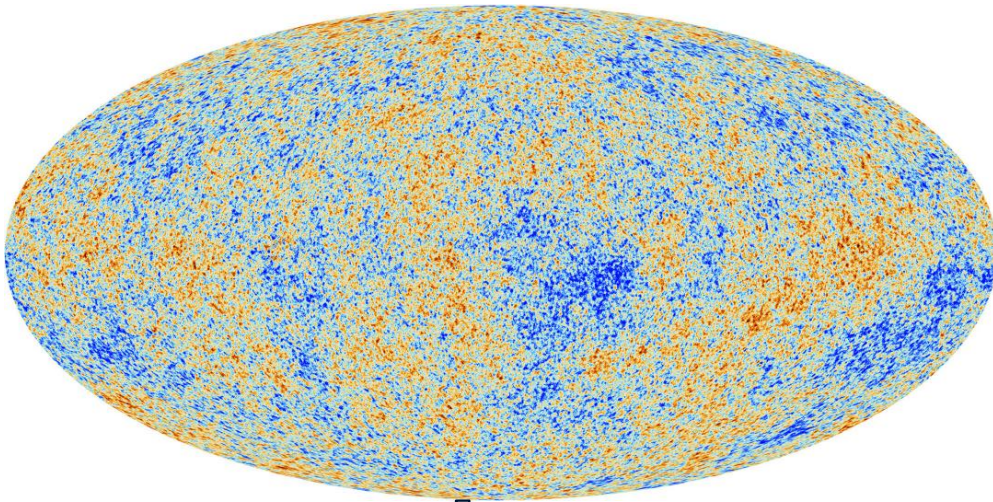


Informação da Radiação Cómica de Fundo



Cosmic Microwave Background

10

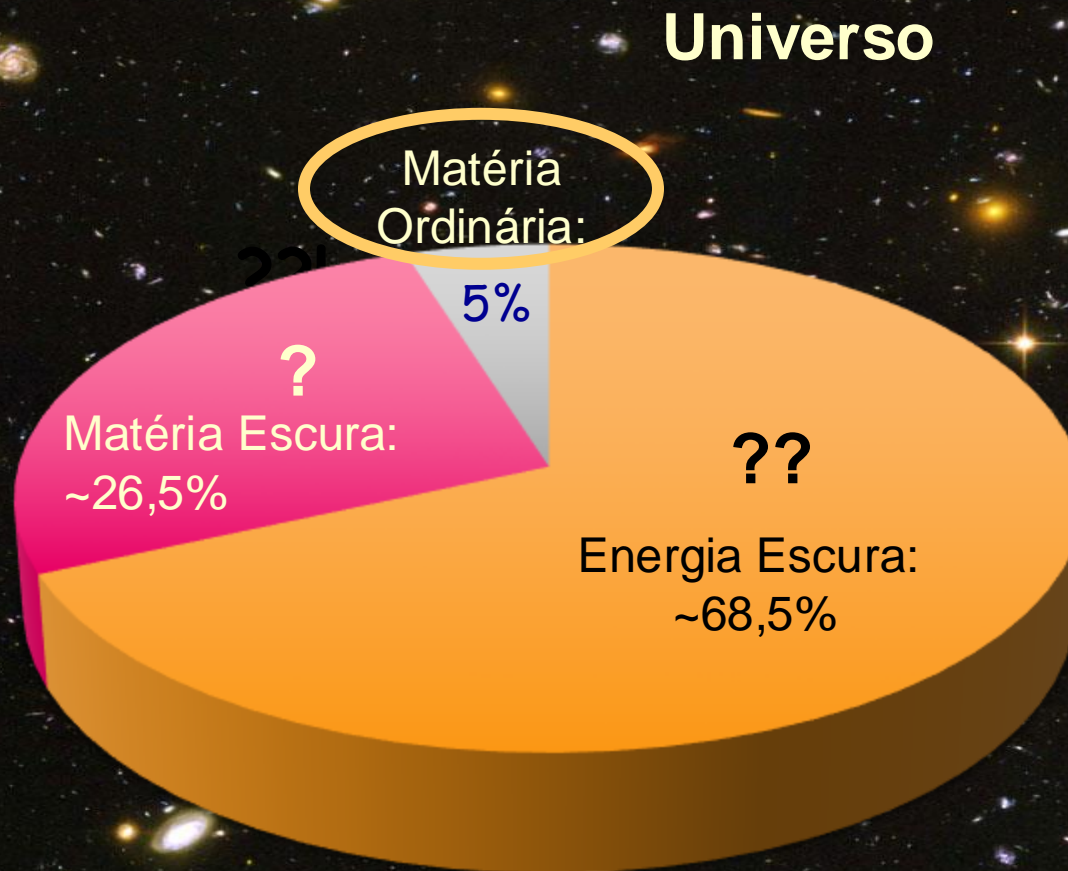


Infer

- 1) Global curvature of space-time (1:st peak)
- 2) Amount of ordinary matter (2:nd)
- 3) Amount of dark matter (3:rd)

1) = "2)+3)+Energia Escura"

De que é então feito o Universo?!



- Energia Escura
- Matéria Escura
- Matéria Ordinaria

©2018 PLANCK

À procura de Matéria Escura

- Encontrar **Supersimetria**, se existir:
o melhor candidato para a Matéria Escura será a partícula supersimétrica mais leve, estável e produzida em grandes quantidades no Big Bang
- Encontrando **Weakly Interactive Massive Particles**:
se existirem = Matéria Escura
- Encontrando neutrinos supermassivos, etc!

À procura de Matéria Escura

Hipóteses (assumidas):

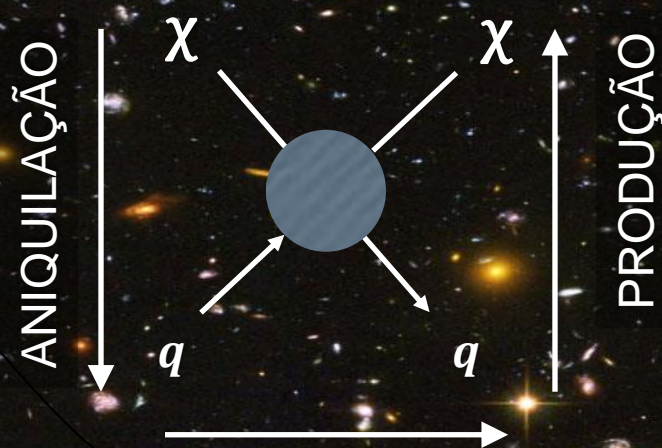
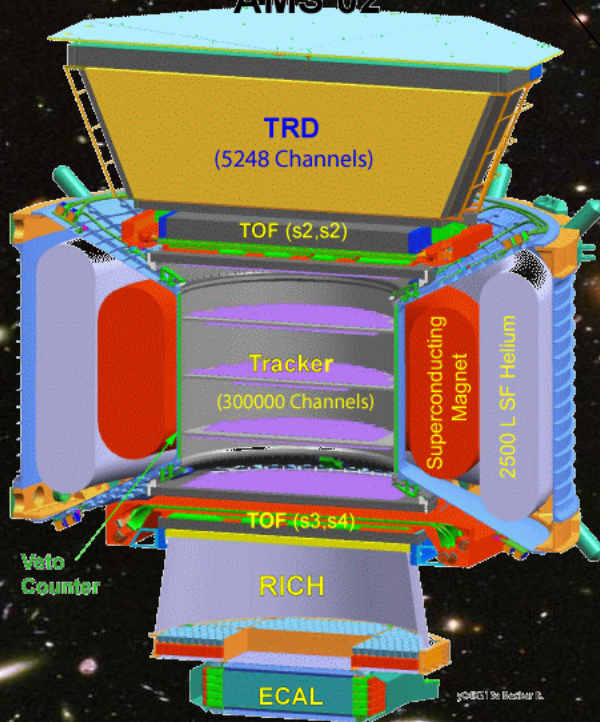
- partícula elementar [χ],
- estável,
- massiva,
- sem carga elétrica e sem interação forte (“côr”),
- com interação fraca (e gravítica),
- produzida em grandes quantidades no Big Bang

À procura de Matéria Escura

$$\chi + \chi \rightarrow q + \bar{q}$$

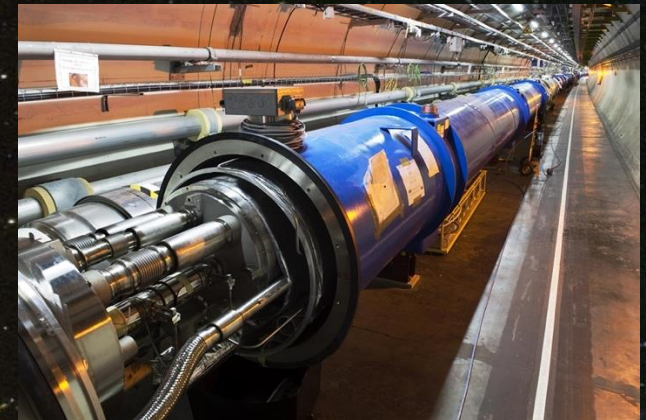
AMS @ ISS

AMS 02



$$q + \bar{q} \rightarrow \chi + \chi$$

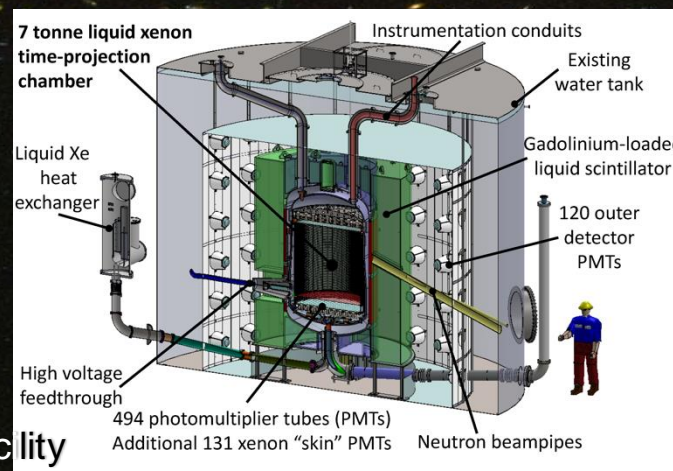
LHC experiments @ CERN



ESPALHAMENTO(*)

$$\chi + q \rightarrow \chi + q$$

LZ @ SURF(**)



E energia escura?

Muitas experiências para a caracterizar a sua distribuição.

Nenhuma pensada para a sua Natureza (partícula? Λ ?).
Ainda compatível com apenas Λ .

(*) difusão, dispersão

(**) Sanford Underground Research Facility

Conclusões

Partículas Elementares

Cosmologia

A Origem da massa

Espectro de massas, famílias
Massa dos neutrinos
Massa e simetria de gauge
Mecanismo de Higgs

A Unificação das Interações

Grande unificação
Decaimento do próton
Supersimetria
Gravitação e supercordas

Violação de CP

A Expansão do Universo

Big-Bang
Nucleosíntese primordial
Radiação Cósmica de Fundo

Inflação ? Teorias VSL^(*) ?

Homogeneidade
 $\Omega \sim 1$

Matéria Escura/Energia escura

Buracos Negros

Assimetria matéria-antimatéria

(*) Variable Speed of Light – velocidade da luz no vácuo, c , variável no tempo/com a densidade de energia

Obrigado pela v/ atenção



Albert Einstein [P.N.1921]: (Com o conhecimento...)

*“podemos olhar para o Universo como se não existissem milagres.
Mas também podemos olhar para o Universo como se tudo fosse um milagre!”*