

O LADO ESCURO DO UNIVERSO

Pedro Abreu
LIP/IST, Lisboa
Escola
de Professores no
CERN em Língua
Portuguesa
8 Setembro 2023

NOSSO Universo!

~~**Porquê?!
Universo!**~~

O QUÊ?

COMO?

A deep-field astronomical image showing a vast field of galaxies. The galaxies are scattered across the frame, appearing in various colors (yellow, orange, blue, purple) and orientations (spiral, elliptical, irregular). The background is a deep black, punctuated by the light of these distant celestial bodies.

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)

MATÉRIA ESCURA

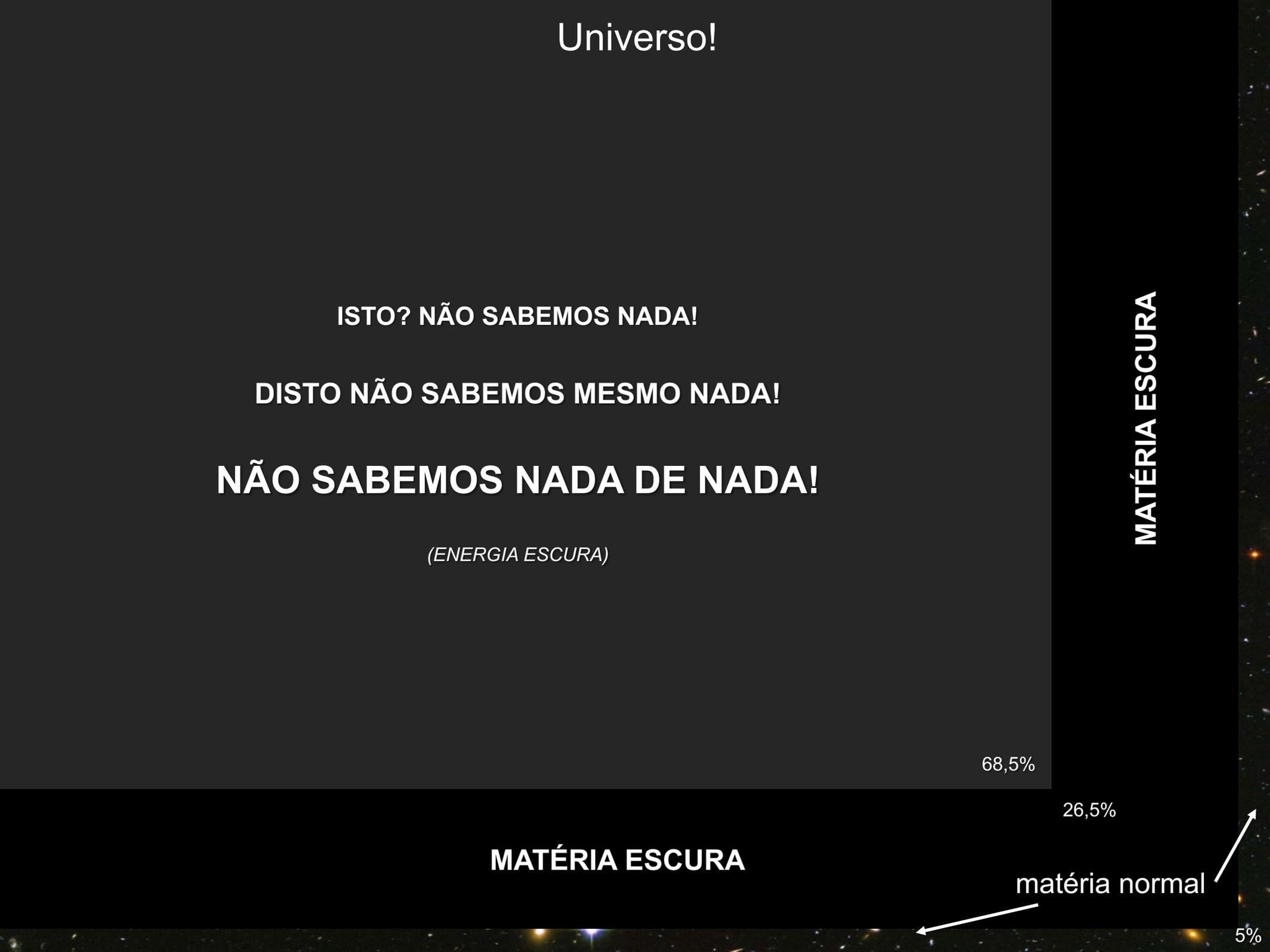
68,5%

26,5%

MATÉRIA ESCURA

matéria normal

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° estrelas $\sim r^2$

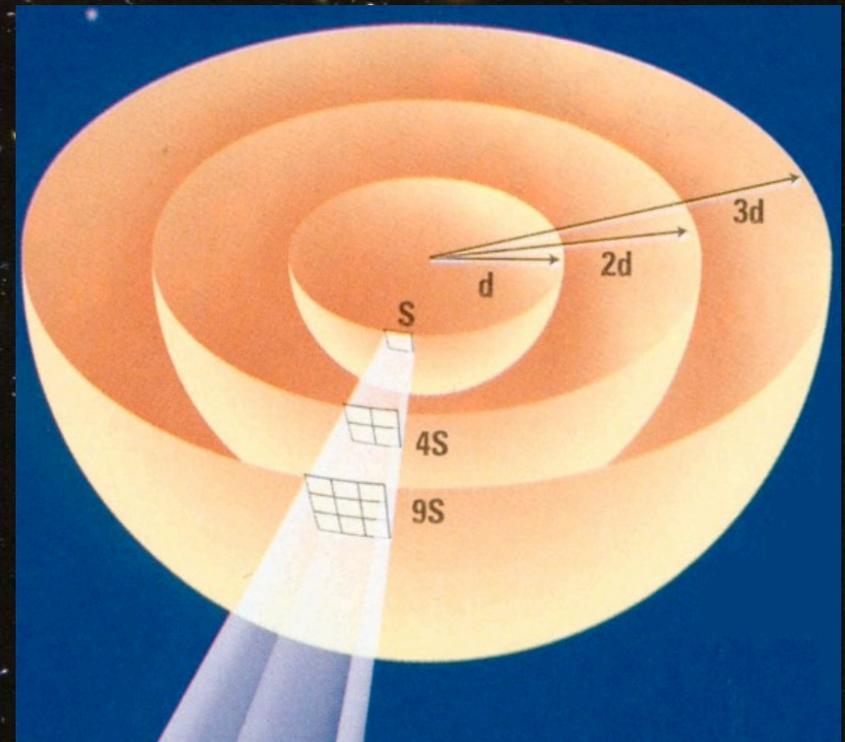
A luz diminui de intensidade com $\sim 1/r^2$

Contribuição de luz de cada camada = constante

O Céu deveria ser cheio de luz

Consequência:

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

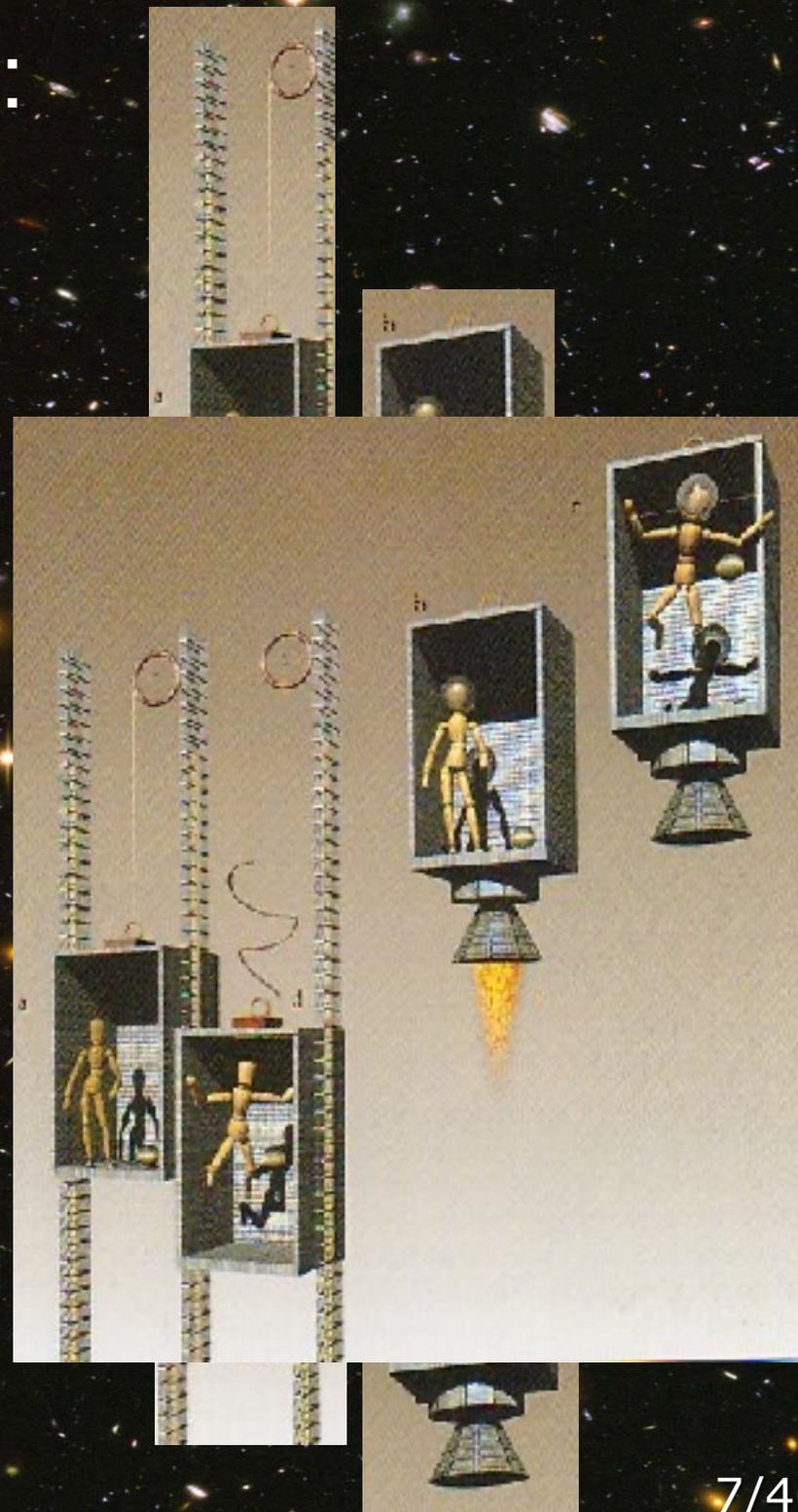


Uma teoria para o Universo:

Relatividade Geral (1915 !)

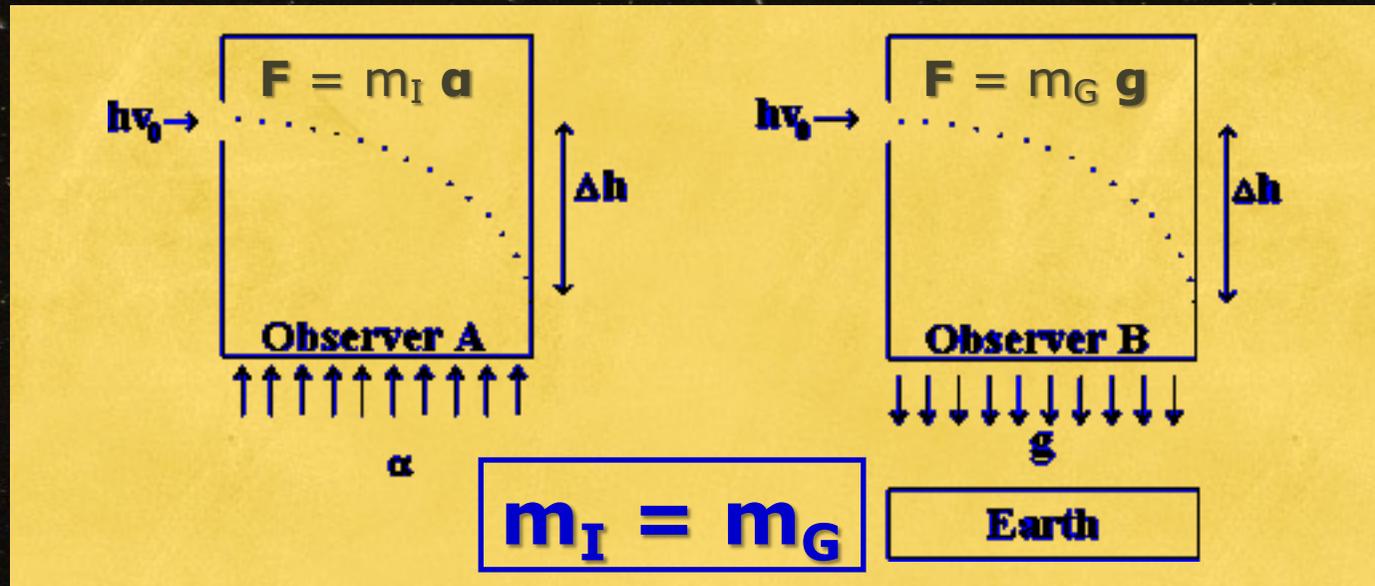
Não se pode realizar nenhuma experiência, de qualquer natureza, que nos permita distinguir um referencial acelerado e um referencial sujeito à gravidade!

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!

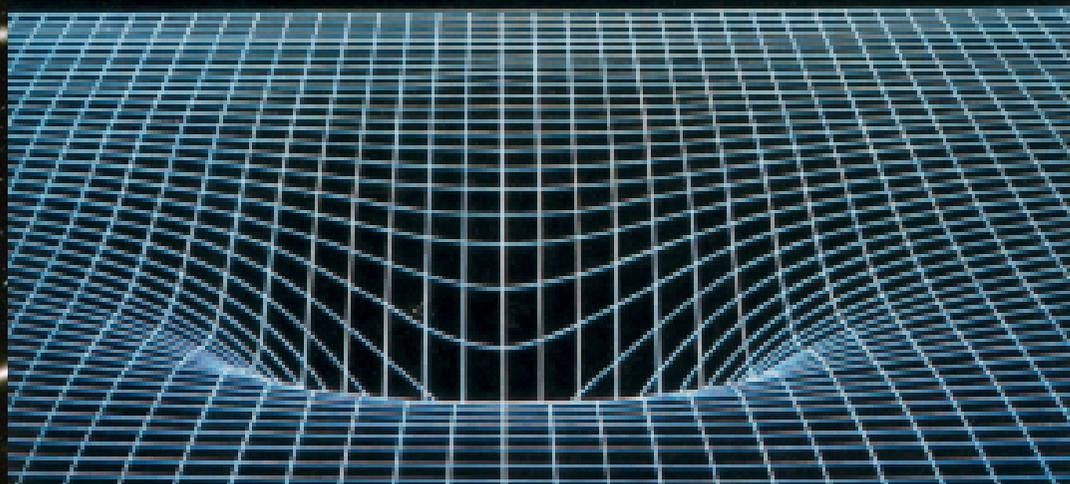
Espaço e Tempo são curvos!

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

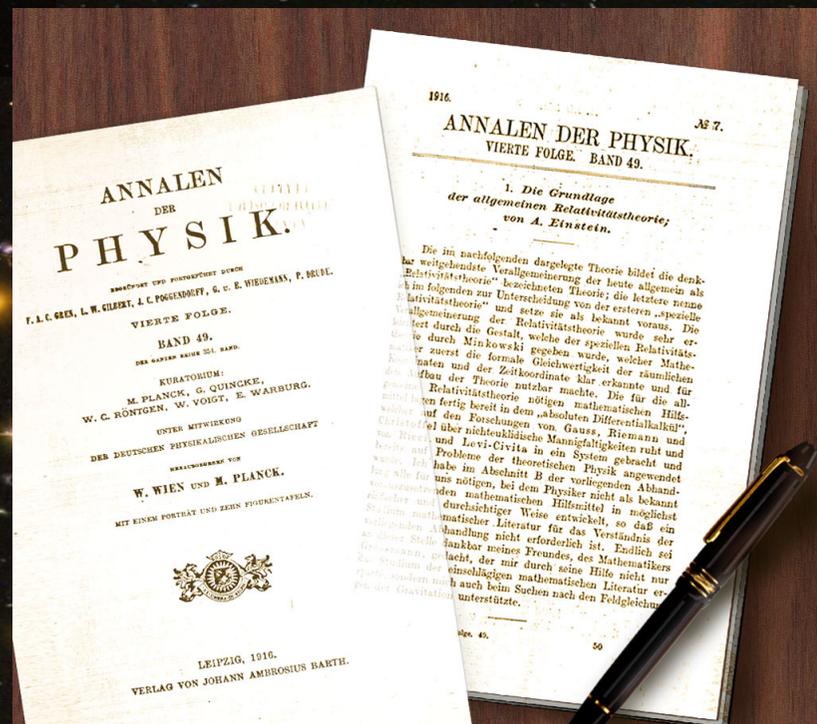
kg⁻²



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

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

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



Einstein 1917:

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

(Constante Cosmológica)

$$R_{\eta\eta} = -\frac{2a^2 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2ac \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{a \frac{\partial c}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{2a^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2}}{\delta \psi^2}$$

$$- \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} c \frac{\partial c}{\partial \theta}}{a^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial c}{\partial \theta}}{a^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial c}{\partial \eta}}{a^2 \psi} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial \theta} \frac{\partial c}{\partial \eta}}{a^2 \psi} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} \frac{\partial b}{\partial \theta} c}{a^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} \frac{\partial b}{\partial \eta} c}{a^2 \psi}$$

$$+ \frac{ab \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} b^2 c \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{a^2 b \frac{\partial b}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} b^2 \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} + \frac{\frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \theta}}{4d^2} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \theta} c \frac{\partial d}{\partial \theta}}{4\delta d}$$

$$R_{\eta\theta} = -\frac{2a^2 \frac{\partial a}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}}{\delta \psi} + \frac{a^2 \frac{\partial a}{\partial \theta} b}{\delta^2 \psi} - \frac{2ac \frac{\partial d}{\partial \theta}}{\delta d \psi} + \frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}}{\delta^2 \psi} - \frac{2ab}{\delta^2 \psi}$$

$$+ \frac{a \frac{\partial b}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \theta}}{4\delta d} - \frac{\frac{\partial^2 d}{\partial \eta \partial \theta}}{2d} - \frac{\frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial d}{\partial \eta}}{4\delta d} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \theta} b \frac{\partial d}{\partial \eta}}{4\delta d} - \frac{\frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial c}{\partial \theta}}{\delta} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \theta} \frac{\partial c}{\partial \theta}}{2\delta}$$

$$+ \frac{c \frac{\partial^2 c}{\partial \eta \partial \theta}}{\delta} + \frac{\frac{\partial b}{\partial \eta} \frac{\partial c}{\partial \eta}}{2\delta} - \frac{\frac{\partial^2 b}{\partial \eta^2} c}{2\delta} - \frac{\frac{\partial^2 a}{\partial \theta^2} c}{2\delta} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} \frac{\partial b}{\partial \theta}}{4\delta} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \theta} \frac{\partial b}{\partial \eta}}{4\delta}$$

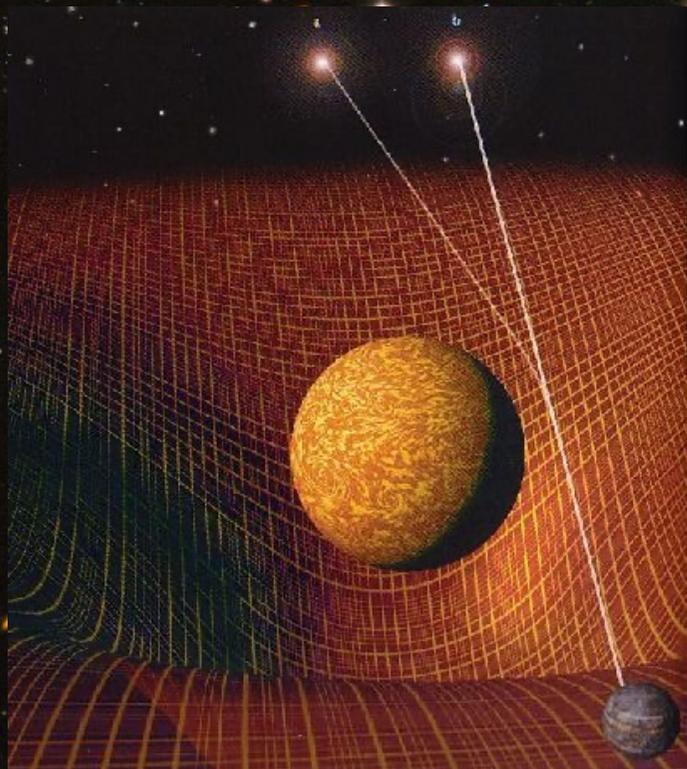
$$+ \frac{ab \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial c}{\partial \theta}}{\delta^2} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} bc \frac{\partial c}{\partial \theta}}{2\delta^2} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} b \frac{\partial c}{\partial \theta}}{2\delta^2} - \frac{a \frac{\partial b}{\partial \theta} c \frac{\partial c}{\partial \eta}}{2\delta^2} - \frac{ab \frac{\partial b}{\partial \eta} \frac{\partial c}{\partial \eta}}{2\delta^2} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} \frac{\partial b}{\partial \theta} c}{4\delta^2}$$

$$+ \frac{a (\frac{\partial b}{\partial \eta})^2 c}{4\delta^2} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial b}{\partial \eta} c}{4\delta^2} + \frac{(\frac{\partial c}{\partial \theta})^2 bc}{4\delta^2} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial b}{\partial \theta}}{4\delta^2} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \theta} b \frac{\partial b}{\partial \eta}}{4\delta^2}$$

$$R_{\theta\theta} = -\frac{2ab \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2bc \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial d}{\partial \theta} \cot \theta}{d} - \frac{c \frac{\partial c}{\partial \theta} \cot \theta}{\delta} + \frac{\frac{\partial b}{\partial \eta} c \cot \theta}{2\delta} + \frac{a \frac{\partial b}{\partial \theta} \cot \theta}{2\delta}$$

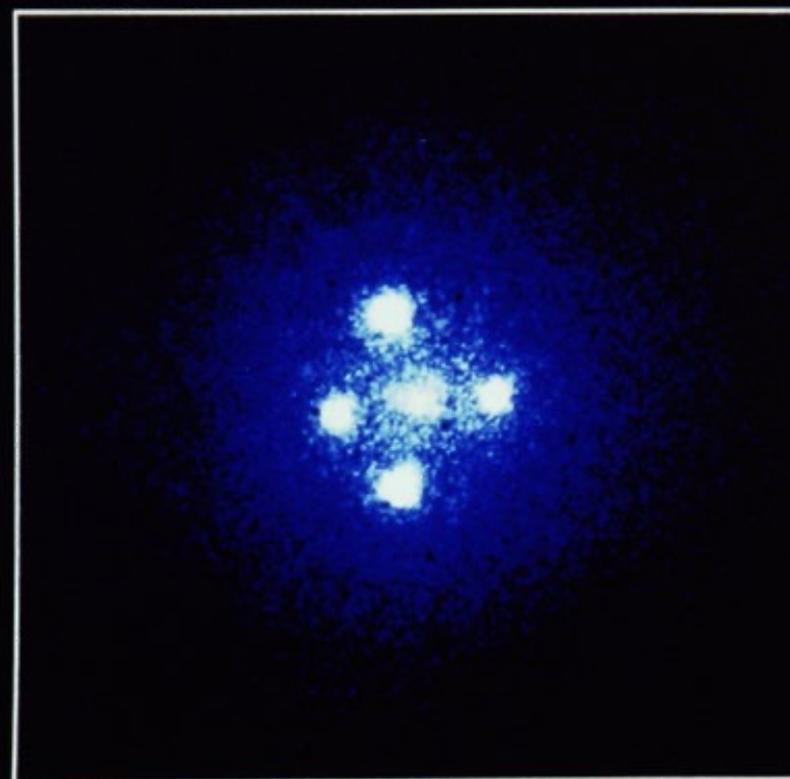
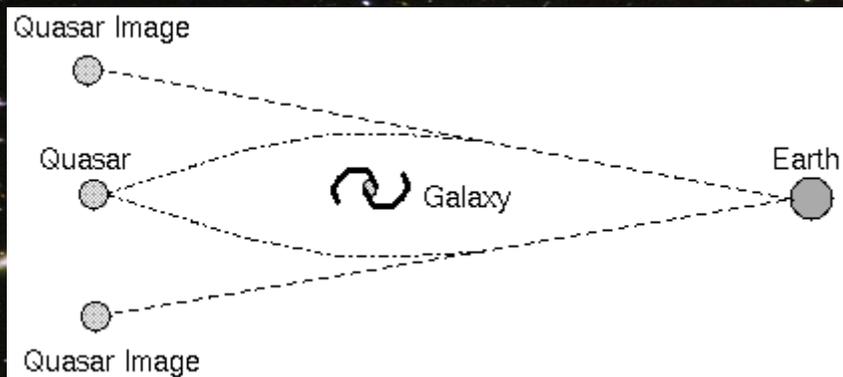
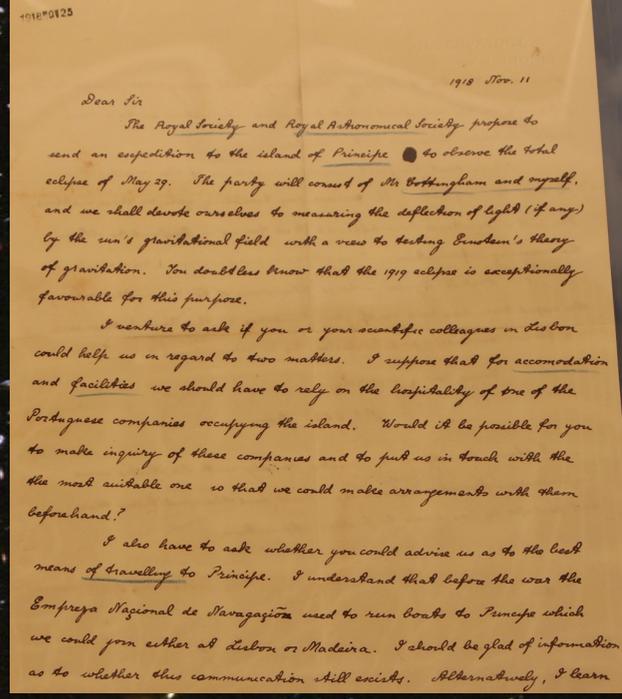
$$- \frac{2ab \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2}}{\delta \psi} - \frac{2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial \theta^3}}{\psi} - \frac{2ab (\frac{\partial \psi}{\partial \theta})^2}{\delta \psi^2} + \frac{6 (\frac{\partial \psi}{\partial \theta})^2}{\psi^2} + \frac{4bc \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}}{\delta \psi^2} - \frac{ab \frac{\partial d}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}}{\delta d \psi}$$

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)

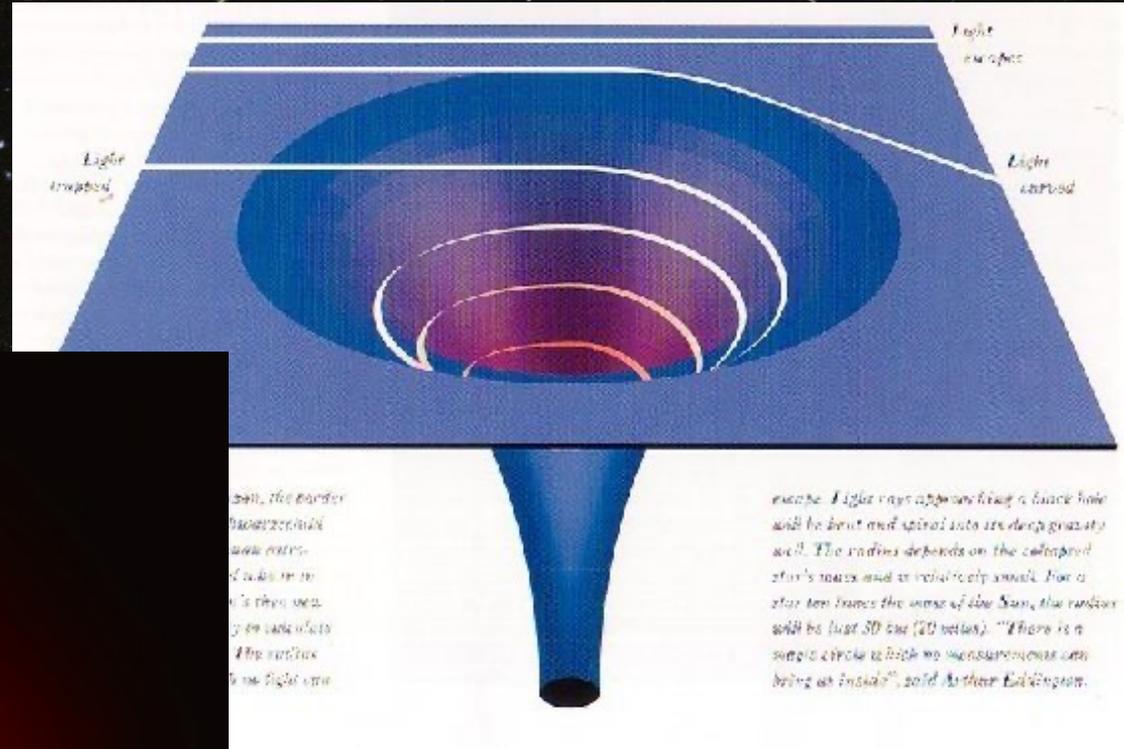


Gravitational Lens G2237+0305

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

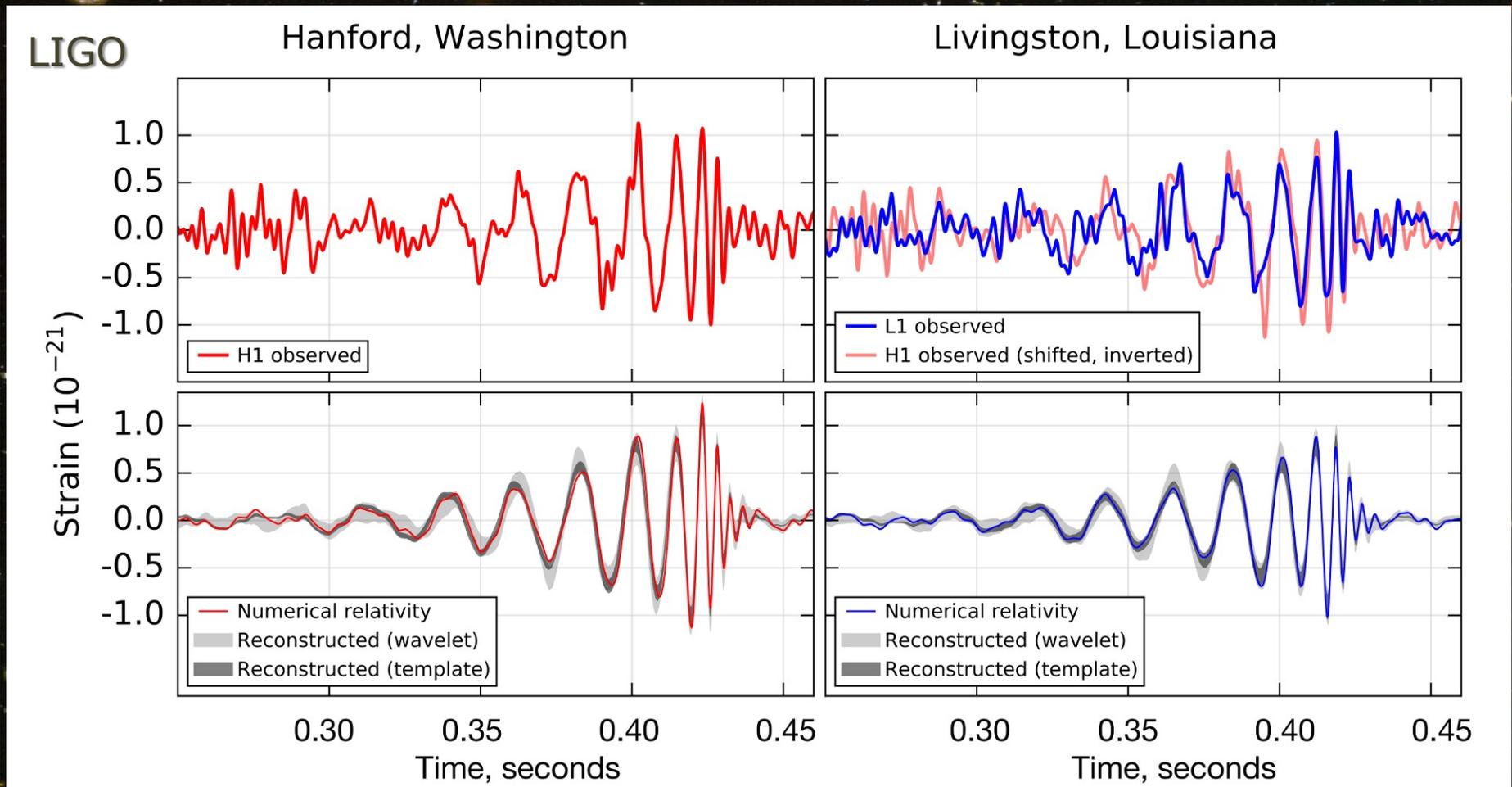
BH_{min}: 5115 m

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

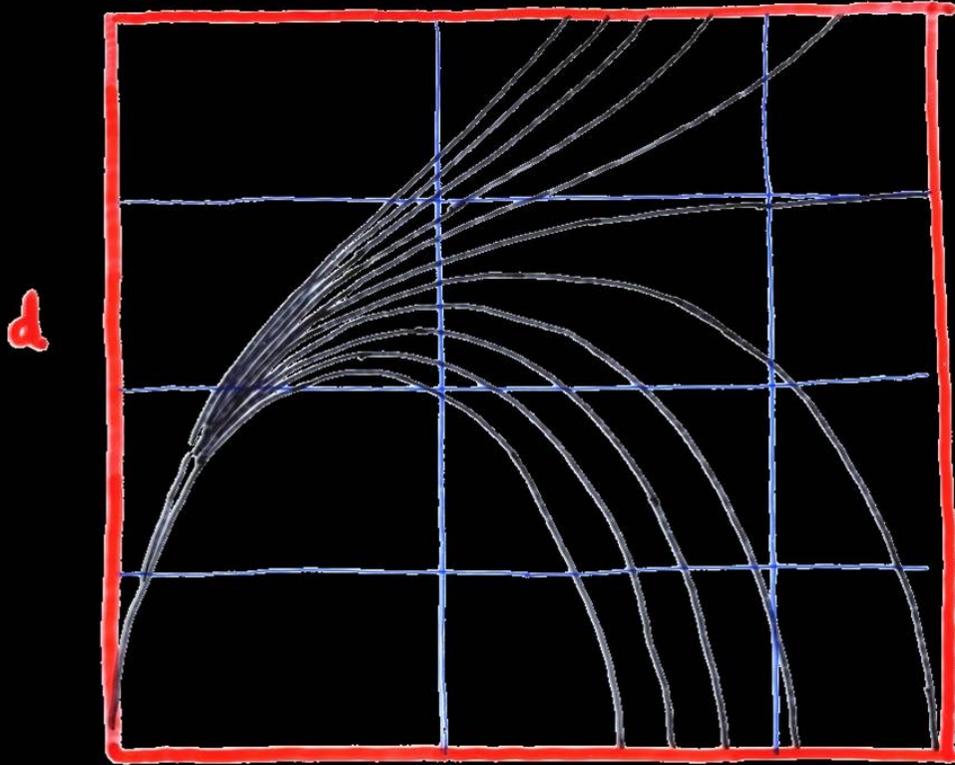
LIGO (USA)
Virgo/EGO (Itália/França)



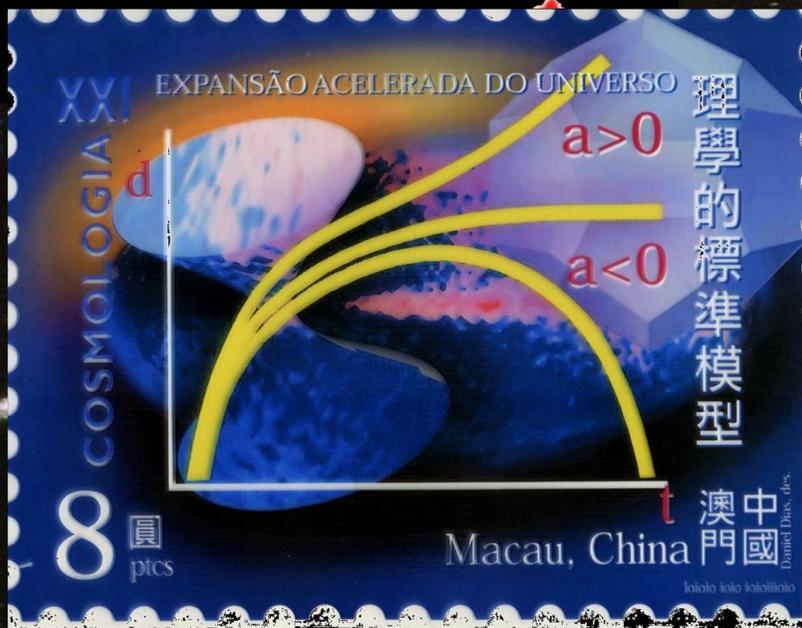
https://youtu.be/Zt8Z_uzG71o

<https://youtu.be/ZD4TXK4wQgU>

EXPANSÃO DO UNIVERSO!



G. Lemaitre, 1927



George Lemaitre (1927)

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

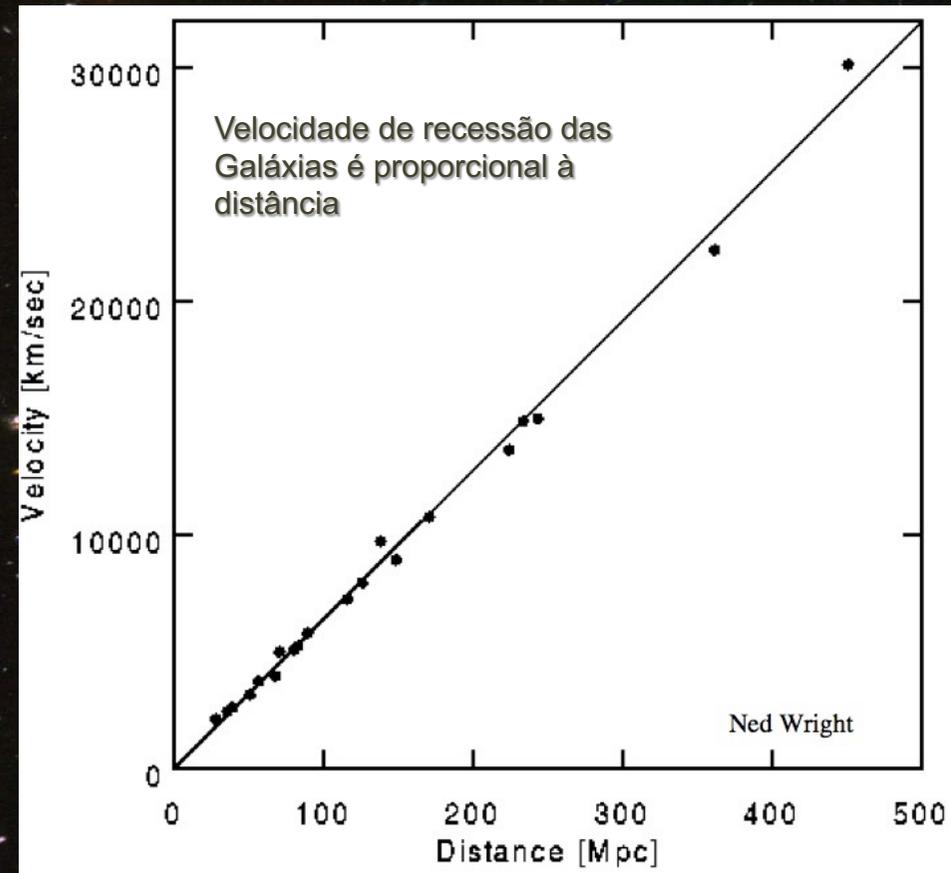
EXPANSÃO DO UNIVERSO!



Edwin Hubble (1929)
Mt. Palomar telescope

Einstein afirma:

a constante cosmológica = 'o meu maior erro'



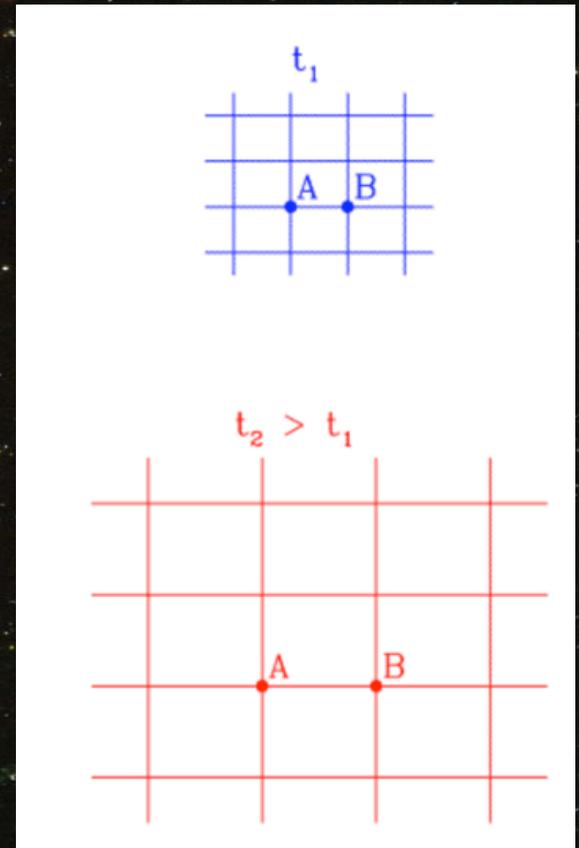
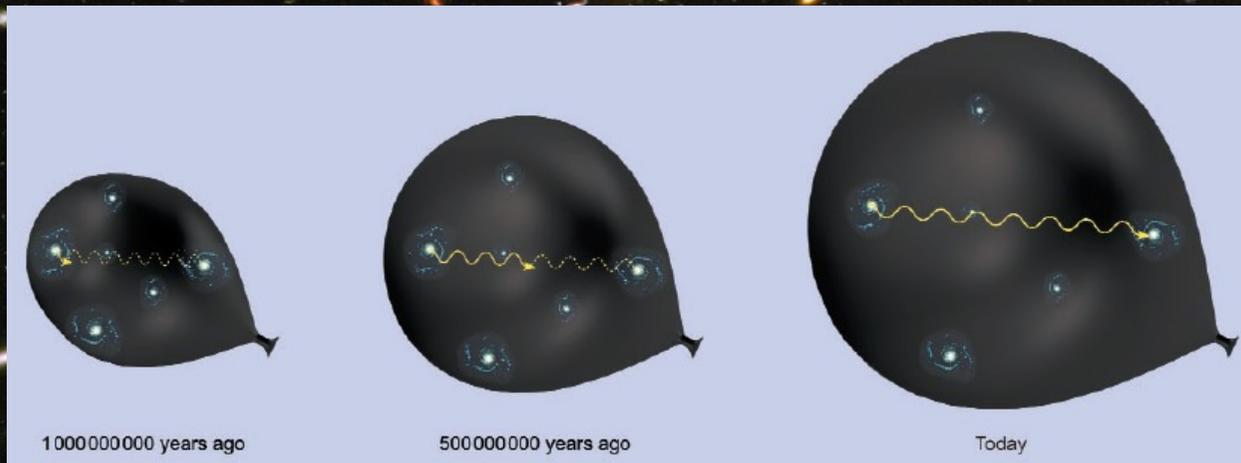
EXPANSÃO DO UNIVERSO!

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

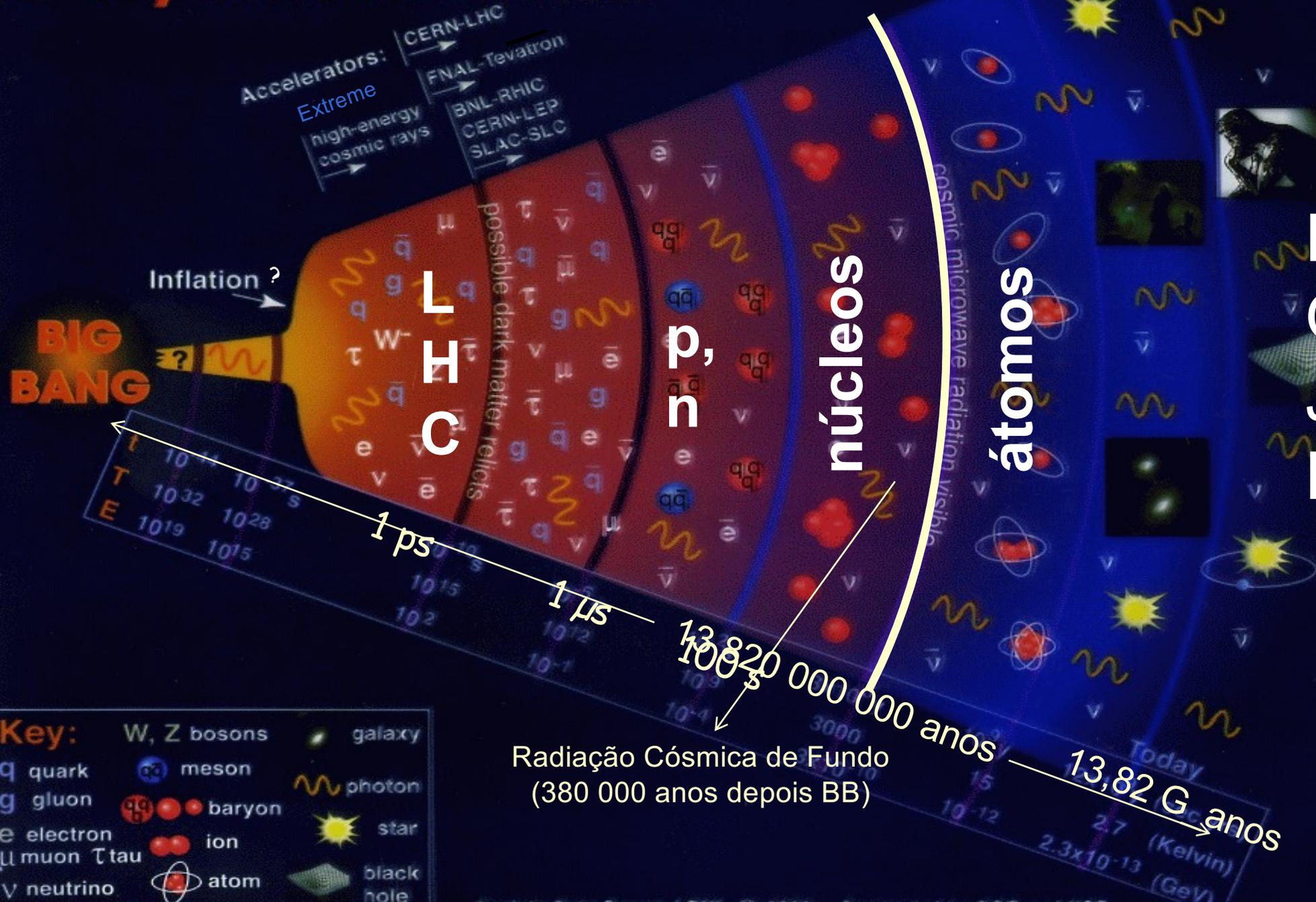
$$r_{AB}(t) = a(t)r_{AB}$$

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

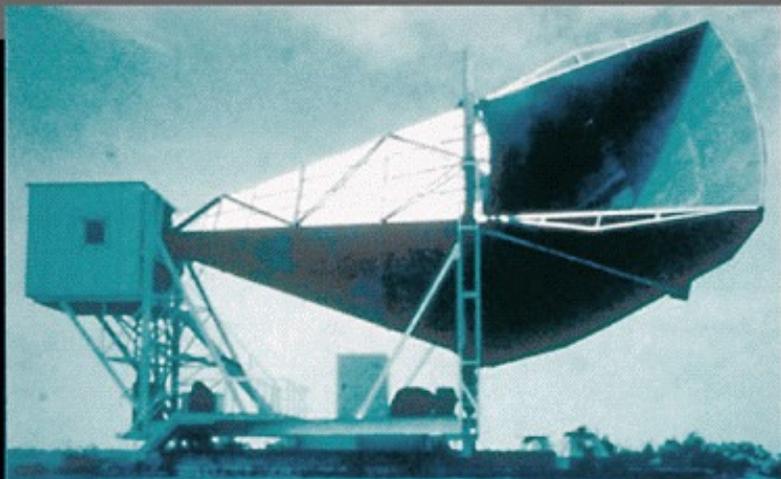


Particle Data Group, LBNL © 2000. Supported by DOE and NSF

H O U M

A Radiação C3smica de Fundo

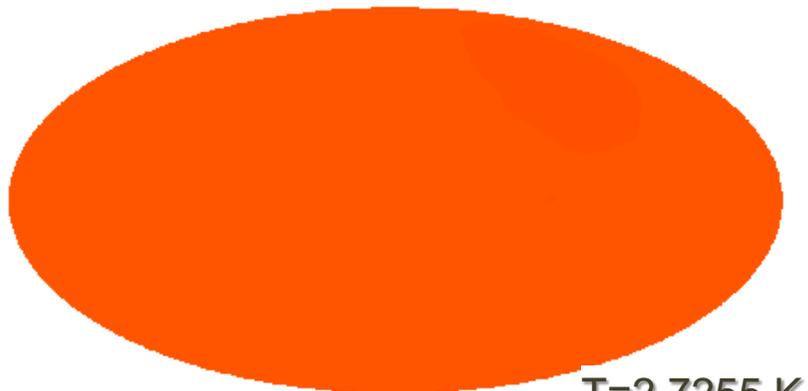
1965



Penzias and
Wilson

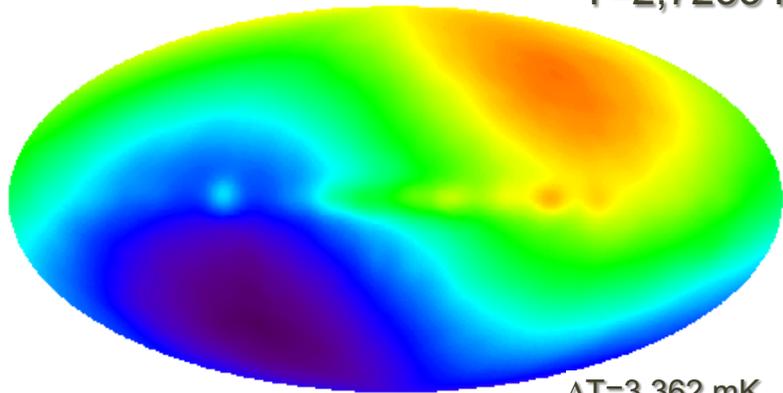
Pr3mio Nobel 1978

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



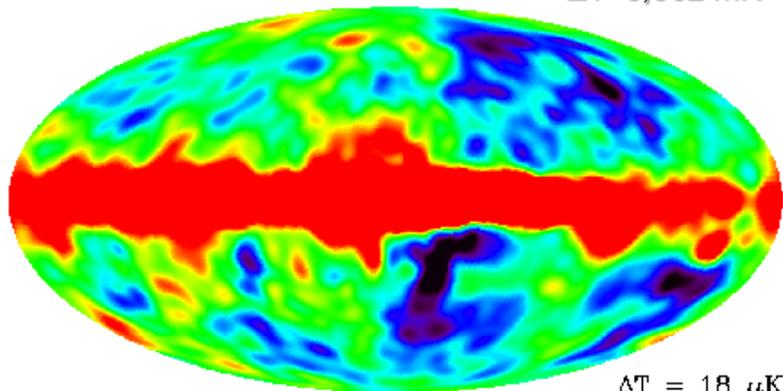
$T=2,7255 \text{ K}$

$T= 2.7255 \text{ K}$ 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)

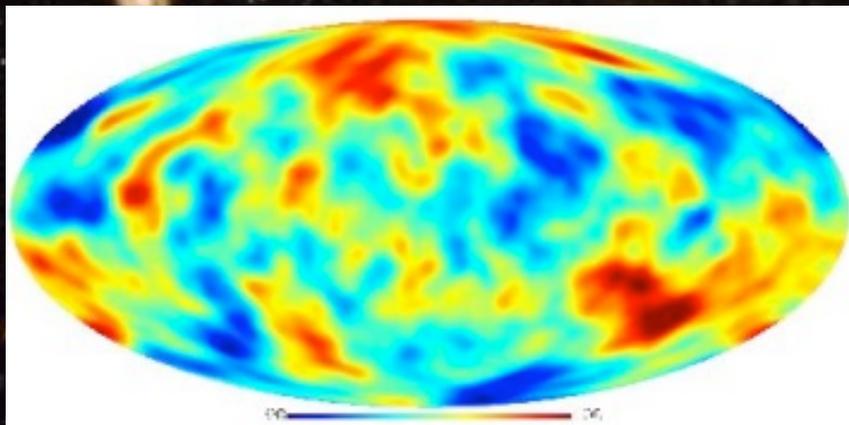


$\Delta T = 18 \mu\text{K}$

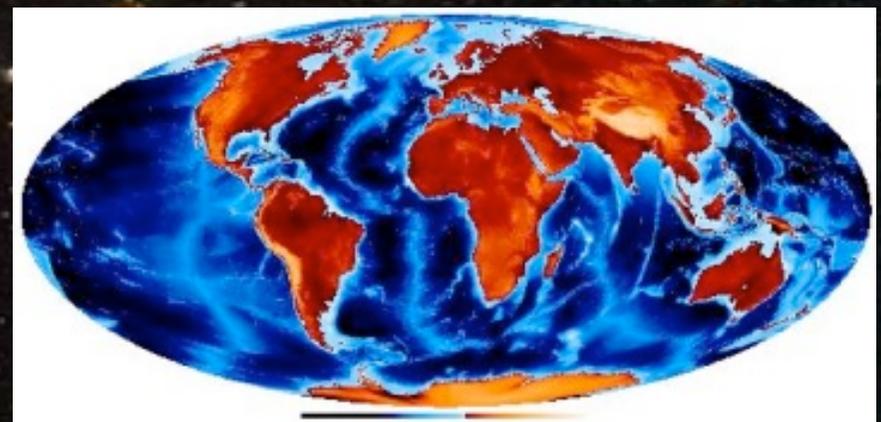
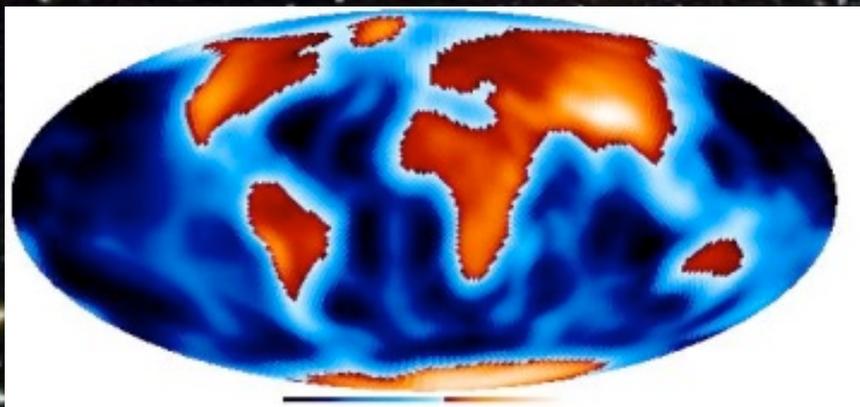
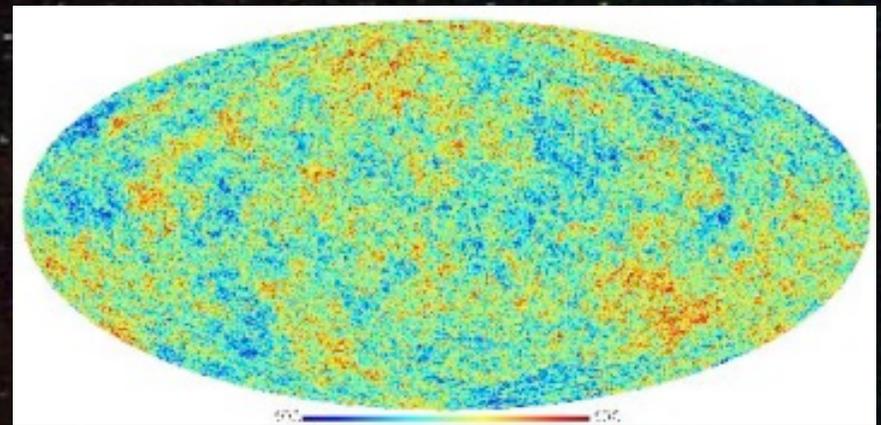
$\Delta T_{\text{RMS}}= 18 \mu\text{K}$ (0,000 018 K)
(depois de corrigido para o mov. Terra)

WMAP (2003): uma observação mais precisa

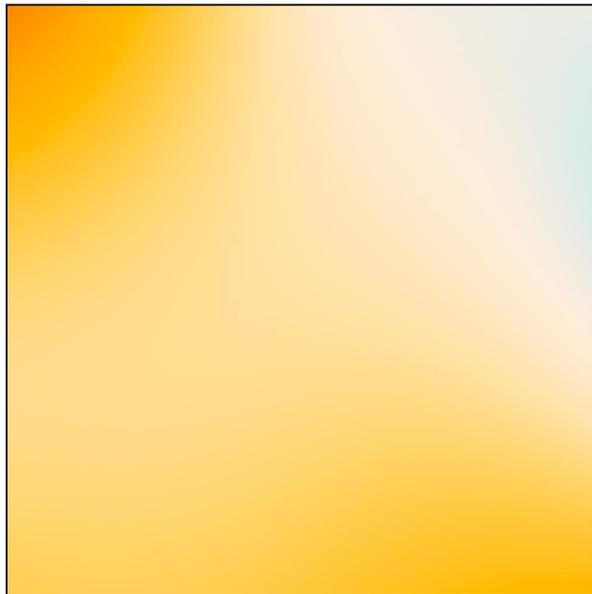
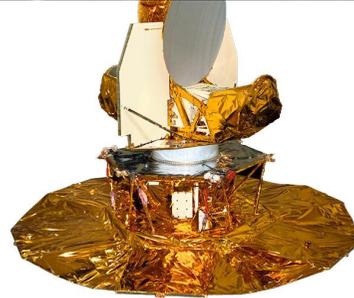
COBE
(7 degree resolution)



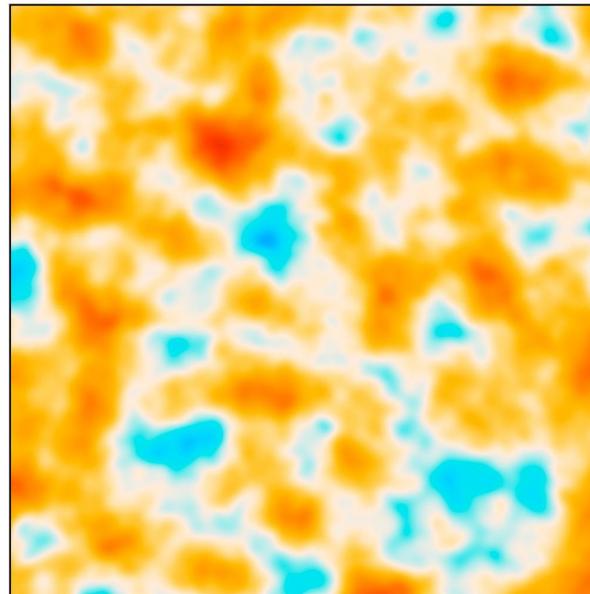
WMAP
(0.25 degree resolution)



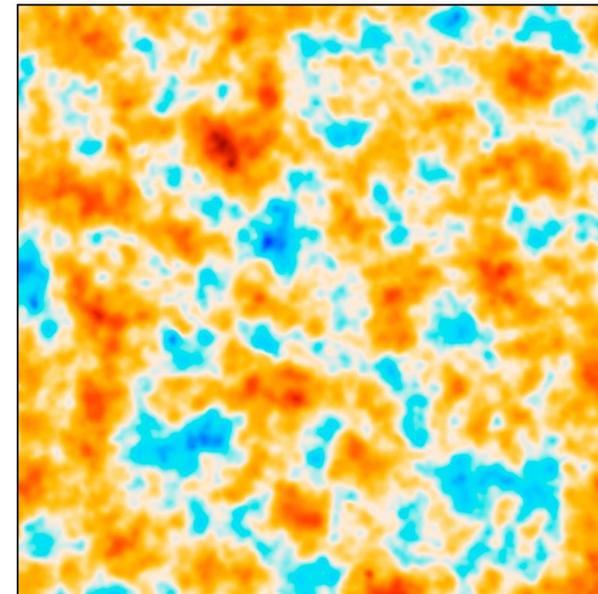
PLANCK (2013): uma observação AINDA mais precisa



COBE
1990



WMAP
2003

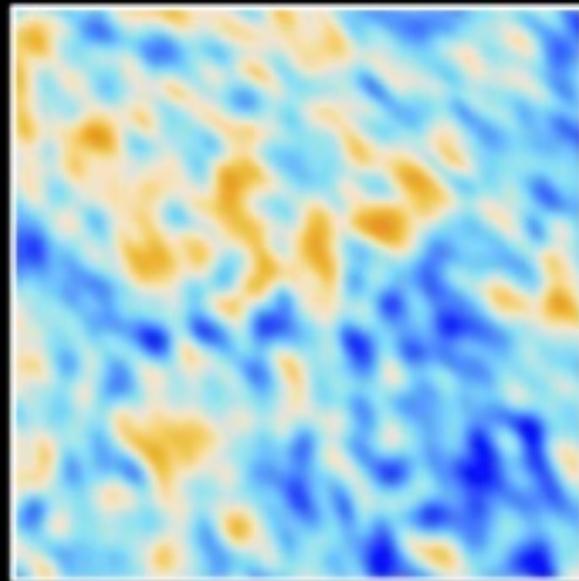
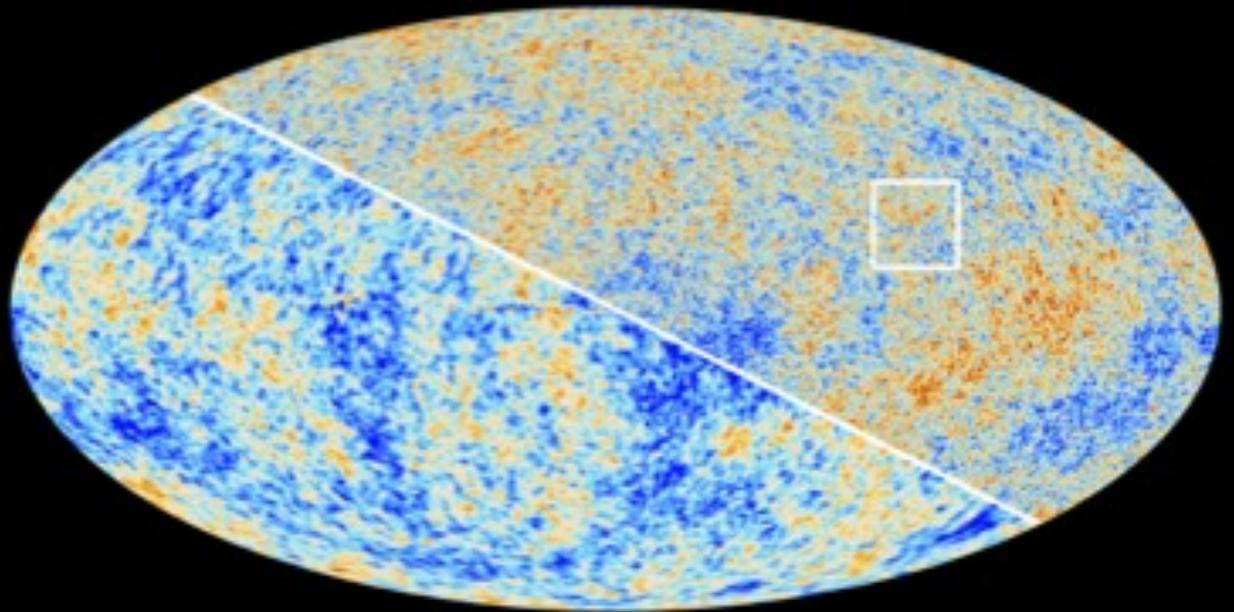


Planck
2013

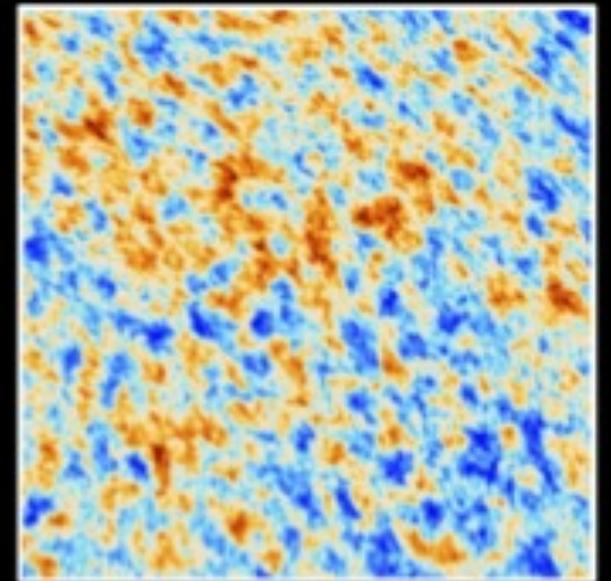
PLANCK (2013):

uma observação
AINDA
mais precisa

The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



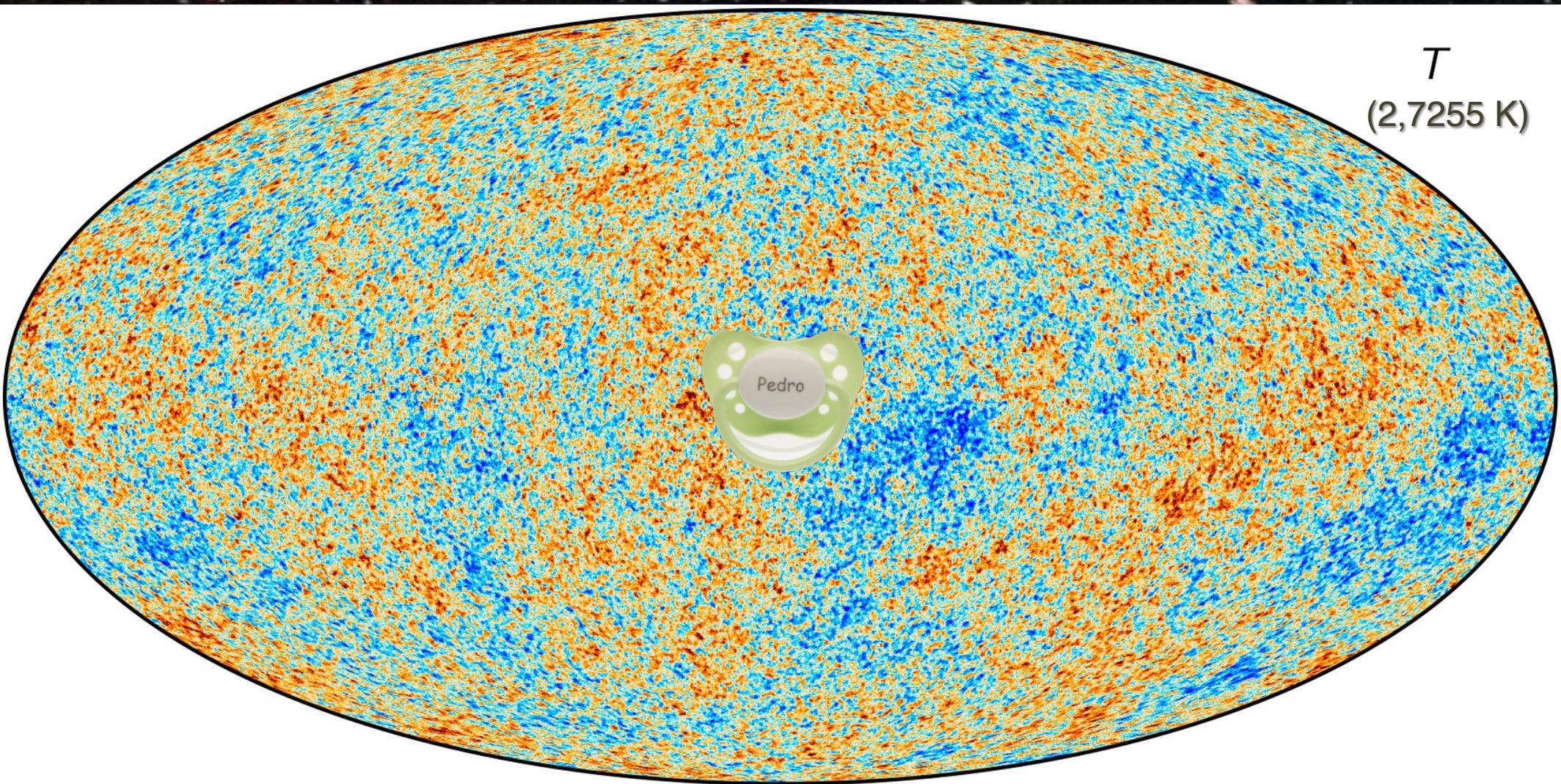
WMAP



Planck

PLANCK (2018)

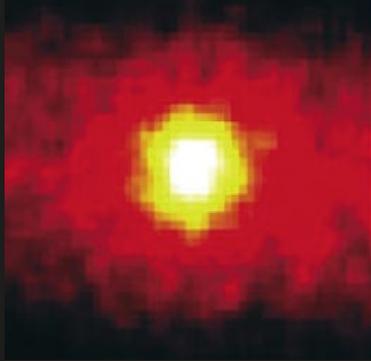
Uma fotografia do Universo bebé
(idade de 380 000 anos)



T
(2,7255 K)



(Sol em) neutrinos



Raios C3smicos de Energia Extrema



O UNIVERSO INVISÍVEL

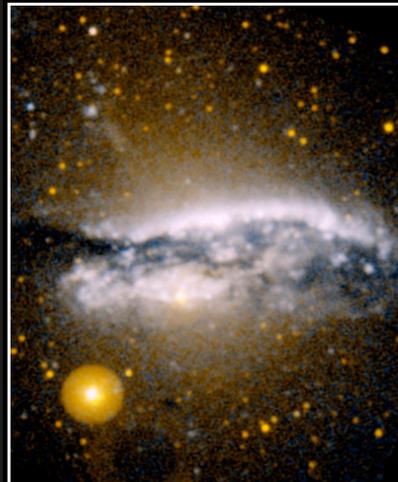
3tico



InfraVerm.



UltraVioleta



Raios-X



Ondas R3dio



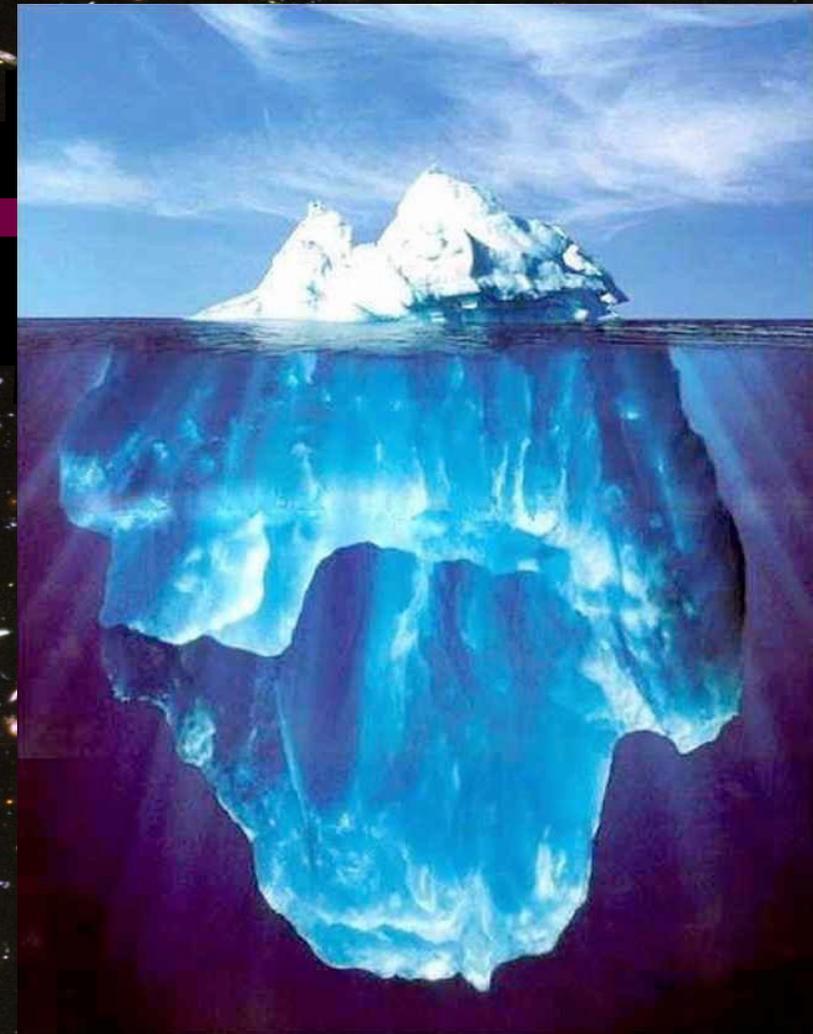
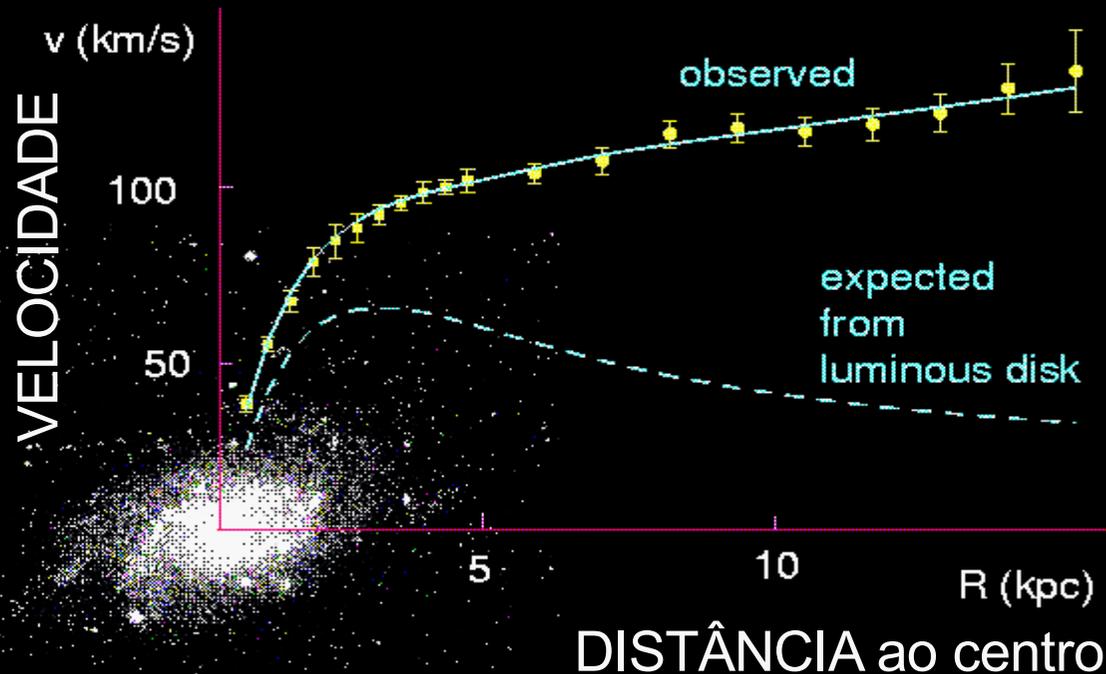
© 2008 3ngel R. L3pez-S3nchez

©2011 Jorge Dias de Deus

pedro abreu – O Lado Escuro do Universo

©2011 Sofia Andringa

A evidência para a Matéria Escura



©A.De Angelis

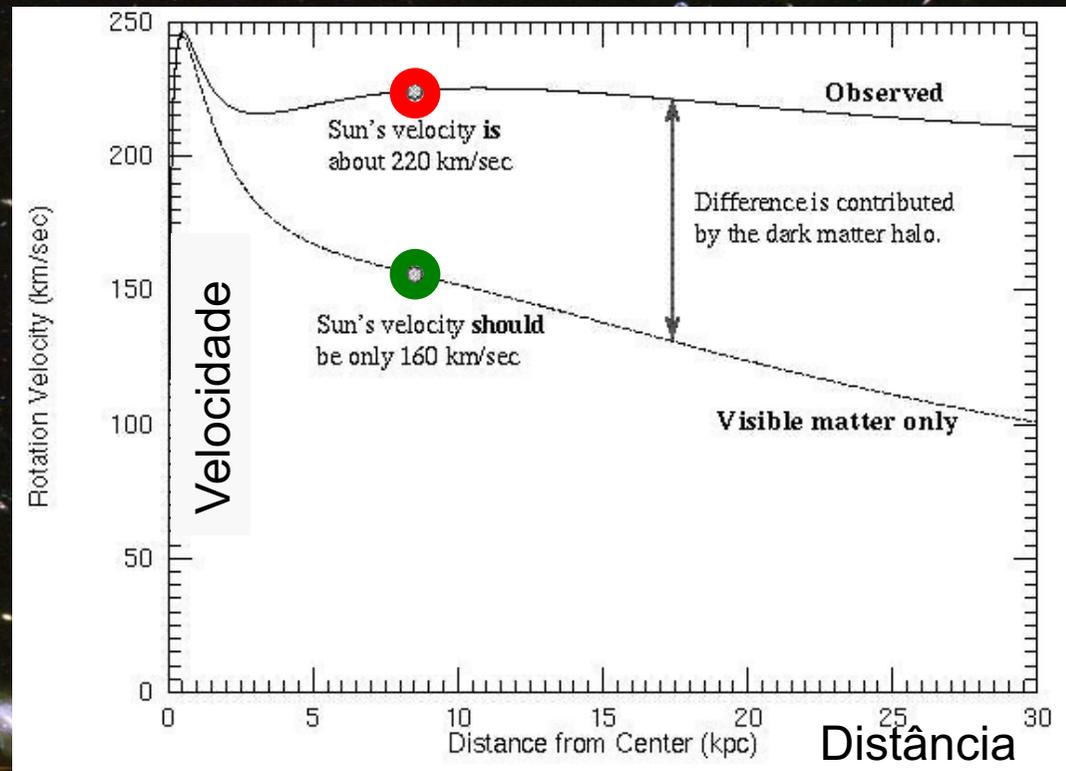
Maior fração de massa não brilha! O que será?!

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

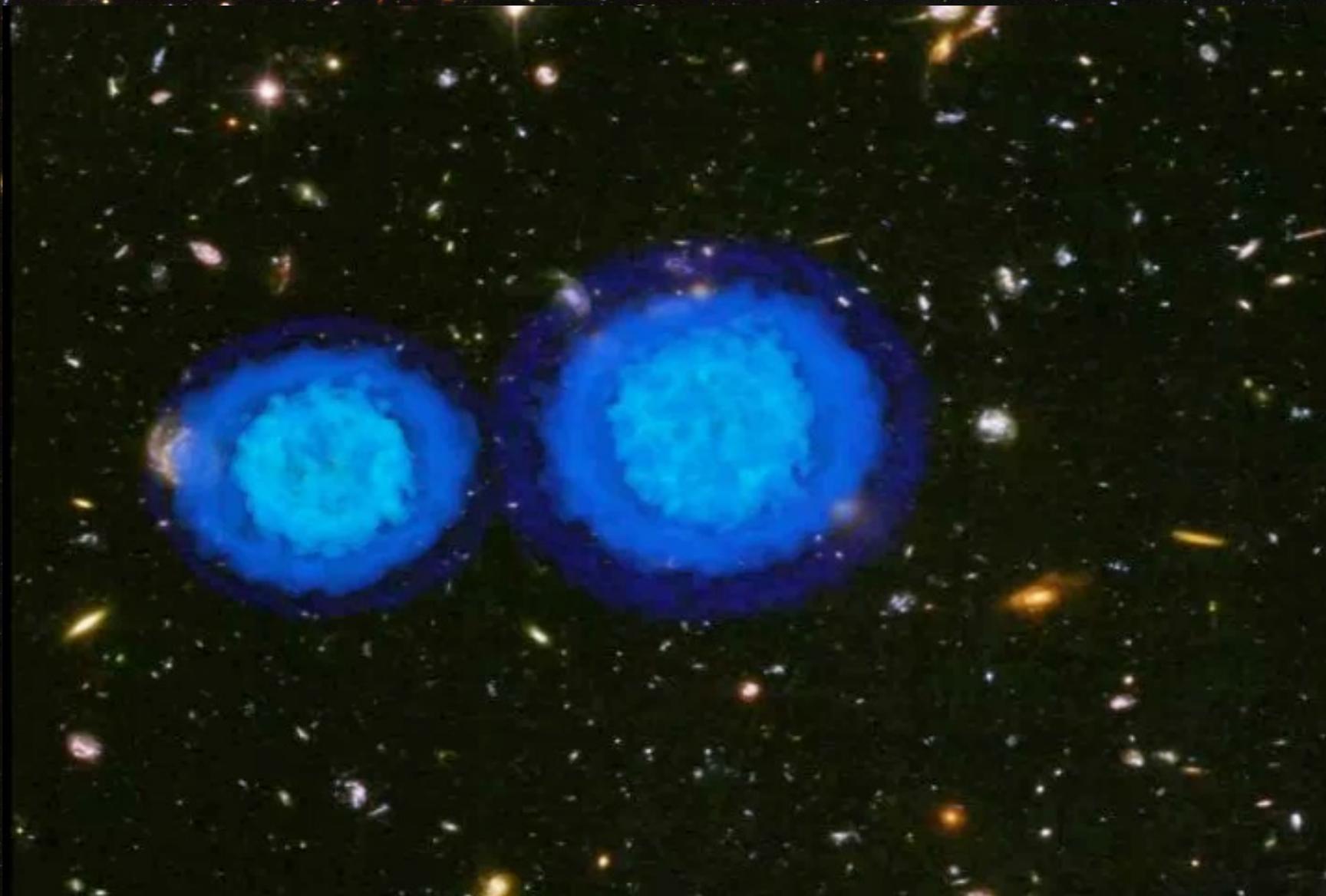
Matéria Escura na Colisão de Aglomerados de Galáxias

© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



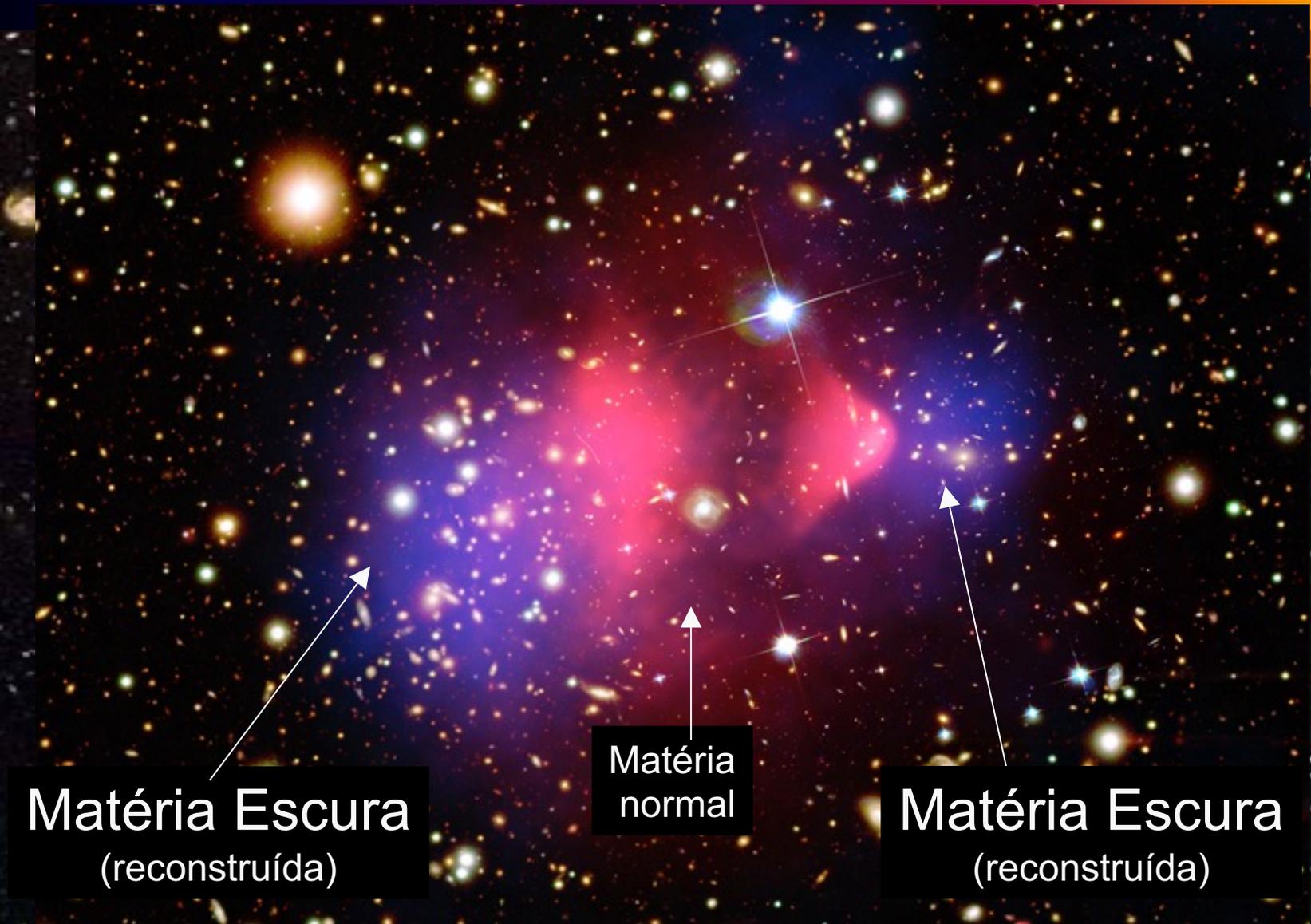
A formação do Bullet Cluster

© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



Matéria Escura na Colisão de Aglomerados de Galáxias

© CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



Matéria Escura
(reconstruída)

Matéria normal

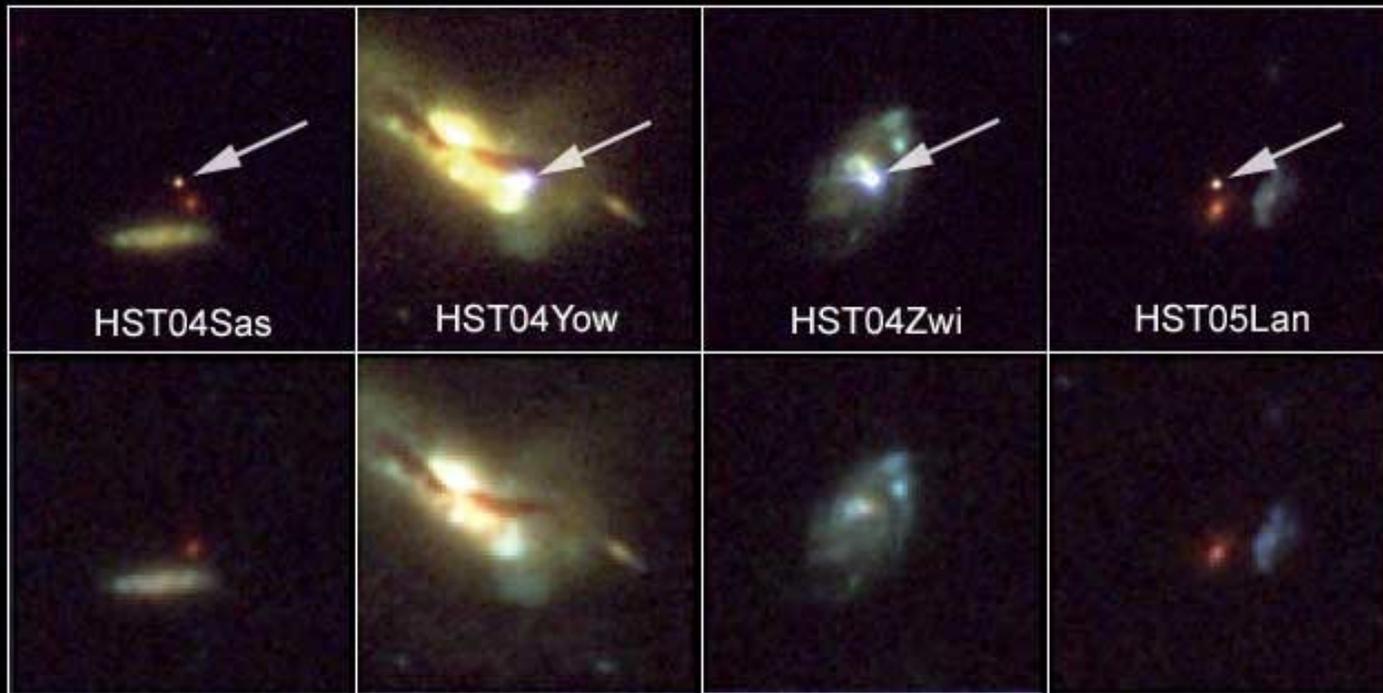
Matéria Escura
(reconstruída)

O Problema da 'Energia Escura'

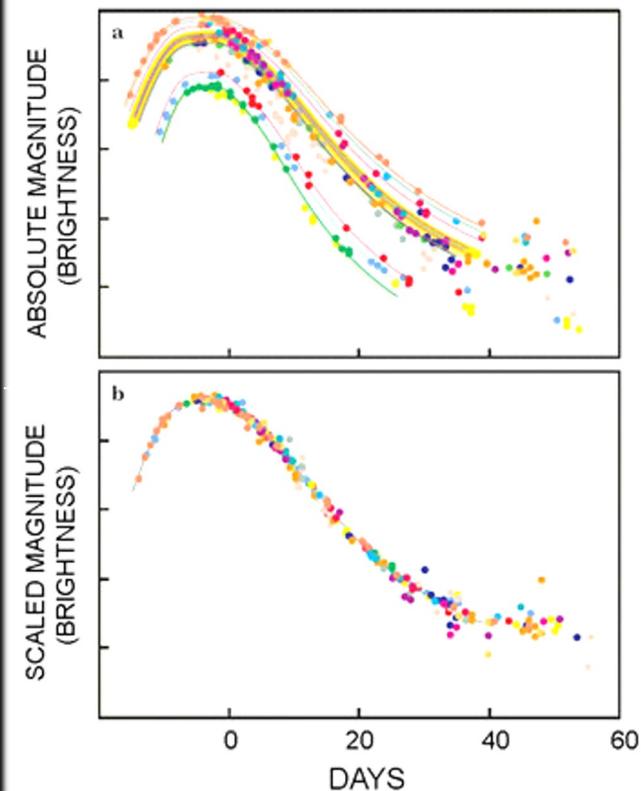
Cientistas estudam supernovae distantes para medir a evolução da expansão do Universo.

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

Host Galaxies of Distant Supernovae Type Ia

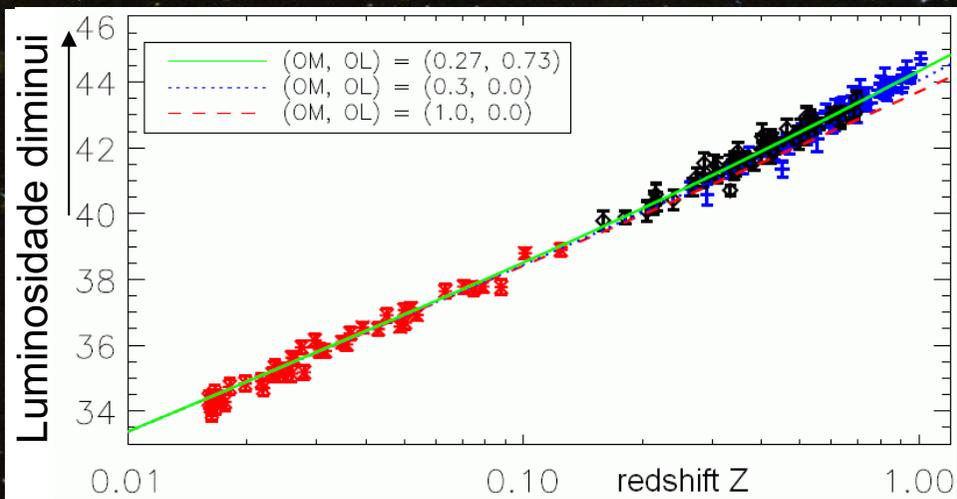


NASA, ESA, and A. Riess (STScI)

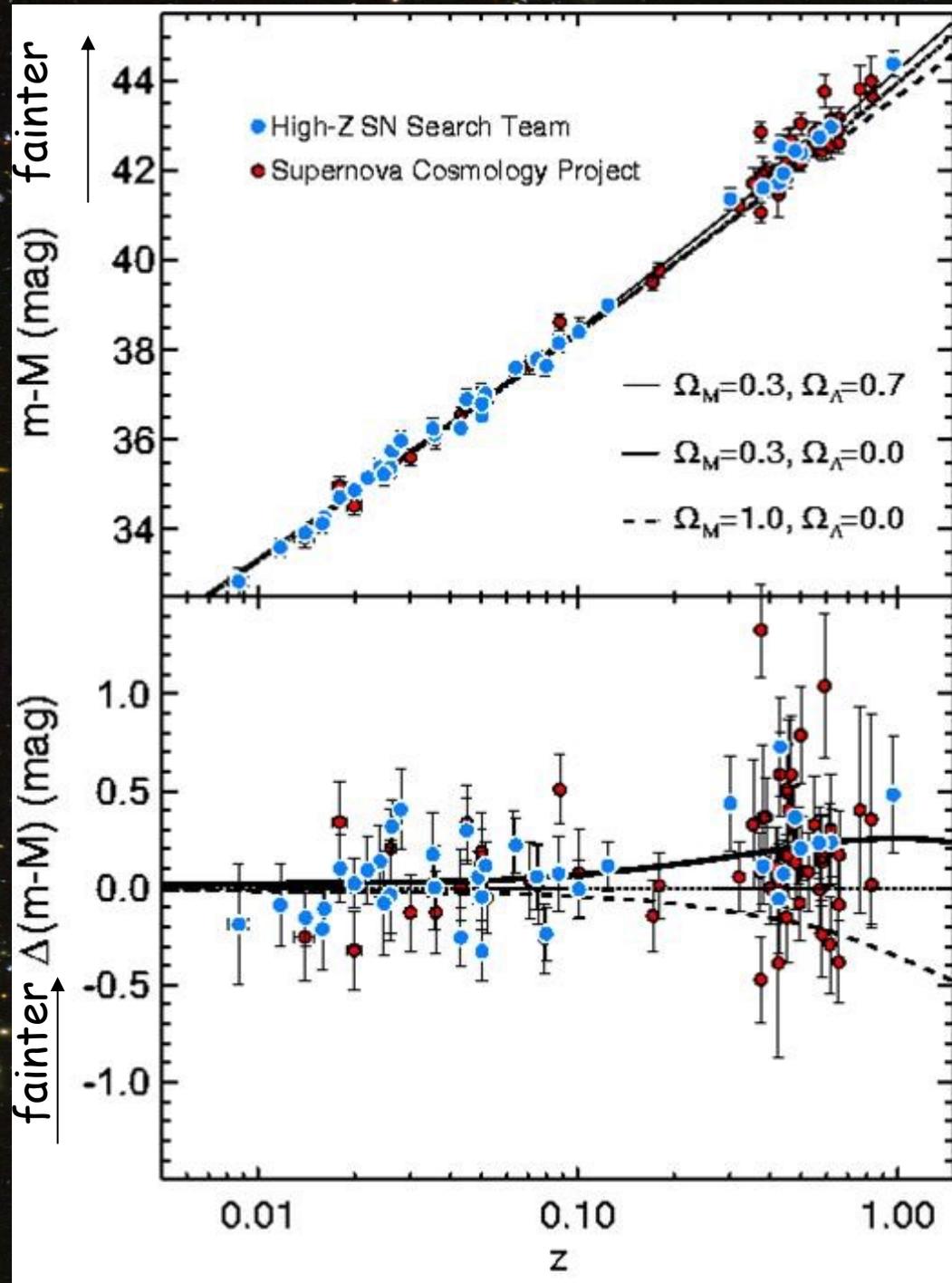
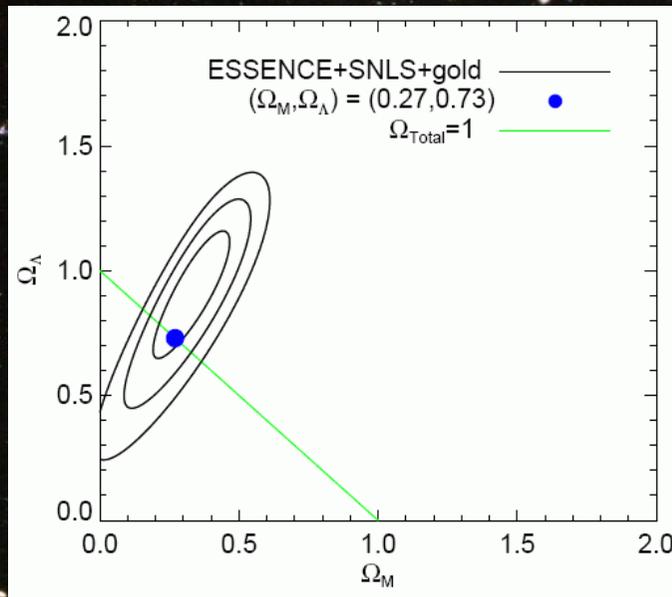


...socorro!!!

E mais recentemente:

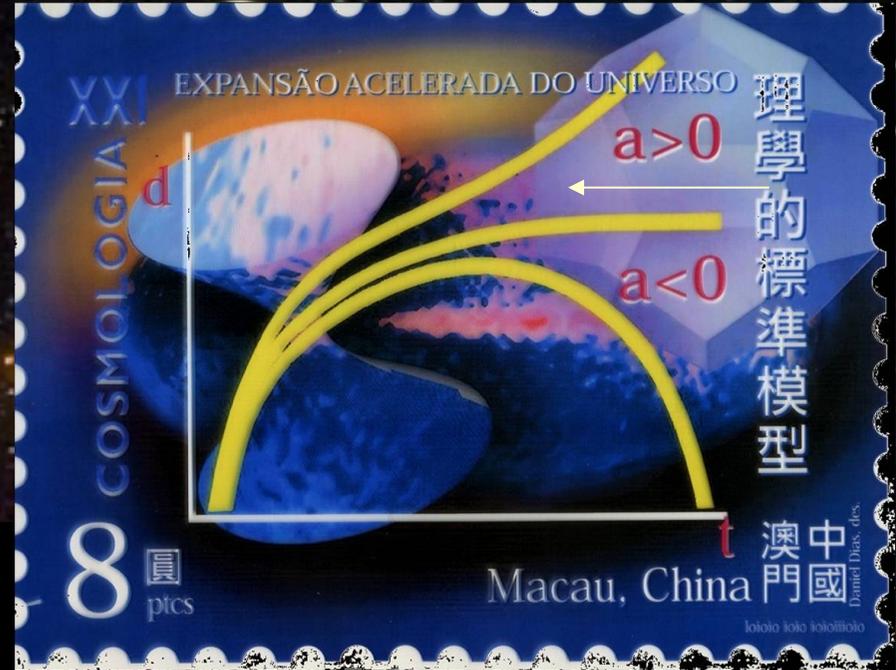


Densidade Não-Matéria
vs.
Densidade Matéria
(Escura + Ordinária)



Oops...não está a diminuir!

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

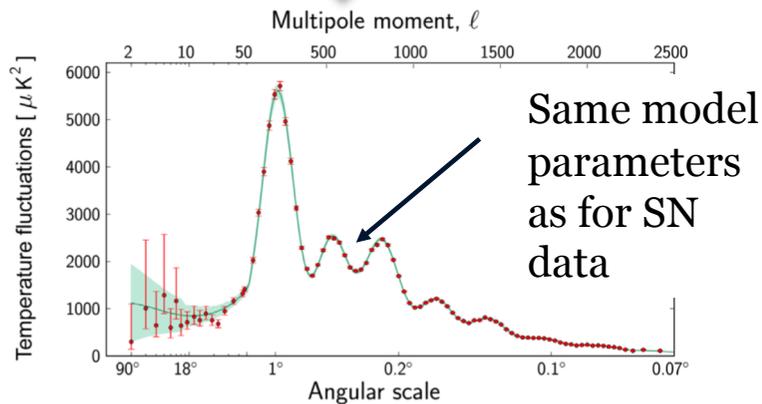
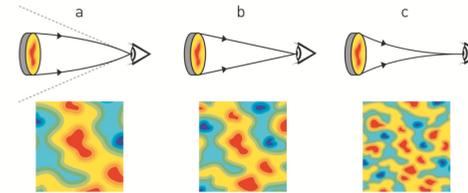
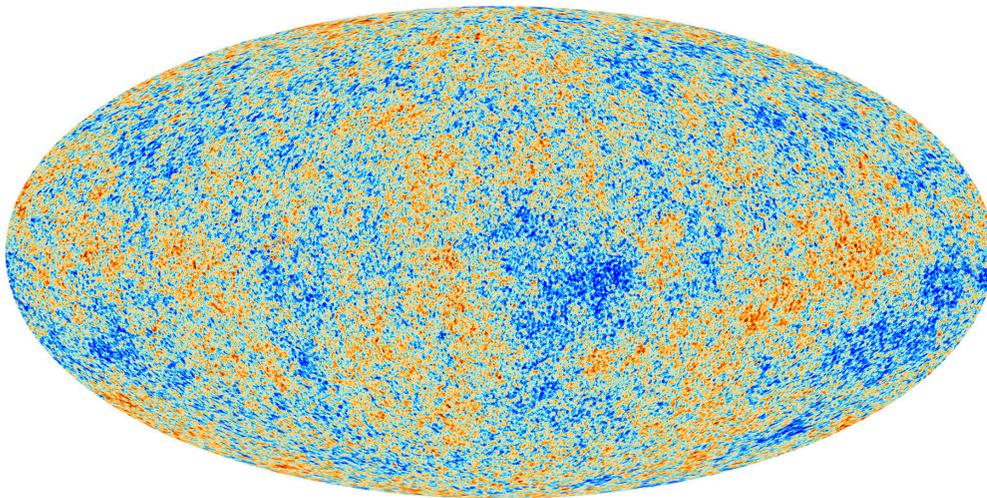


Informação da Radiação Cómica de Fundo



Cosmic Microwave Background

10

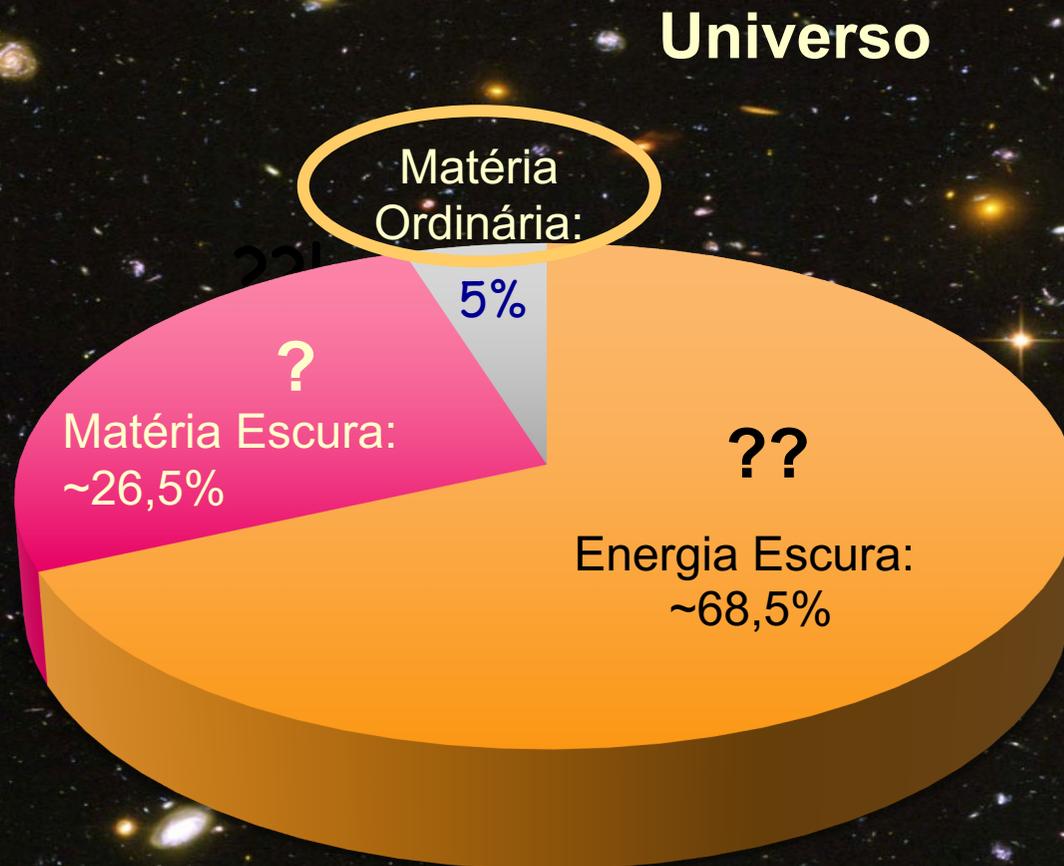


Infer

- 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 Ordinária

©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):

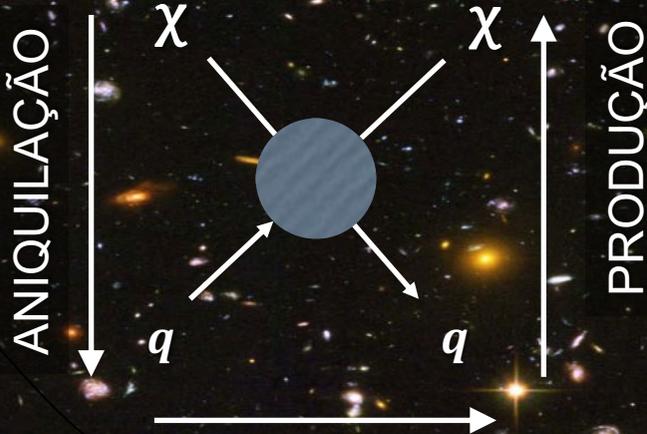
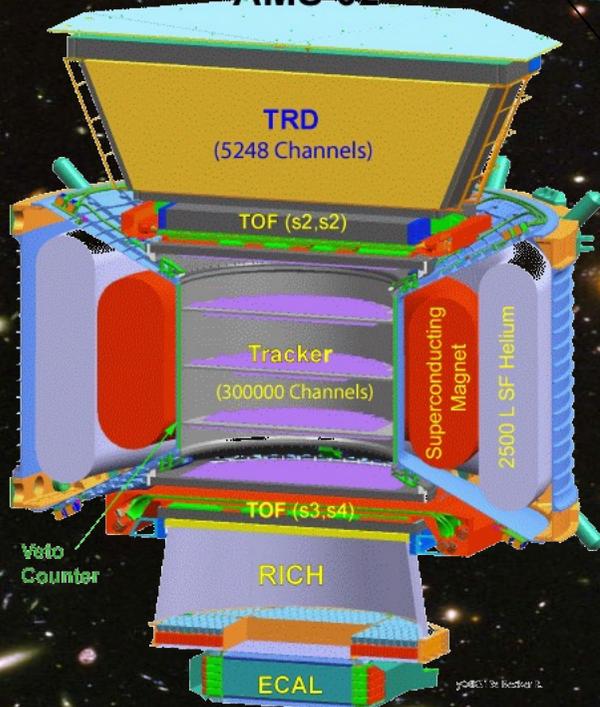
- partícula elementar [χ],
- estável,
- massiva,
- sem carga elétrica e sem interação forte (“côr”),
- com interação fraca (e gravítica),
- produzida em grandes quantidades no Big Bang

À procura de Matéria Escura

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

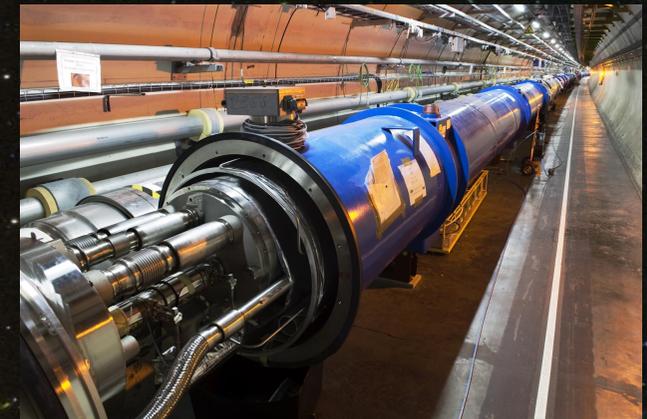
AMS @ ISS

AMS 02



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

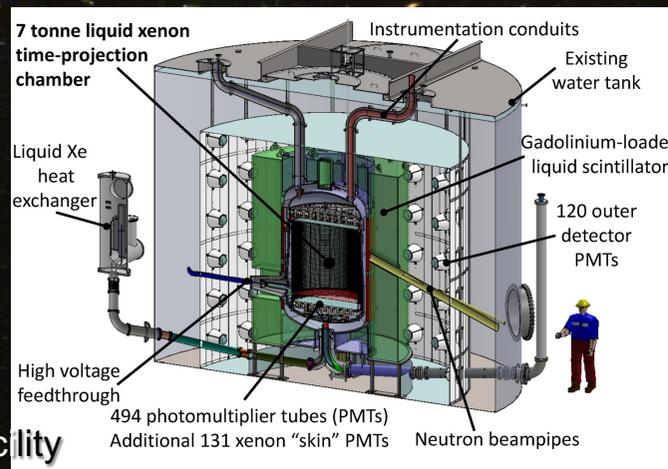
LHC experiments @ CERN



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!”