

Aula I: O modelo cosmológico padrão e suas sondas observacionais

Carlos Bengaly



Um pouco sobre mim...

- **Carlos Bengaly (qq pronome)**: Bacharel em Física (UFRJ, 2011), Mestre em Astronomia (ON-RJ, 2013), Doutorado em Astronomia (ON-RJ, 2016);
- Postdoc na University of the Western Cape, South Africa (2017-2019), Université de Genève (2019-2020), ON-RJ (2020-2025), atuando como pesquisador adjunto (C-II) no ON desde março/2025
- **Interesses**: Cosmologia teórica e observacional, análise de dados e inteligência artificial, Filosofia da cosmologia, diversidade LGBTQIAP+ no campo de exatas no Brasil etc.

Lattes <http://lattes.cnpq.br/6562331419311591>

Inspire <https://inspirehep.net/authors/1703361>



<https://orcid.org/0000-0001-5731-3348>



Cronograma das aulas

- **Aula 1:** O modelo cosmológico padrão e suas sondas observacionais
- **Aula 2:** Hipóteses fundamentais do modelo cosmológico padrão
- **Aula 3:** Testes observacionais do Princípio Cosmológico (e do modelo cosmológico padrão)

Aula I: O modelo cosmológico padrão e suas sondas observacionais

Resumo

- O modelo cosmológico padrão (MCP)
 - Cosmologia - o que é, o que come, o que faz?
 - qual é o modelo cosmológico padrão hoje?
 - o modelo Λ CDM

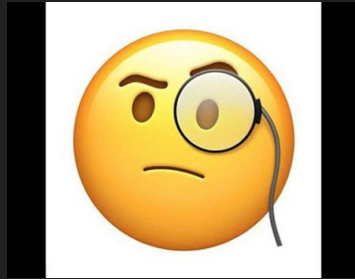
Resumo

- O modelo cosmológico padrão (MCP)
 - Cosmologia - o que é, o que come, o que faz?
 - qual é o modelo cosmológico padrão hoje?
 - o modelo Λ CDM
- Sondas observacionais do MCP: como medimos o Universo
 - Supernovas do tipo Ia (SNs)
 - Radiação cósmica de fundo (RCF)
 - Estrutura em grande escala cosmológica (EGE)
 - Idade diferencial de galáxias

Resumo

- O modelo cosmológico padrão (MCP)
 - Cosmologia - o que é, o que come, o que faz?
 - qual é o modelo cosmológico padrão hoje?
 - o modelo Λ CDM
- Sondas observacionais do MCP: como medimos o Universo
 - Supernovas do tipo Ia (SNs)
 - Radiação cósmica de fundo (RCF)
 - Estrutura em grande escala cosmológica (EGE)
 - Idade diferencial de galáxias
- Problemas no paraíso: tensões existentes no modelo cosmológico padrão

Cosmologia: o que é, o que come, onde vive?



O que é Cosmologia?

- **Cosmologia: o estudo do Universo como um todo**
Tentamos resolver as seguintes questões:
 - Como é o “nascimento” do Universo?
 - Como o Universo evolui, e como vai parecer no futuro?
 - do que o Universo é feito?

O que é Cosmologia?

- **Cosmologia: o estudo do Universo como um todo**

Tentamos resolver as seguintes questões:

- Como é o “nascimento” do Universo?
- Como o Universo evolui, e como vai parecer no futuro?
- do que o Universo é feito?

- **Ligações com a Astronomia, Física e Filosofia**

- **Astronomia:** o estudo de corpos celestiais (“blocos fundamentais” do Universo)
- **Física:** as leis que governam o Universo no passado, presente e futuro
- **Filosofia:** como “conceber” o Universo

O que é Cosmologia?

- 4 interações fundamentais: força gravitacional (?), eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca

O que é Cosmologia?

- 4 interações fundamentais: força gravitacional (?), eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca

O que é Cosmologia?

- 4 interações fundamentais: força gravitacional (?), eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca

Nota: do ponto de vista da teoria da relatividade, gravidade não é uma força (visão newtoniana), e sim a distorção da geometria do espaço tempo!

O que é Cosmologia?

- 4 interações fundamentais: **força gravitacional (?)**, **eletromagnética**, nuclear forte e nuclear fraca
Nota: do ponto de vista da teoria da relatividade, **gravidade não é uma força (visão newtoniana)**, e sim a **distorção da geometria do espaço tempo!**
- Definições da Cosmologia segundo alguns autores:
 - **John Peacock**: extrapolação das leis da gravitação para escalas cosmológicas
 - **K. Raychaudhuri**: "Cosmologia é a ciência do cosmo — da ordem que existe no Universo em larga escala."

O que é Cosmologia?

- 4 interações fundamentais: força gravitacional (?), eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca

Nota: do ponto de vista da teoria da relatividade, gravidade não é uma força (visão newtoniana), e sim a distorção da geometria do espaço tempo!

- Definições da Cosmologia segundo alguns autores:

- P. J. E. Peebles (nobel de Física em 2019):

“A cosmologia física é a tentativa de dar sentido à natureza de larga escala do mundo material que nos rodeia, utilizando os métodos das ciências naturais... Na física, encontramos a tradição mais antiga e honrosa, que busca entender de onde o mundo vem, para onde vai e por quê. A cosmologia herda essa tradição, em parte por desígnio, e em grande parte porque é para aí que a astronomia e a física a conduziram”

História da Cosmologia relativística

- 1915: Teoria da Relatividade Geral (Albert Einstein)
- 1917: Primeiro modelo cosmológico relativístico, proposto por Einstein: Universo estático, plano, constituído apenas de matéria + constante cosmológica λ
- 1922: Universo dinâmico mesmo constituído apenas por matéria (Friedman)
- 1929: Hubble mede o afastamento das galáxias, algo depois interpretado como resultado da expansão cosmológica - Lei de Hubble-Lemaître.
- 1965: Detecção da radiação cósmica de fundo (RCF) em micro-ondas (Penzias e Wilson)
- 1990: Medidas das flutuações de temperatura da RCF pelo satélite COBE, e de seu espectro de corpo negro pelo COBE/FIRAS
- 1998: Detecção da aceleração cosmológica por Supernovas do tipo Ia
- 2003: WMAP aprimorou medidas das flutuações de temperatura da RCF
- 2013: Planck aprimorou medidas do WMAP
- 2016: detecção de ondas gravitacionais
- 2017: primeiro sinal de OG medido com sua contraparte eletromagnética
- 2019: primeira “foto” de um buraco negro
- 2023: detecção do fundo estocástico de ondas gravitacionais

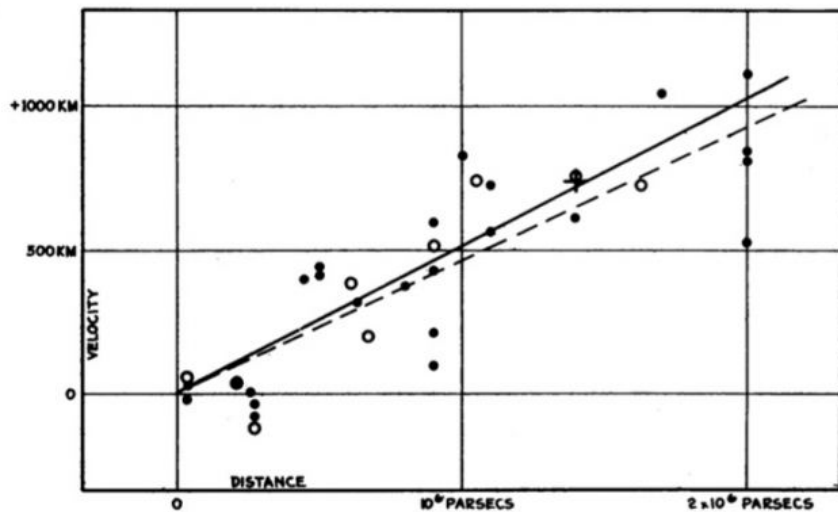
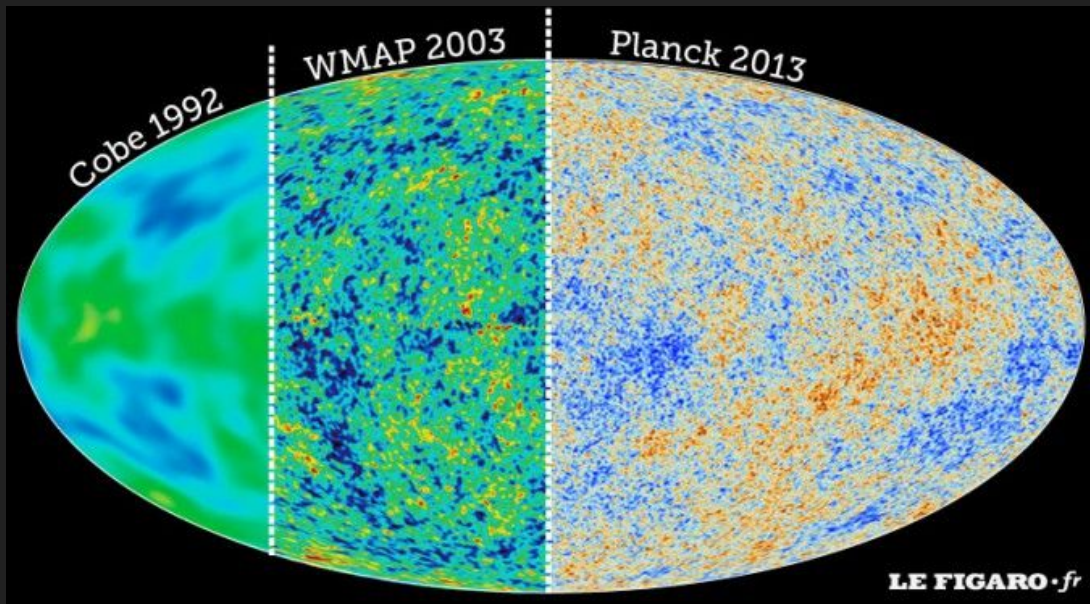


FIGURE 1

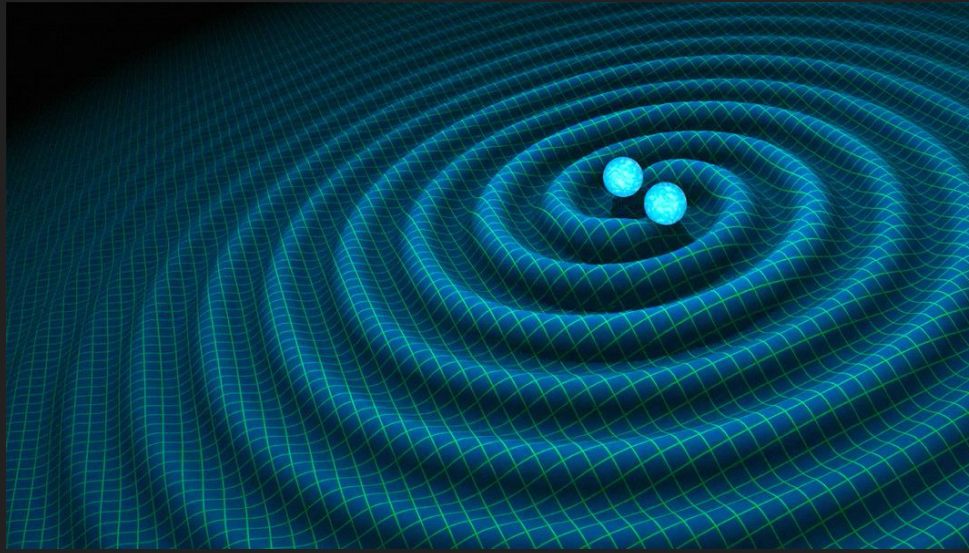
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Edwin Hubble (direita), e a relação entre a velocidade de recessão de galáxias vs suas distâncias até nós (acima)

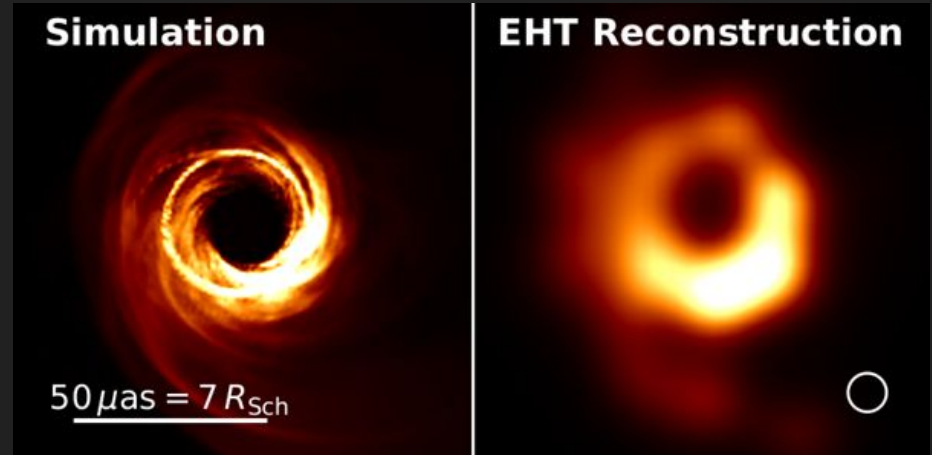




Penzias e Wilson (esquerda), e comparação entre mapas da RCF COBE x WMAP x Planck (créditos: Jean-Pierre Luminet)



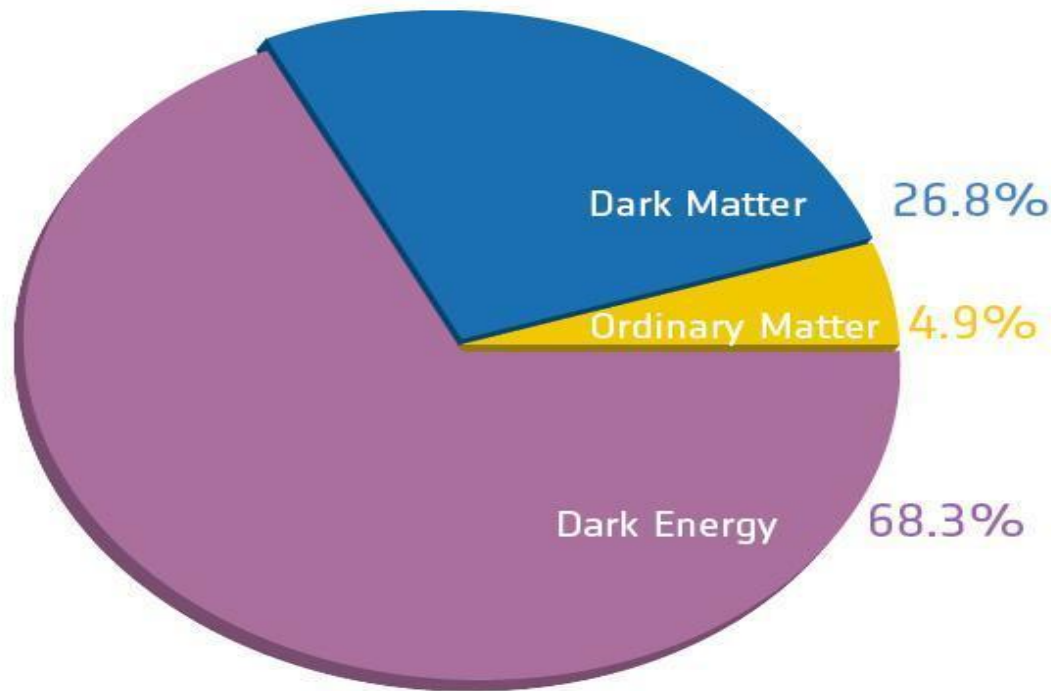
Simulação de um evento de ondas gravitacionais (esquerda), e comparação entre as simulações do buraco negro supermassivo em M87 versus observações (abaixo; créditos: Andrew Chael)



O modelo cosmológico padrão (hoje em dia)

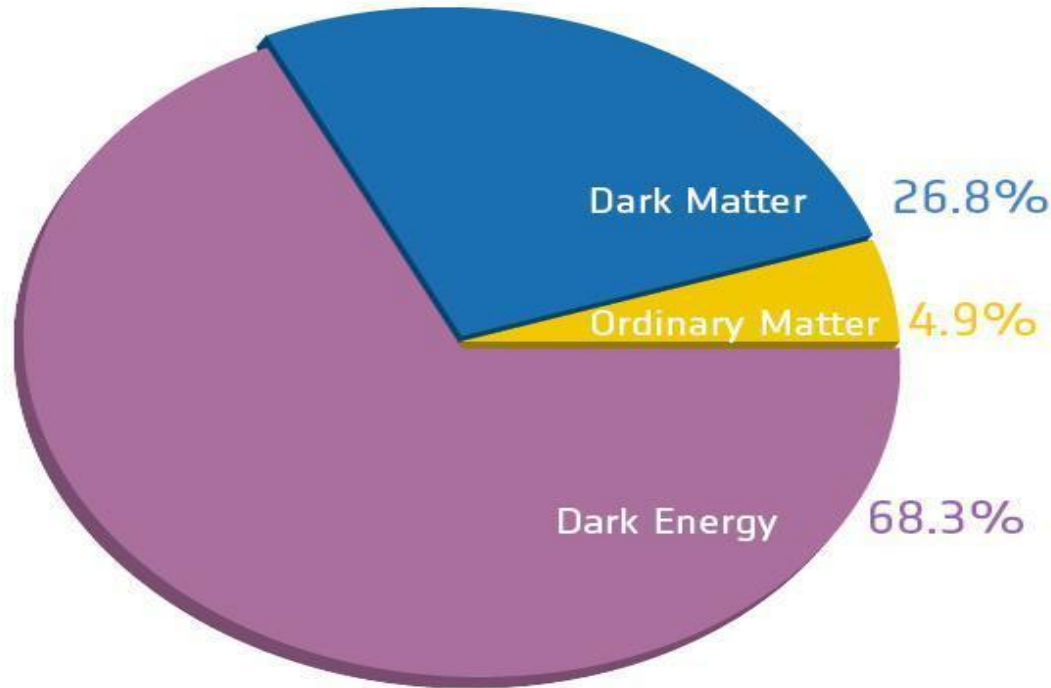
O modelo cosmológico padrão (hoje em dia)

Crédito:
Colaboração Planck



O modelo cosmológico padrão (hoje em dia)

Crédito:
Colaboração Planck

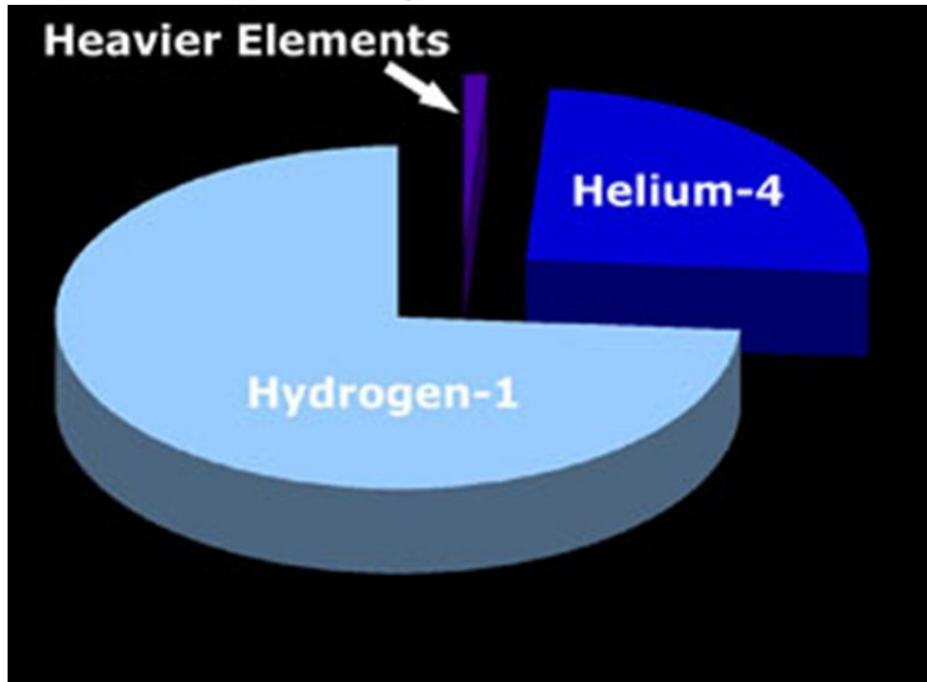


O que é matéria
escura?

O que é energia
escura?

O modelo cosmológico padrão (hoje em dia)

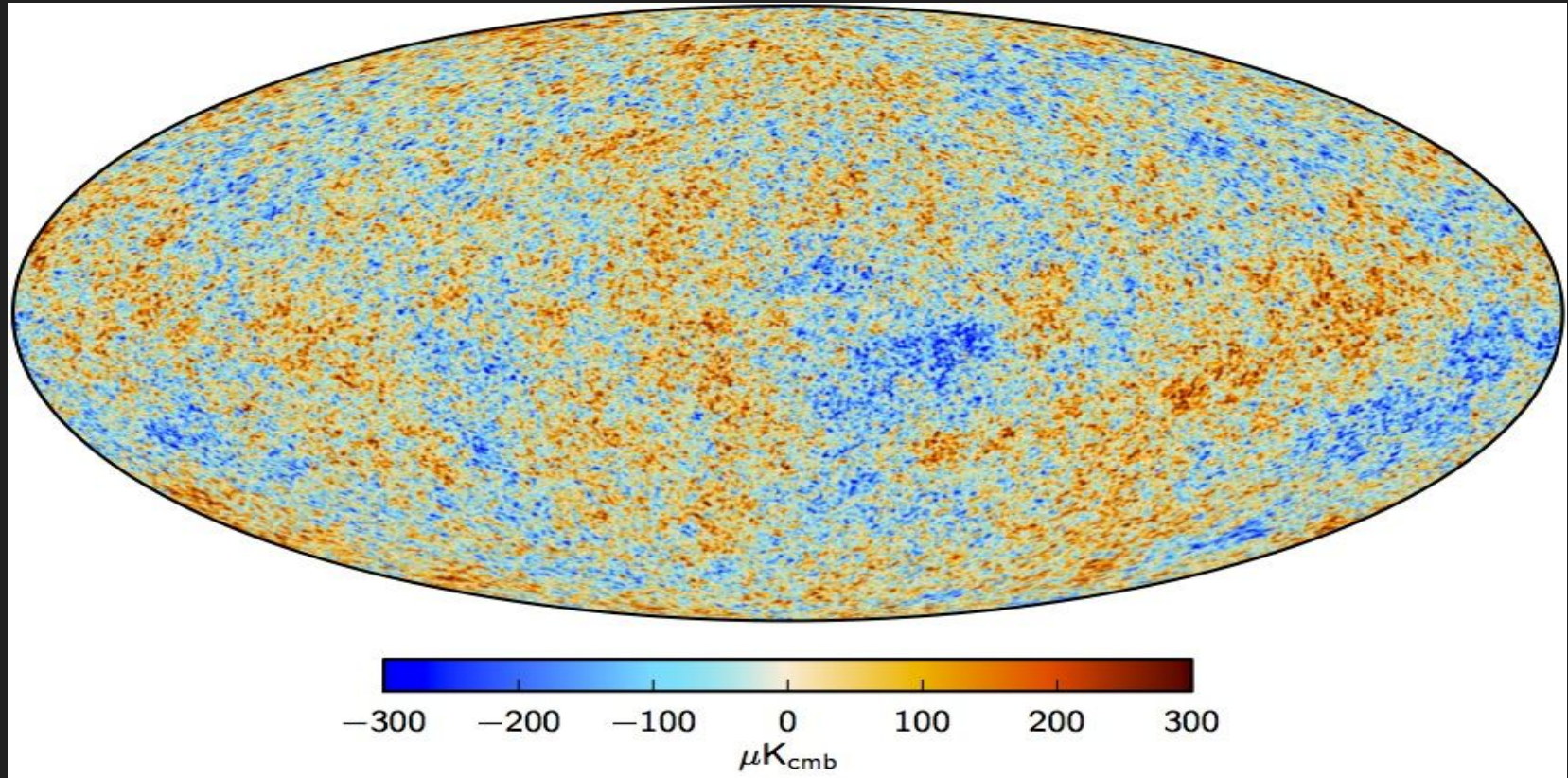
Elemental Composition of Universe



Fonte:

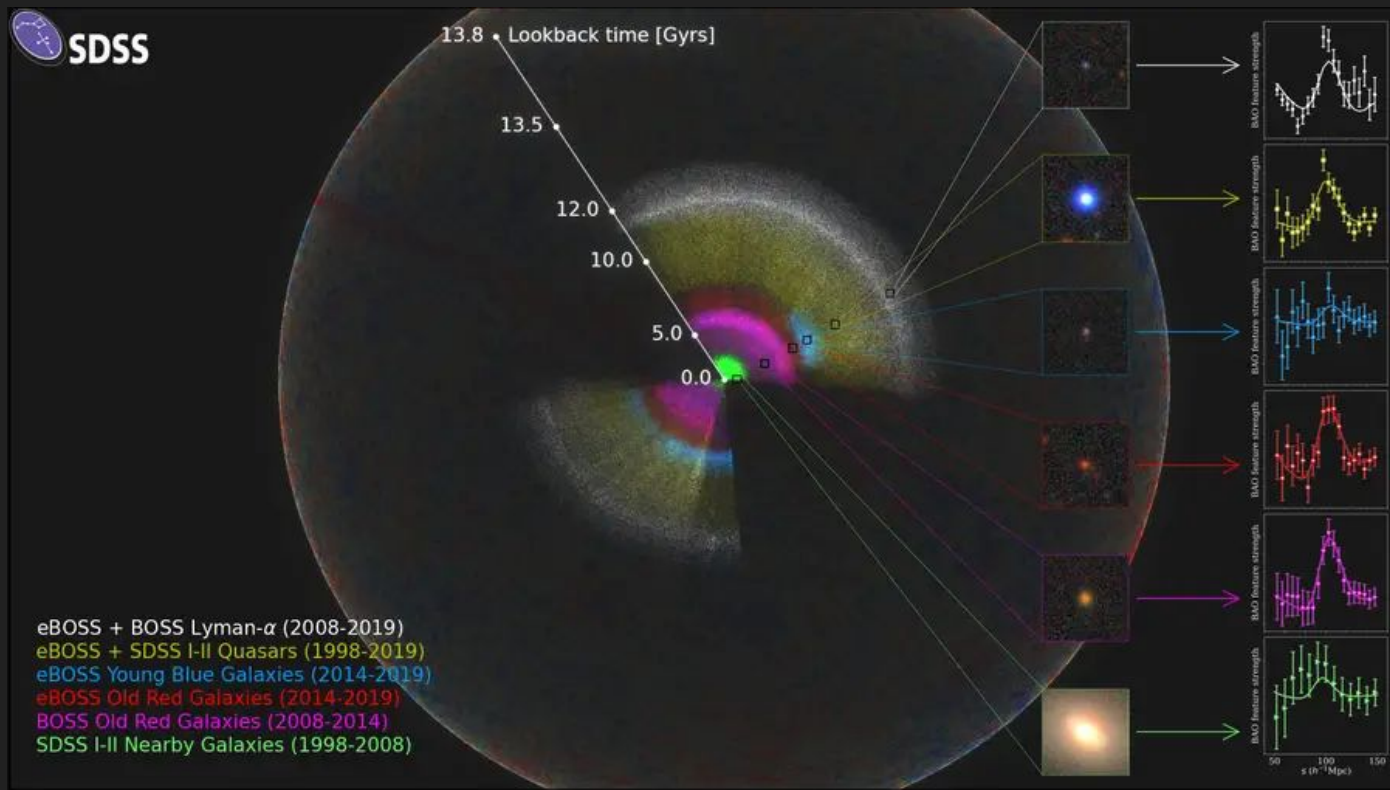
https://universeadventure.org/big_bang/element-composition.htm

A radiação cósmica de fundo (RCF)



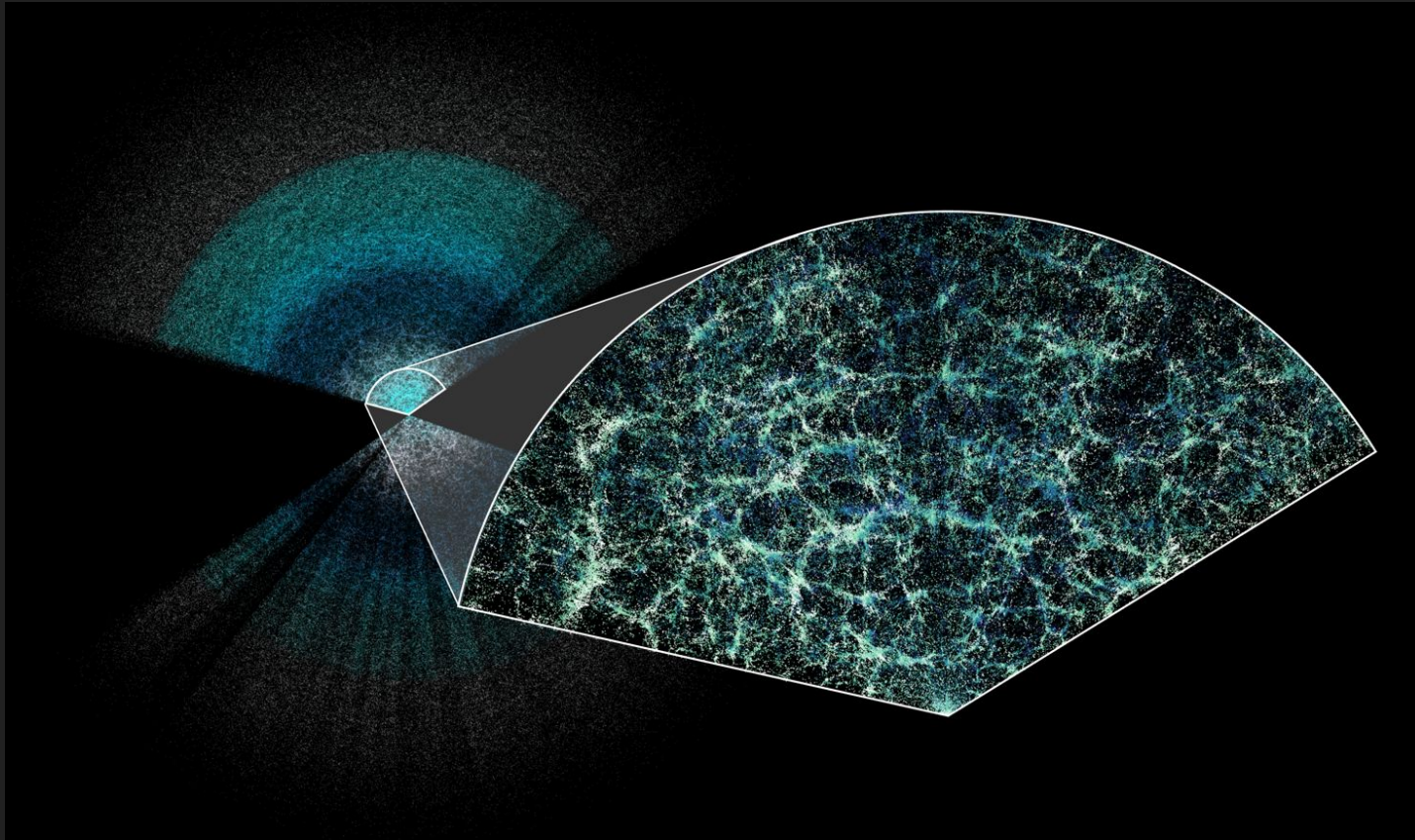
Credits: Planck Collaboration

Distribuição espacial de galáxias da estrutura em grande escala (EGE) do Universo



Créditos:
Anand
Raichoor/EPFL,
Ashley
Ross/Ohio
State
University, and
the SDSS
Collaboration

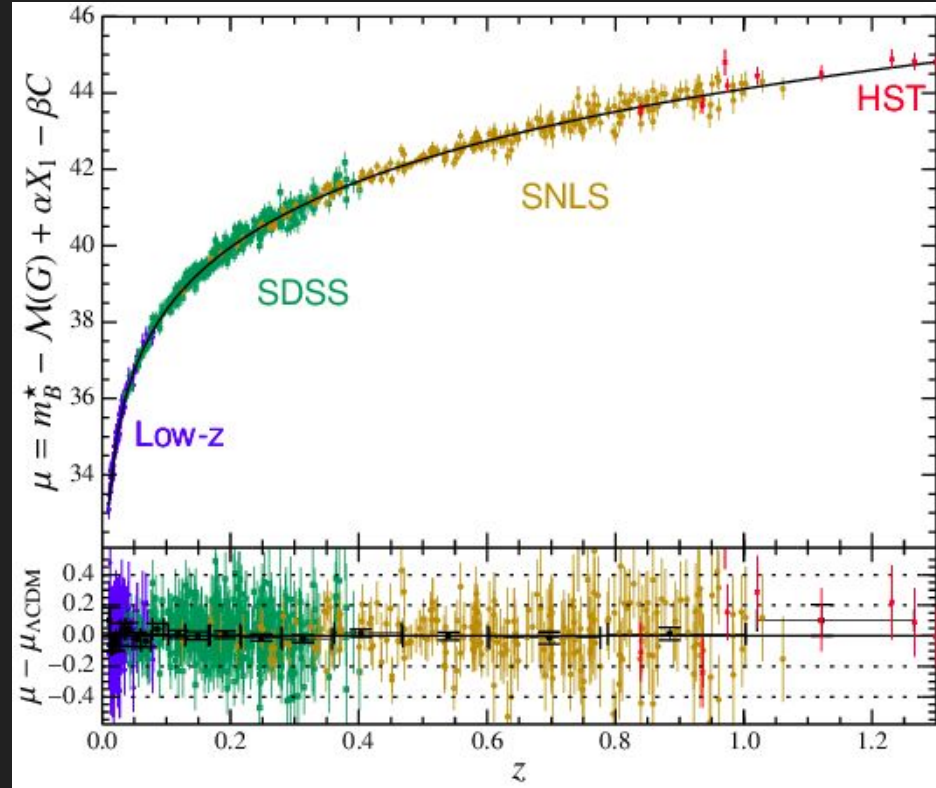
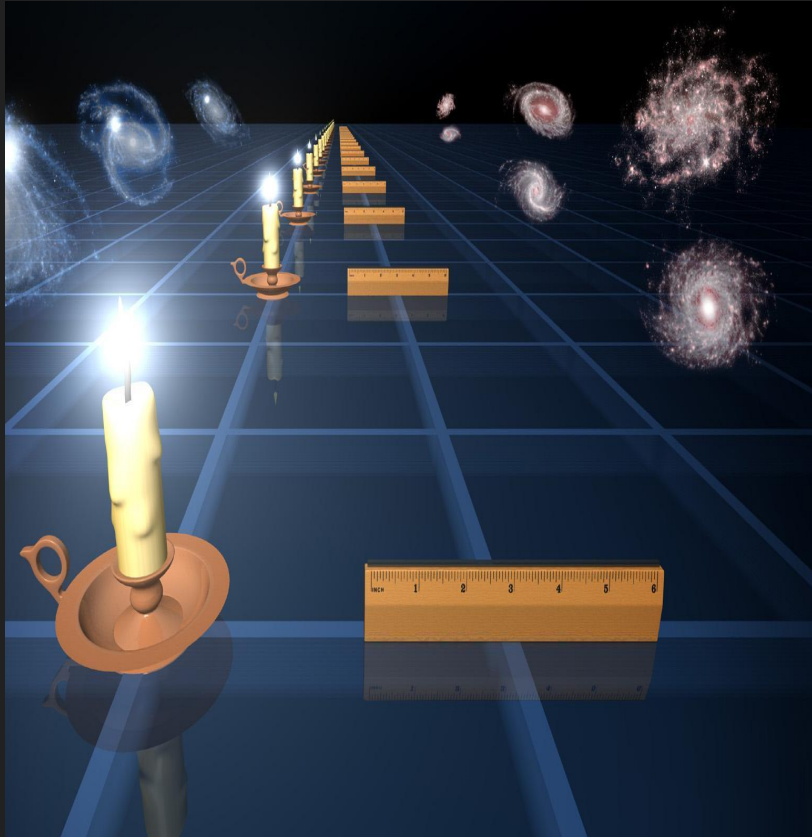
Distribuição espacial de galáxias da estrutura em grande escala (EGE) do Universo



Créditos:

Claire
Lamman/DESI
collaboration;
custom
colormap
package by
cmastro.

Distâncias de Supernovas do tipo Ia (SNs)



O que é, afinal, o modelo Λ CDM?

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Matéria escura fria:

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Matéria escura fria:
 - interage gravitacionalmente, sem interação eletromagnética ou de qualquer outro tipo

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Matéria escura fria:
 - interage gravitacionalmente, sem interação eletromagnética ou de qualquer outro tipo
 - não é vista diretamente, apenas pelo desvio da luz através de sua presença - fenômeno de lentes gravitacionais

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Matéria escura fria:
 - interage gravitacionalmente, sem interação eletromagnética ou de qualquer outro tipo
 - não é vista diretamente, apenas pelo desvio da luz através de sua presença - fenômeno de lentes gravitacionais
 - Necessária para explicar a curva de rotação das galáxias espirais, bem como a estrutura em grande escala cosmológica

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Matéria escura fria:
 - interage gravitacionalmente, sem interação eletromagnética ou de qualquer outro tipo
 - não é vista diretamente, apenas pelo desvio da luz através de sua presença - fenômeno de lentes gravitacionais
 - Necessária para explicar a curva de rotação das galáxias espirais, bem como a estrutura em grande escala cosmológica
 - principais candidatos: partículas chamadas WIMP (weakly interacting massive particles) e áxions – ainda não detectadas!

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Matéria escura fria:
 - interage gravitacionalmente, sem interação eletromagnética ou de qualquer outro tipo
 - não é vista diretamente, apenas pelo desvio da luz através de sua presença - fenômeno de lentes gravitacionais
 - Necessária para explicar a curva de rotação das galáxias espirais, bem como a estrutura em grande escala cosmológica
 - principais candidatos: partículas chamadas WIMP (weakly interacting massive particles) e áxions – ainda não detectadas!
 - partículas como neutrinos (matéria escura quente, relativística), além de propostas alternativas como Mond (lei de newton modificada) e MACHOs (objetos compactos massivos) descartados!

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:
 - uma forma de energia exótica, com equação de estado negativa $P = w\rho$, $w < 0$

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:
 - uma forma de energia exótica, com equação de estado negativa $P = wp$, $w < 0$
 - fluido do tipo perfeito

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:
 - uma forma de energia exótica, com equação de estado negativa $P = wp$, $w < 0$
 - fluido do tipo perfeito
 - domina o Universo nos últimos 3-4 bilhões de anos -- por que só agora?? Problema da coincidência cósmica!

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:
 - uma forma de energia exótica, com equação de estado negativa $P = wp$, $w < 0$
 - fluido do tipo perfeito
 - domina o Universo nos últimos 3-4 bilhões de anos -- por que só agora?? Problema da coincidência cósmica!
 - Melhor candidata hoje: Constante Cosmológica Λ , com equação de estado $w=-1$

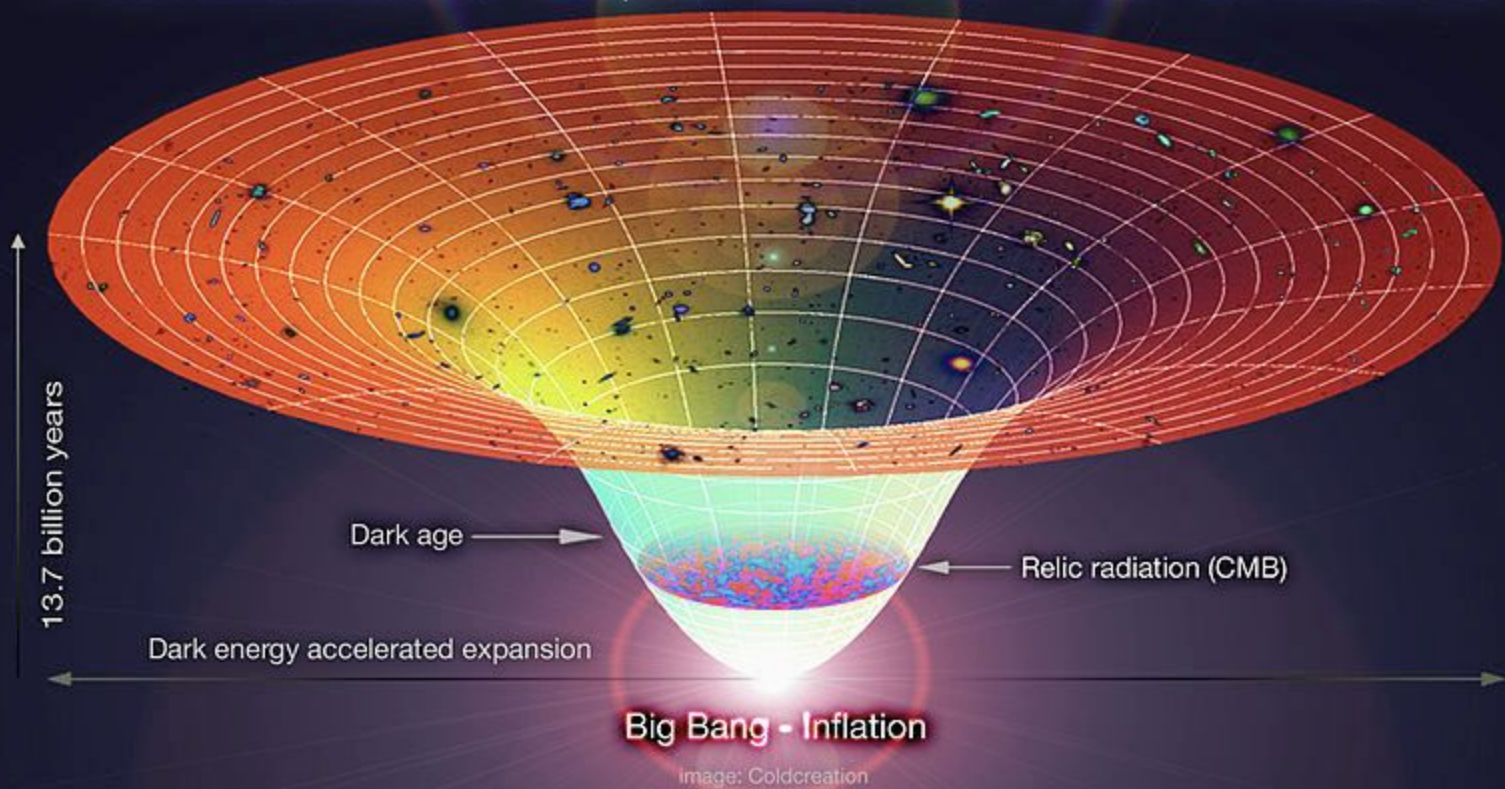
O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:
 - uma forma de energia exótica, com equação de estado negativa $P = wp$, $w < 0$
 - fluido do tipo perfeito
 - domina o Universo nos últimos 3-4 bilhões de anos -- por que só agora?? Problema da coincidência cósmica!
 - Melhor candidata hoje: Constante Cosmológica Λ , com equação de estado $w=-1$
 - Λ associada à densidade de energia do vácuo; Contudo, se Λ = vácuo, temos 120 ordens de grandeza de diferença entre as observações cosmológicas e a previsão da teoria quântica de campos

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Energia escura:
 - uma forma de energia exótica, com equação de estado negativa $P = wp$, $w < 0$
 - fluido do tipo perfeito
 - domina o Universo nos últimos 3-4 bilhões de anos -- por que só agora?? Problema da coincidência cósmica!
 - Melhor candidata hoje: Constante Cosmológica Λ , com equação de estado $w=-1$
 - Λ associada à densidade de energia do vácuo. Contudo, se Λ = vácuo, temos 120 ordens de grandeza de diferença entre as observações cosmológicas e a previsão da teoria quântica de campos
 - principais alternativas a Λ : quintessência, energia escura dinâmica, modelos de gravidade modificada

Accelerated Expansion of the Universe



O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Inflação (?):

O modelo Λ CDM

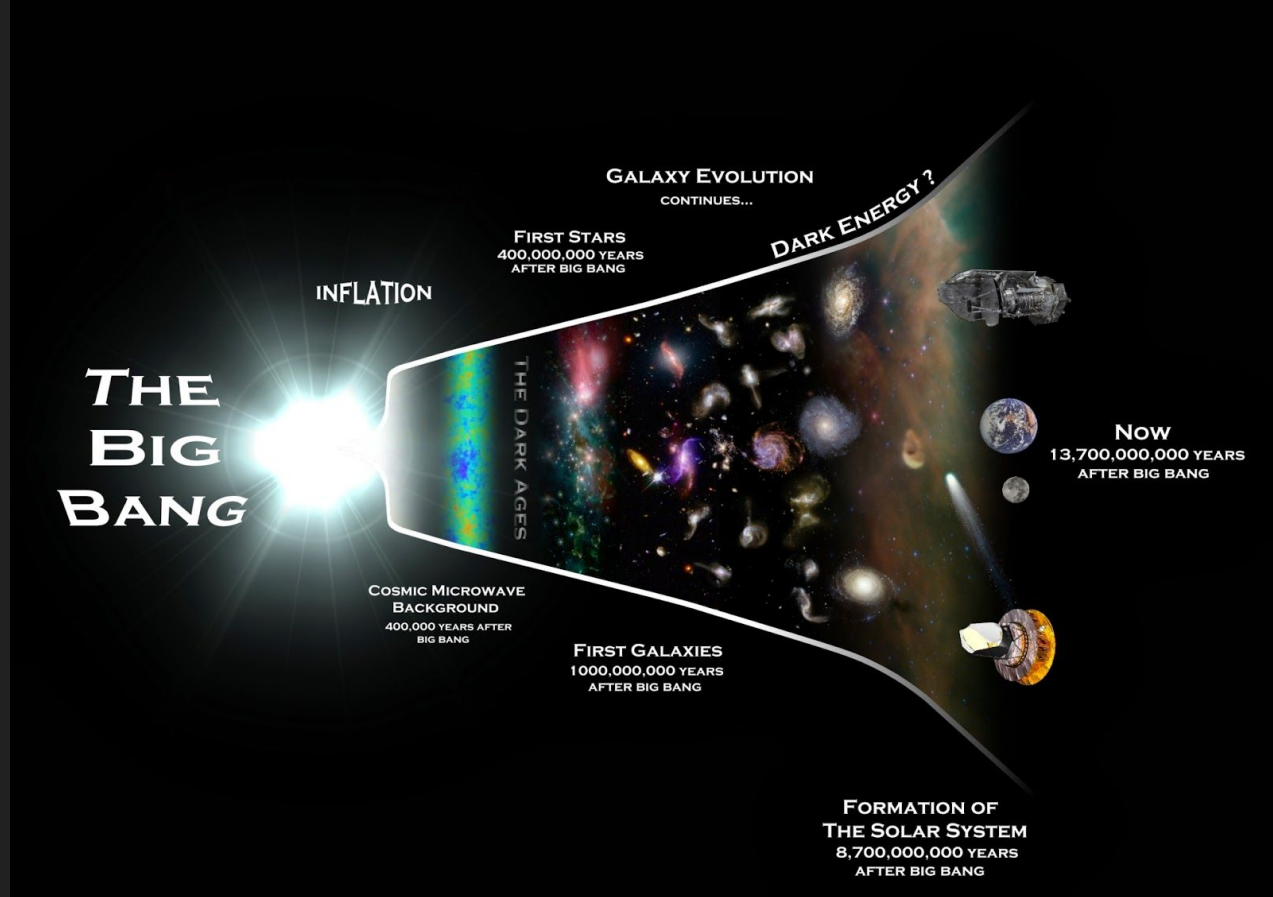
- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Inflação (?): desenvolvida por Alan Guth, Paul Steinhardt, Andrei Lide, Starobinsky, mecanismo do Universo primordial desenvolvido para explicar os seguintes problemas:

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Inflação (?): desenvolvida por Alan Guth, Paul Steinhardt, Andrei Lide, Starobinsky, mecanismo do Universo primordial desenvolvido para explicar os seguintes problemas:
 - problema do horizonte: por que regiões da RCF sem contato causal apresentam a mesma temperatura?
 - problema da curvatura: por que o Universo parece plano hoje?
 - problema da homogeneidade: por que o Universo é estatisticamente homogêneo e isotrópico? Ps: ver aula II ;)
 - problema da abundância dos defeitos topológicos e monopolos magnéticos: kd??

O modelo Λ CDM

- Λ CDM = Λ representa a Constante Cosmológica, responsável pela fase acelerada do Universo hoje, e CDM = *cold dark matter* (matéria escura fria)
- Inflação (?): desenvolvida por Alan Guth, Paul Steinhardt, Andrei Lide, Starobinsky, mecanismo do Universo primordial desenvolvido para explicar os seguintes problemas:
 - problema do horizonte: por que regiões da RCF sem contato causal apresentam a mesma temperatura?
 - problema da curvatura: por que o Universo parece plano hoje?
 - problema da homogeneidade: por que o Universo é estatisticamente homogêneo e isotrópico? Ps: ver aula II ;)
 - problema da abundância dos defeitos topológicos e monopolos magnéticos: kd??Alternativas: bouncing models (ricochete), string gas etc



Fonte: <http://planck.cf.ac.uk/science/timeline/universe>

O modelo Λ CDM

Ok, mas como descrevemos essas quantidades na prática?

O modelo Λ CDM

Ok, mas como descrevemos essas quantidades na prática?

Eq. de Friedmann dita a dinâmica do Universo $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$

O modelo Λ CDM

Ok, mas como descrevemos essas quantidades na prática?

Eq. de Friedmann dita a **dinâmica do Universo** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$

Derivação newtoniana: sendo a energia total do sistema gravitacional

$$E = \frac{m\dot{a}^2 x^2}{2} - Gm \frac{4\pi\rho a^2 x^2}{3}$$

O modelo Λ CDM

Ok, mas como descrevemos essas quantidades na prática?

Eq. de Friedmann dita a **dinâmica do Universo** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$

Derivação newtoniana: sendo a energia total do sistema gravitacional

$$E = \frac{m\dot{a}^2 x^2}{2} - Gm \frac{4\pi\rho a^2 x^2}{3}$$

Temos então $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$ onde $kc^2 = -\frac{2E}{mx^2}$

O modelo Λ CDM

Ok, mas como descrevemos essas quantidades na prática?

Eq. de Friedmann dita a **dinâmica do Universo** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$

Derivação newtoniana: sendo a energia total do sistema gravitacional

$$E = \frac{m\dot{a}^2 x^2}{2} - Gm \frac{4\pi\rho a^2 x^2}{3}$$

Temos então $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$ onde $kc^2 = -\frac{2E}{mx^2}$

ρ representa a **densidade de energia do conteúdo material** do Universo

k denota o **fator de curvatura**, que pode ser $k>0,=0,<0$ para Universo aberto, plano e fechado, respectivamente

O modelo Λ CDM

Outra forma de escrever a Eq. de Friedman

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{k0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda}}$$

Onde $\Omega_i \equiv \rho/\rho_c$; $\rho_c \equiv 3H^2/(8\pi G)$

O modelo Λ CDM

Outra forma de escrever a Eq. de Friedman

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{k0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda}}$$

Onde $\Omega_i \equiv \rho/\rho_c$; $\rho_c \equiv 3H^2/(8\pi G)$

Podemos obter esses valores a partir da eq. de continuidade $\dot{\rho} = -3H(\rho + P)$

O modelo Λ CDM

Outra forma de escrever a Eq. de Friedman

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{k0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda}}$$

Onde $\Omega_i \equiv \rho/\rho_c$; $\rho_c \equiv 3H^2/(8\pi G)$

Podemos obter esses valores a partir da eq. de continuidade $\dot{\rho} = -3H(\rho + P)$

Sendo $P = w\rho$, temos então que $\rho \propto a^{-3(1+w)}$, onde $w=1/3$ para radiação, $w=0$ para matéria, $w=-1$ para constante cosmológica. Logo:

$$\rho_r \propto \rho_{r0} a^{-4}; \quad \rho_m = \rho_{m0} a^{-3}; \quad \rho_{\Lambda} = \rho_{\Lambda 0}$$

O modelo Λ CDM

Outra forma de escrever a Eq. de Friedman

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{k0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda}}$$

Onde $\Omega_i \equiv \rho/\rho_c$; $\rho_c \equiv 3H^2/(8\pi G)$

H representa o parâmetro de Hubble, enquanto H_0 é a Constante de Hubble, que ditam a taxa de expansão do Universo no passado e hoje, respectivamente

$$H_0 = (\dot{a}/a)|_{t=0}$$

Então... como medimos o Universo?



Medindo o Universo

- Em Astronomia, medimos sempre a luz que vem de objetos cósmicos até nós. Em outras palavras: sempre olhamos para **imagens do passado** quando medimos o Universo

Medindo o Universo

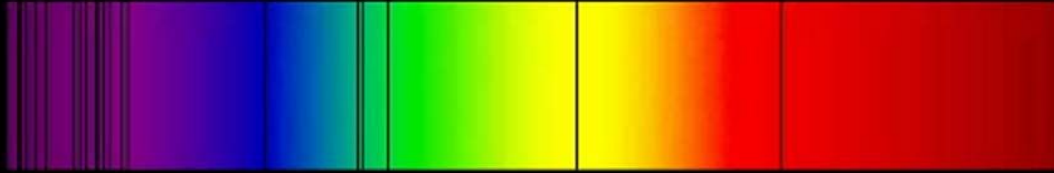
- Em Astronomia, medimos sempre a luz que vem de objetos cósmicos até nós. Em outras palavras: sempre olhamos para **imagens do passado** quando medimos o Universo
- A luz que chega até nós não apresenta as mesmas características de quando foi emitida há milhões ou bilhões de ano

Medindo o Universo

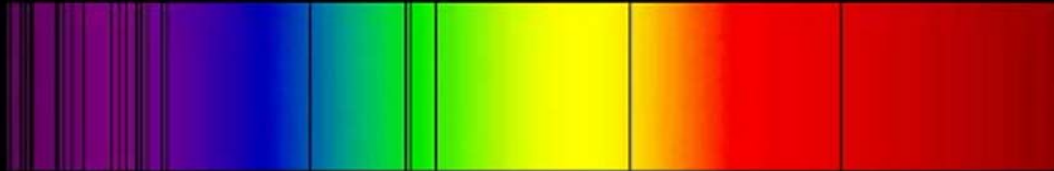
- Em Astronomia, medimos sempre a luz que vem de objetos cósmicos até nós. Em outras palavras: sempre olhamos para **imagens do passado** quando medimos o Universo
- A luz que chega até nós não apresenta as mesmas características de quando foi emitida há milhões ou bilhões de ano => desvio pro **vermelho (redshift)** devido a expansão cosmológica

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} \qquad 1 + z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \frac{a_0}{a_e} = \frac{1}{a}$$

Absorption Lines from our Sun



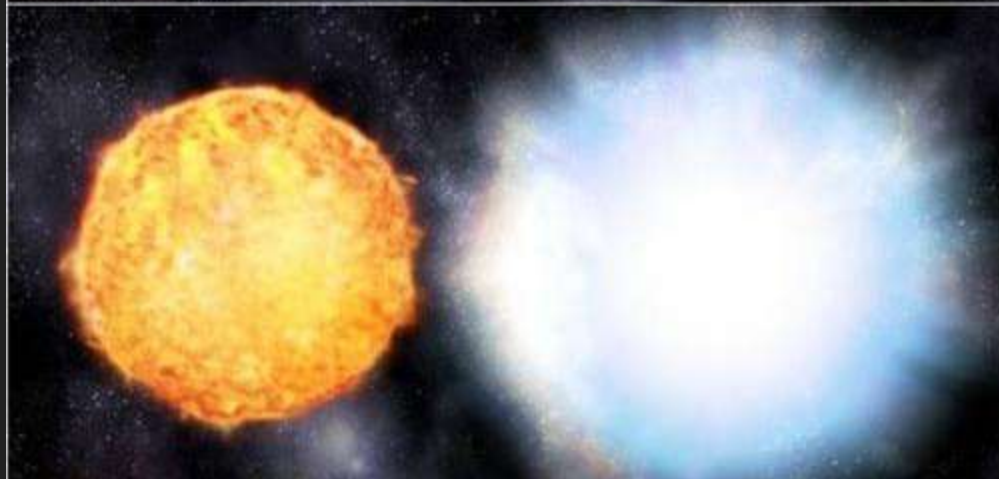
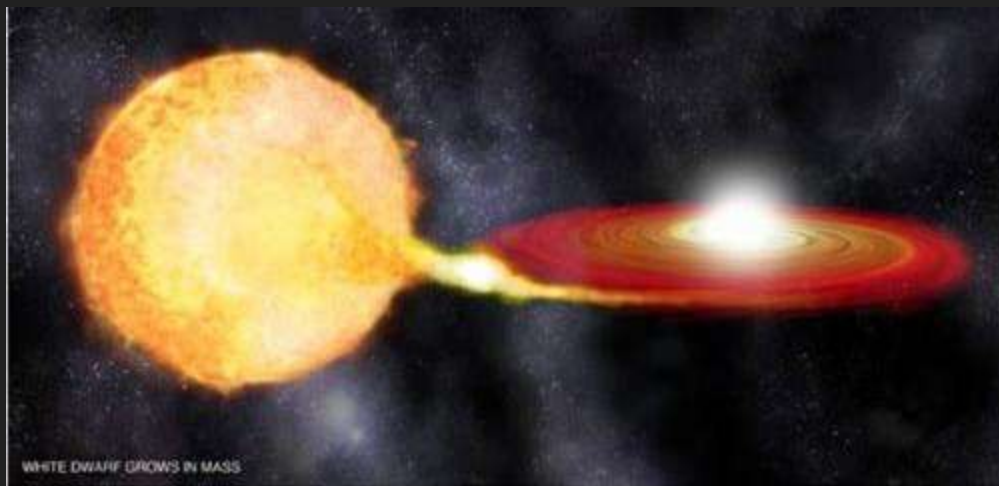
Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11 $v = 0.07c$, $d = 1$ billion light years



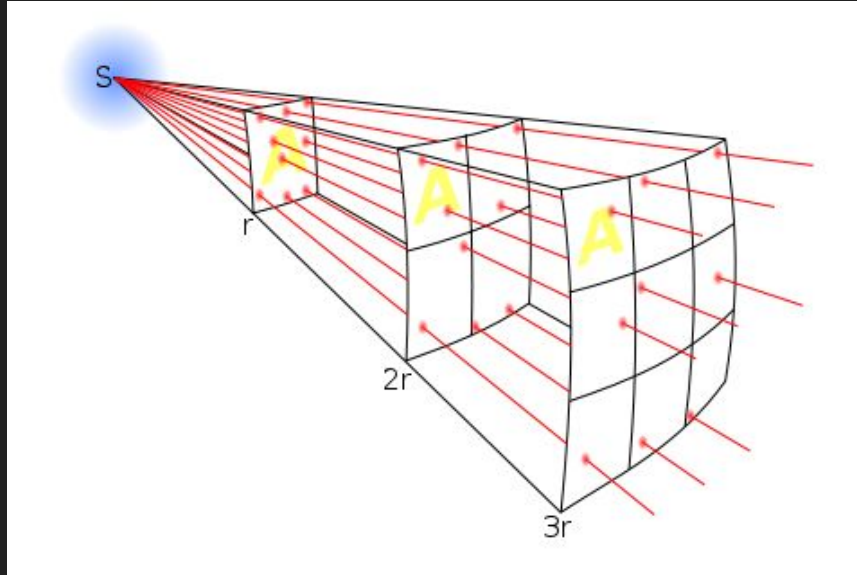
Fonte: <http://www.teachastronomy.com/astropedia/article/Galaxy-Redshifts>

Medindo o Universo

- Supernovas do tipo Ia (SNs) são uma das principais sondas cosmológicas.
- SNs vem de um sistema binário de uma estrela anã branca e uma companheira. Quando a anã branca acreta sua massa até atingir o limite de Chandrasekhar ($1.4M_{\text{sol}}$), o sistema colapsa.
- SNs são excelentes velas padronizáveis, ou seja, objetos com curva de luz conhecidas. Excelentes indicadores de distâncias cosmológicas

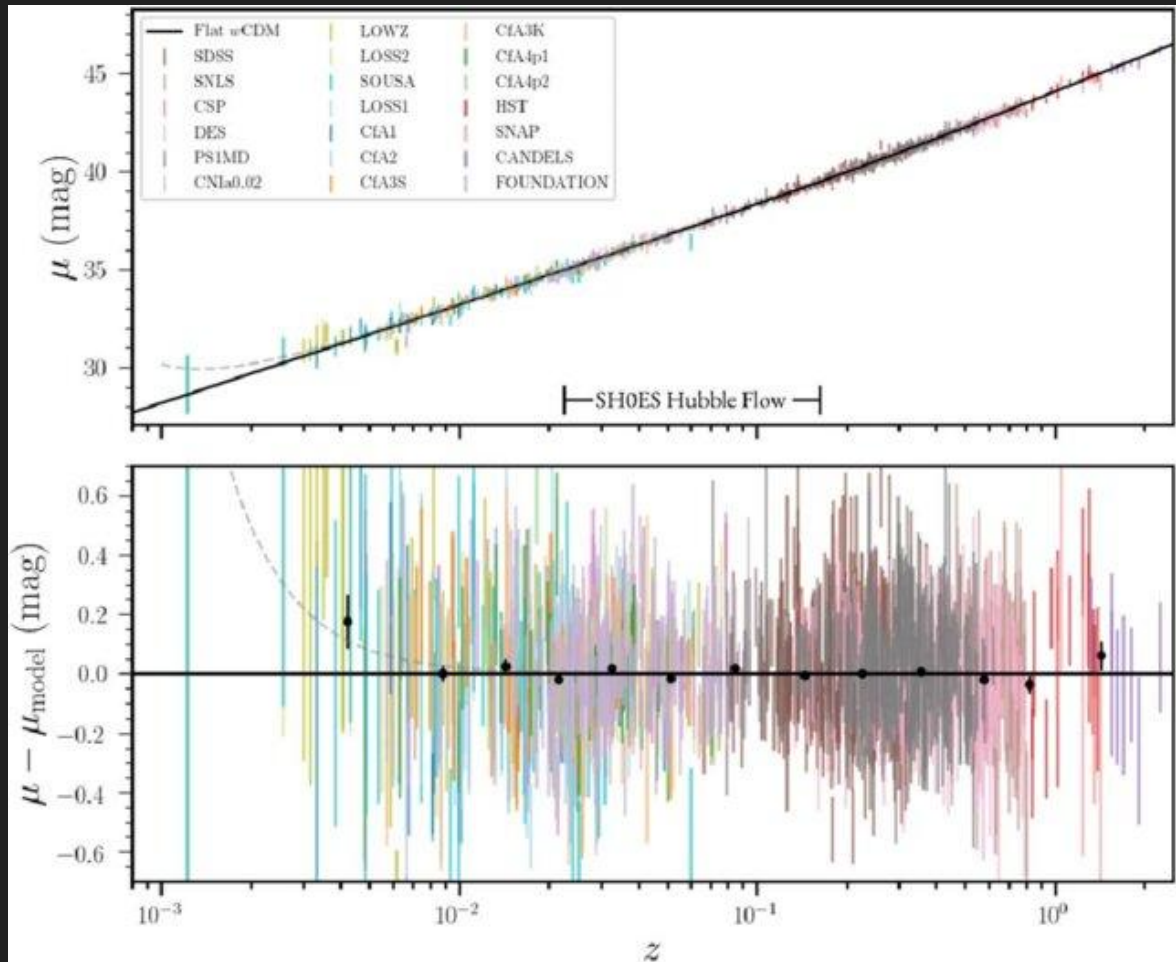


Medindo o Universo



$$F_o = L_o / (4\pi r^2) = (1 + z)^{-2} L_e / (4\pi r^2)$$

$$D_L = (1 + z)r = (1 + z) \int_0^z dz' / H(z')$$

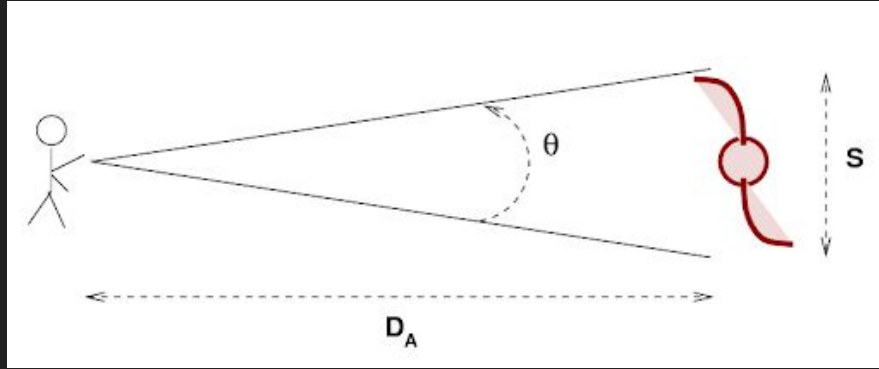


Créditos: Brout et al.
2022

Medindo o Universo

- Já a estrutura em grande escala cosmológica (EGE) nos fornece informações muito ricas sobre como o Universo evolui
- Um teste muito importante consiste em medir uma escala preferencial na separação das galáxias, que é a escala do horizonte acústico proveniente de oscilações acústicas bariônicas (BAO) no Universo primordial
- Diferentemente das SNs, essa escala é uma régua padrão - tamanho angular conhecido
- BAO também é detectado na RCF, e assim testamos modelos cosmológicos
Nota: a EGE também nos permite medir o Universo através do fator de crescimento de estruturas

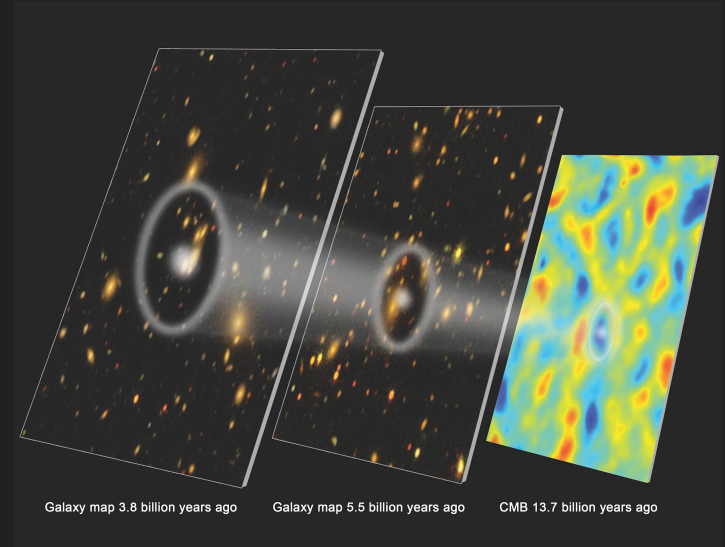
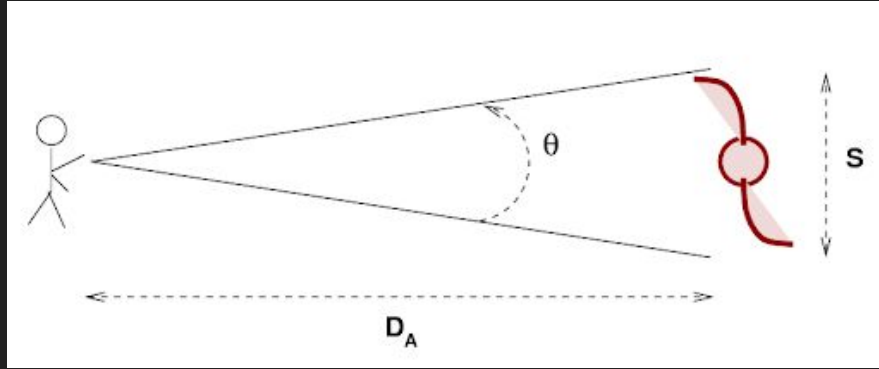
Medindo o Universo



$$\theta_e \sim s/D_A; \quad \theta_o \sim sa(t_e)/r$$

$$D_A = r/a(t_e) = (1+z)^{-1} \int_0^z dz' / H(z)$$

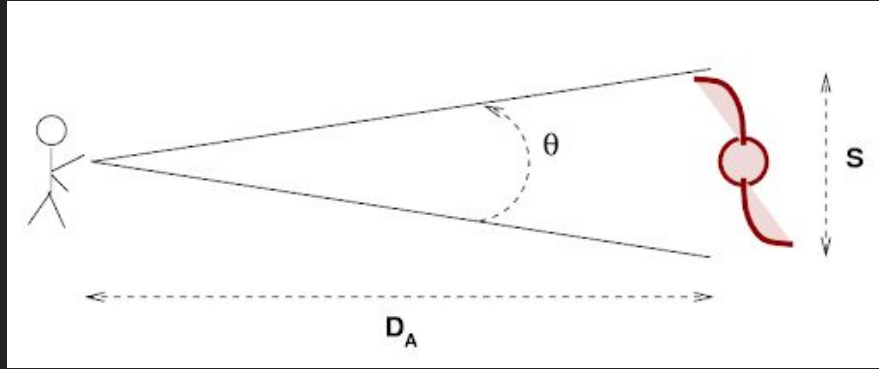
Medindo o Universo



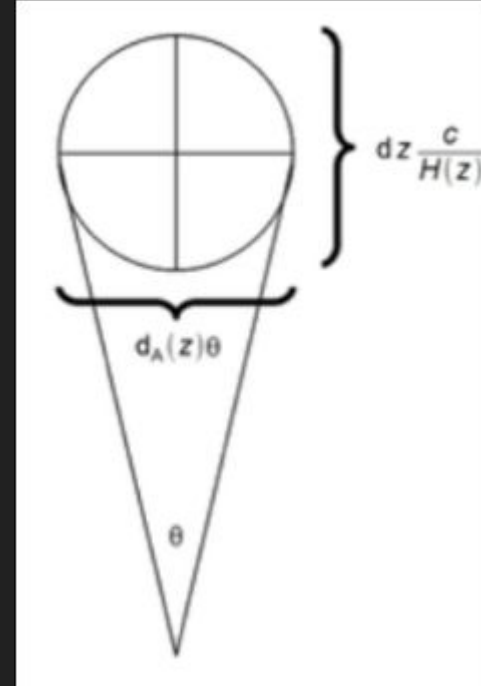
$$\theta_e \sim s/D_A; \quad \theta_o \sim sa(t_e)/r$$

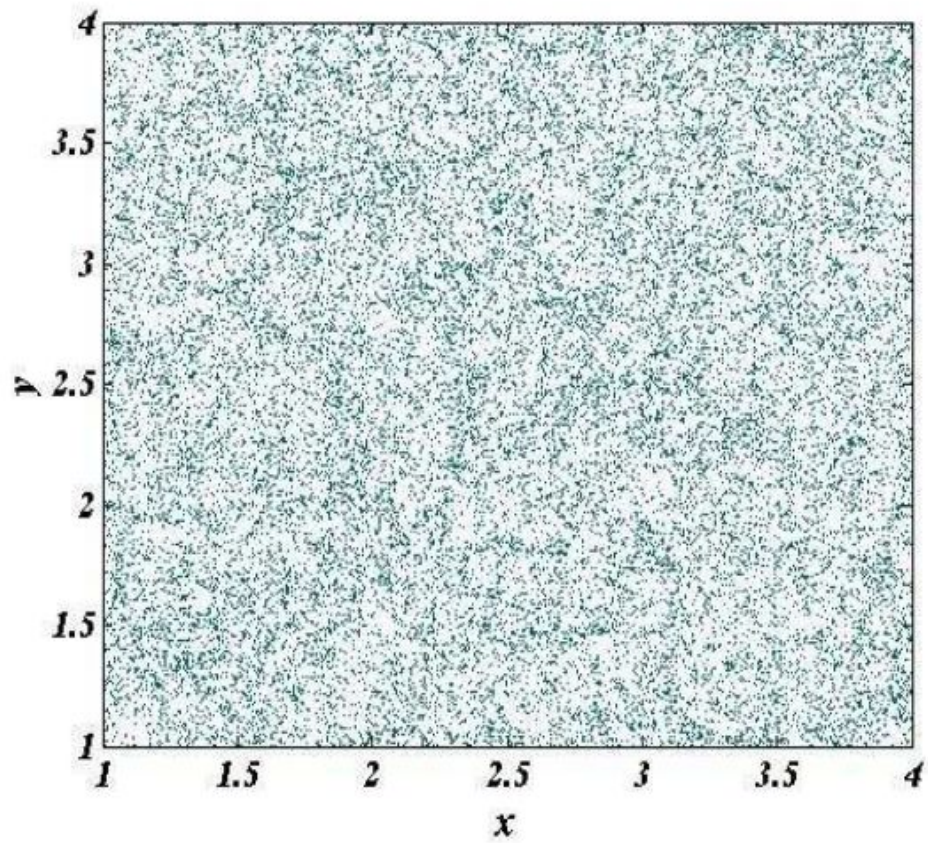
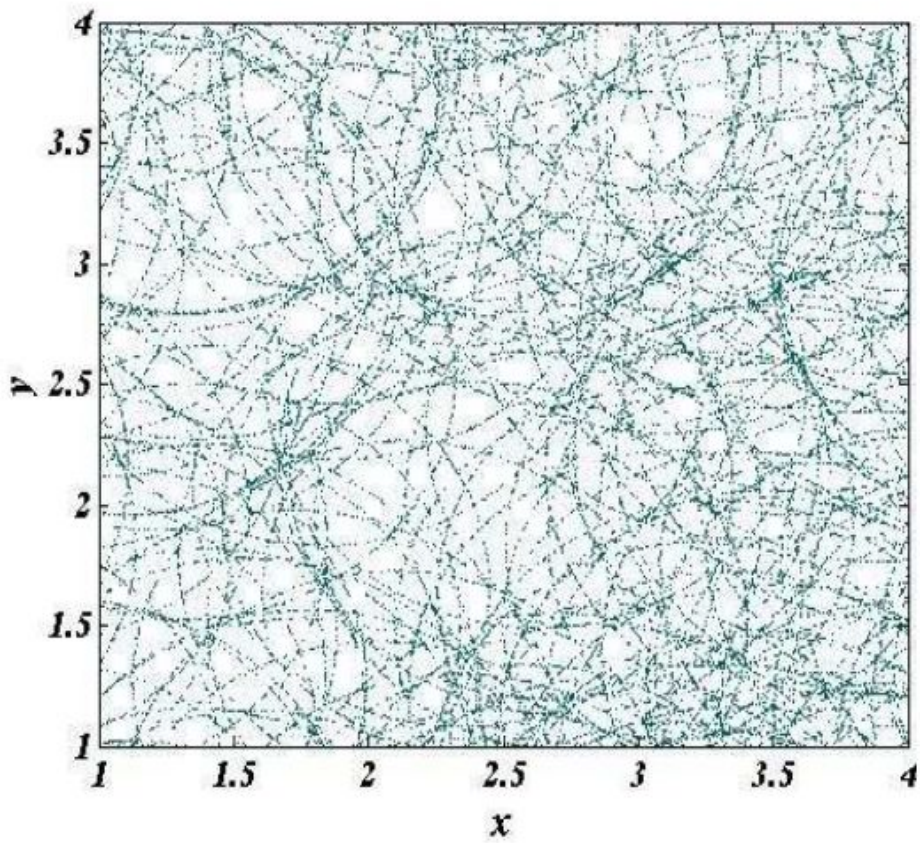
$$D_A = r/a(t_e) = (1+z)^{-1} \int_0^z dz' / H(z)$$

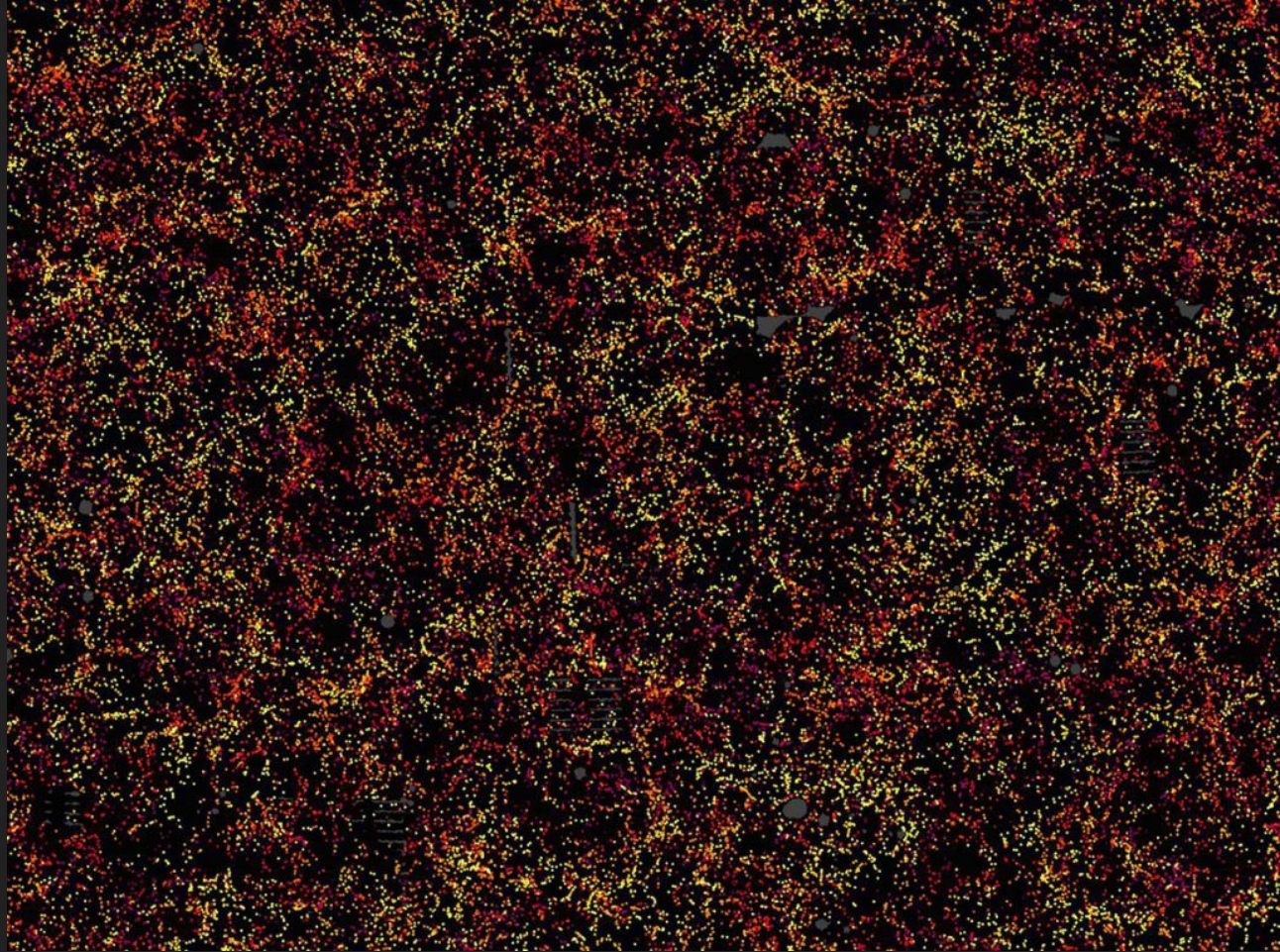
Medindo o Universo



Nota: o BAO na EGE na verdade é um sinal tridimensional, combinação de um sinal transversal relacionado a $DA(z)$ e um radial relacionado a $H(z)$

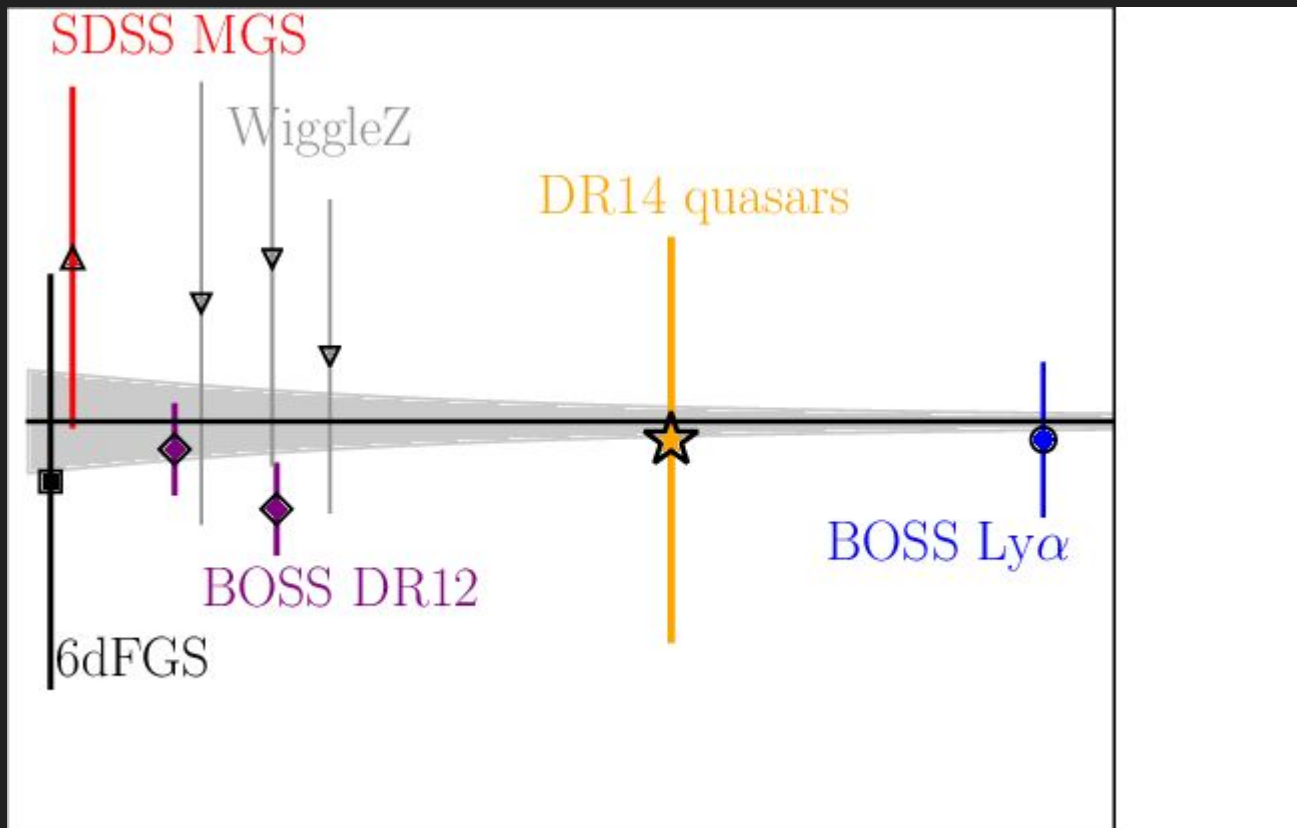




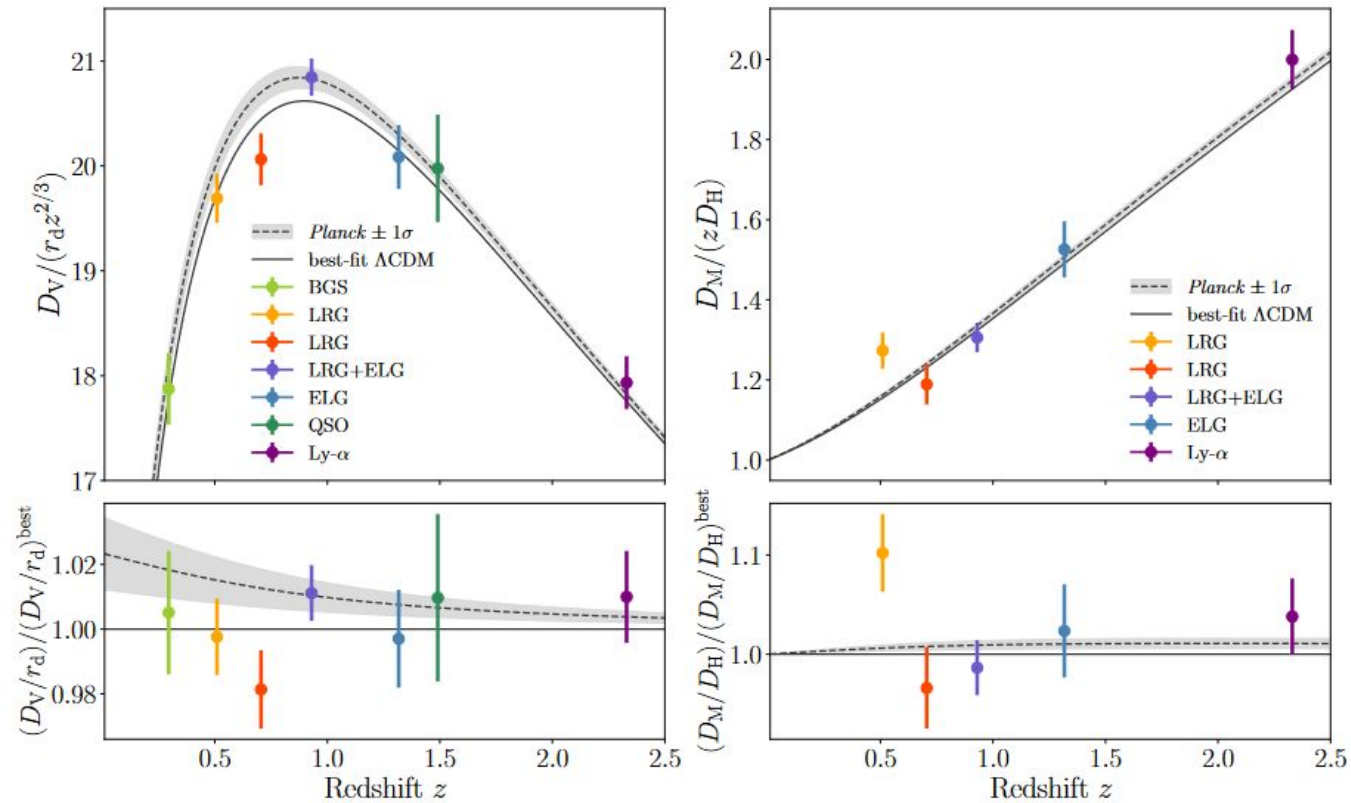


Mapa de galáxias
de SDSS-III, com
1.2 Ganos-luz de
profundidade.

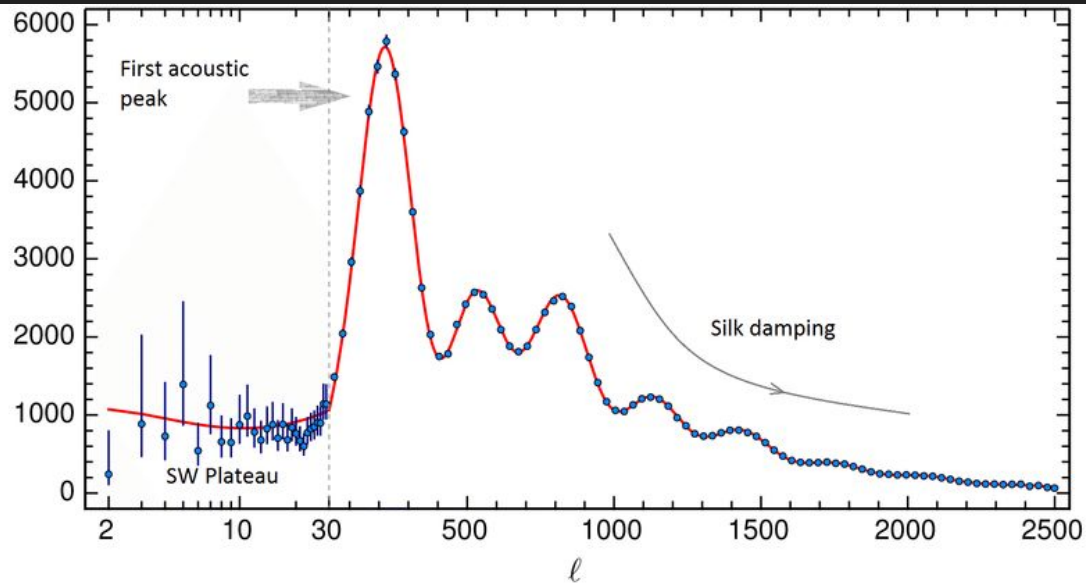
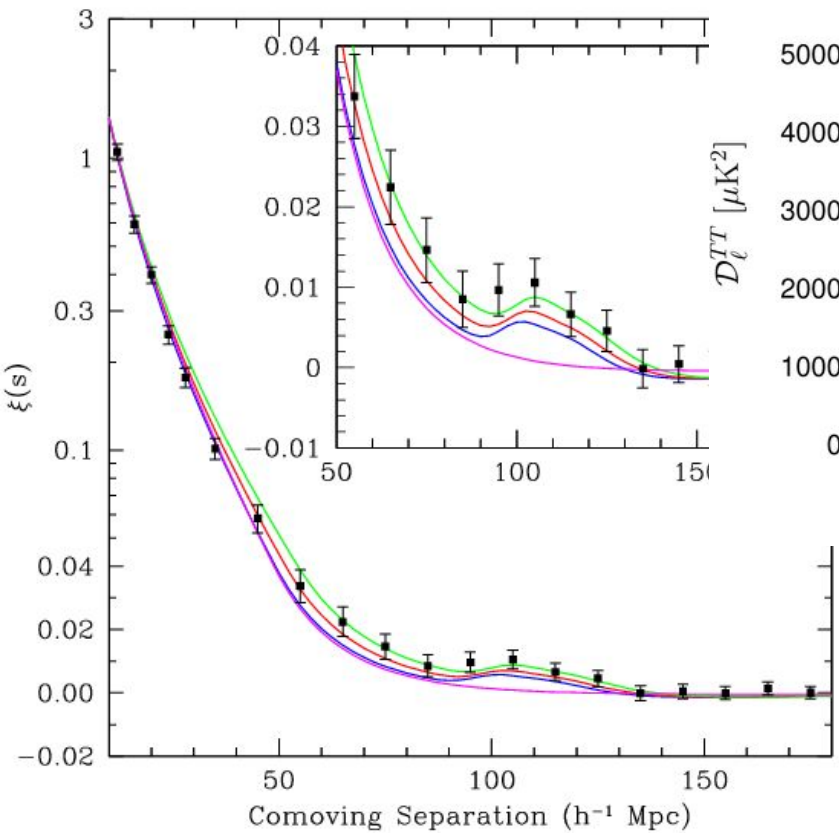
Créditos: Eisenstein
and SDSS-III
collaboration



Créditos: Ata et al 2017 (SDSS Collaboration)



Créditos: Adame et al. 2024 (DESI Collaboration)



Créditos: Eisenstein et al 2005 (esquerda) e Planck Collaboration (acima)

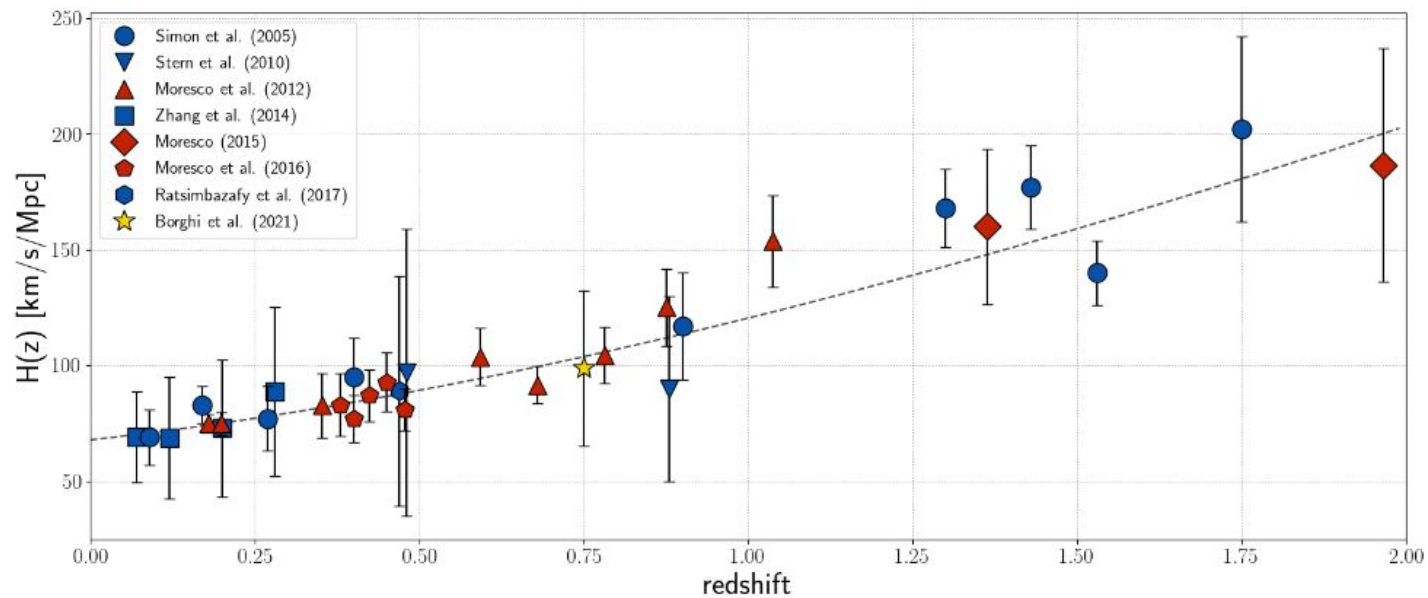
Medindo o Universo

- Outra forma de medir o Universo vem da idade diferencial de galáxias
- Galáxias muito antigas que evoluem passivamente (sem formação estelar), então podemos datar sua idade por meio do estágio evolutivo das estrelas
- Isso nos fornece uma medida do parâmetro de Hubble

$$H(z) = \dot{a}/a = -(1+z)dz/dt$$

Note que podemos também obter medidas de $H(z)$ de BAO, como dito anteriormente

Medindo o Universo



Créditos: Moresco et al. 2022

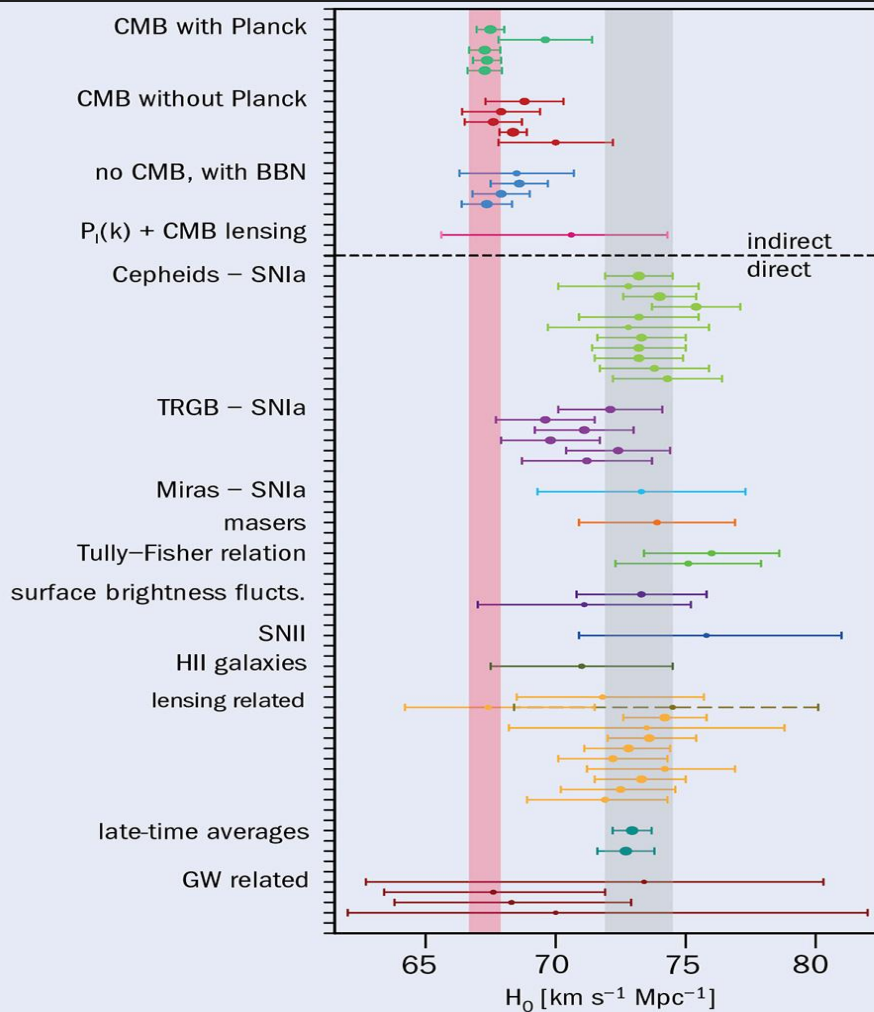
Ok, com isso, temos um modelo que explica bem as observações cosmológicas...

**Ok, com isso, temos um modelo que explica
bem as observações cosmológicas...
Mas será que realmente entendemos o
Universo?**

Ok, com isso, temos um modelo que explica
bem as observações cosmológicas...
Mas será que realmente entendemos o
Universo?

Tensão nas medidas de H_0 de RCF x SNs @ 5.0σ

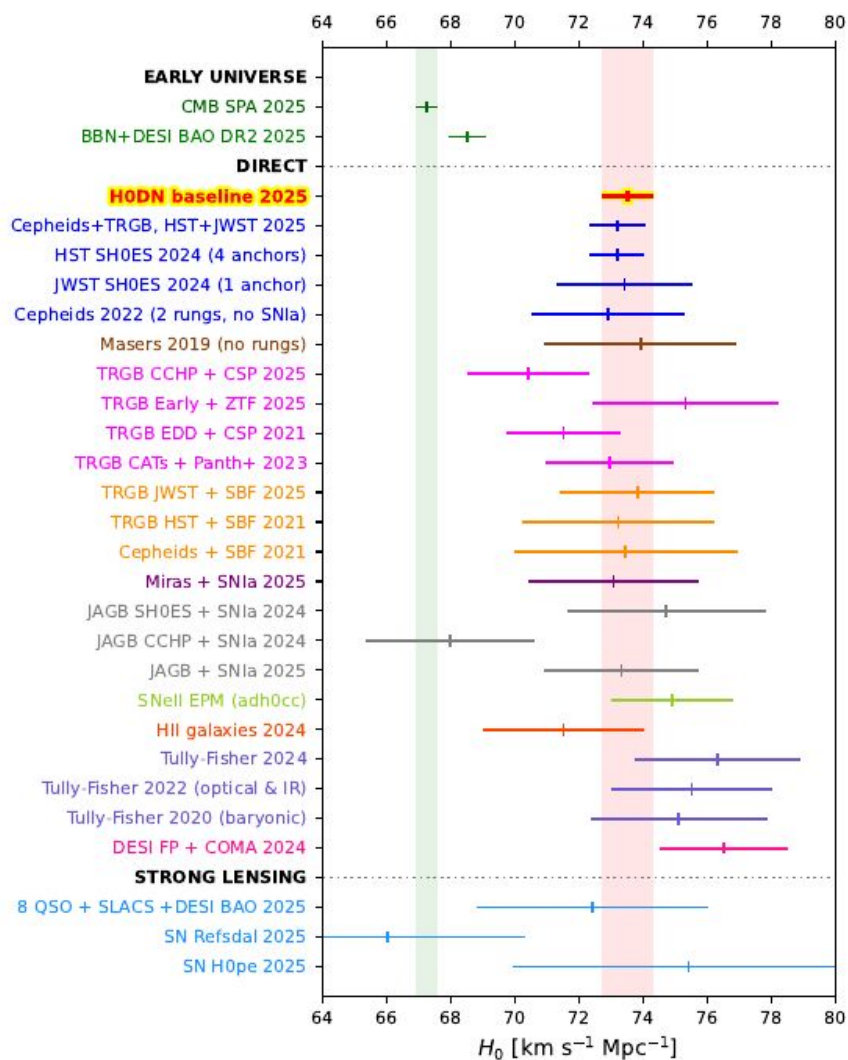
Tensão em medidas de σ_8 da EGE x lentes fracas da RCF @ 2.5σ



Tensão persistente entre medidas de H_0 obtidas por observações do Universo primordial e tardio: modelos alternativos de energia escura e gravitação, bem como modelos alternativos do Universo primordial, não conseguem resolvê-la

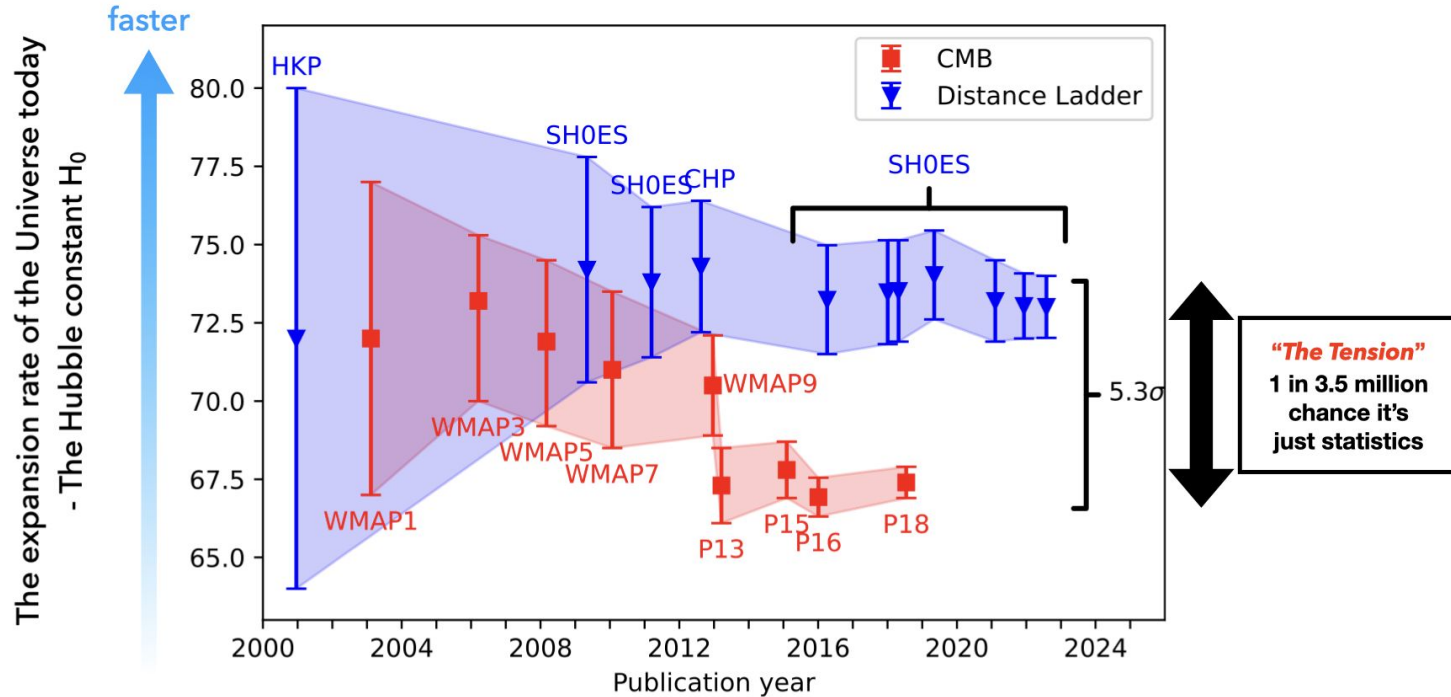
Créditos:

[\[https://arxiv.org/abs/2103.01183\]](https://arxiv.org/abs/2103.01183)



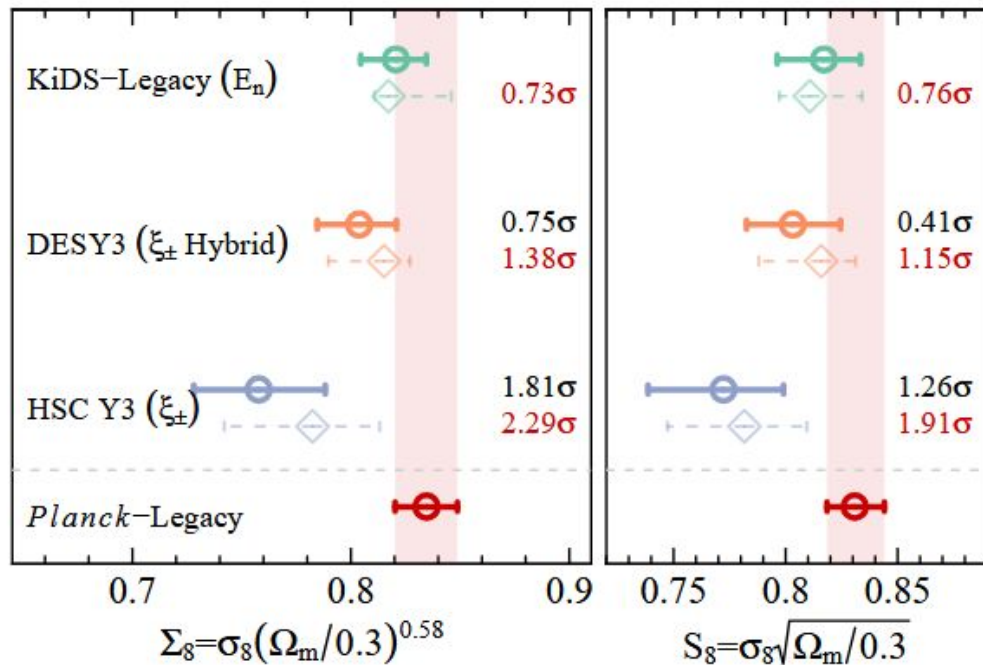
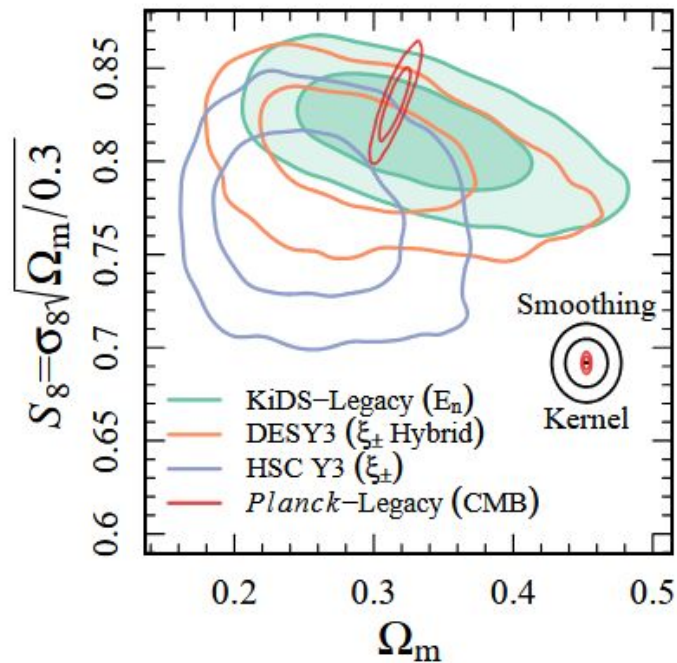
Créditos: Casertano+ (H0DN
Collaboration), arXiv:2510.23823

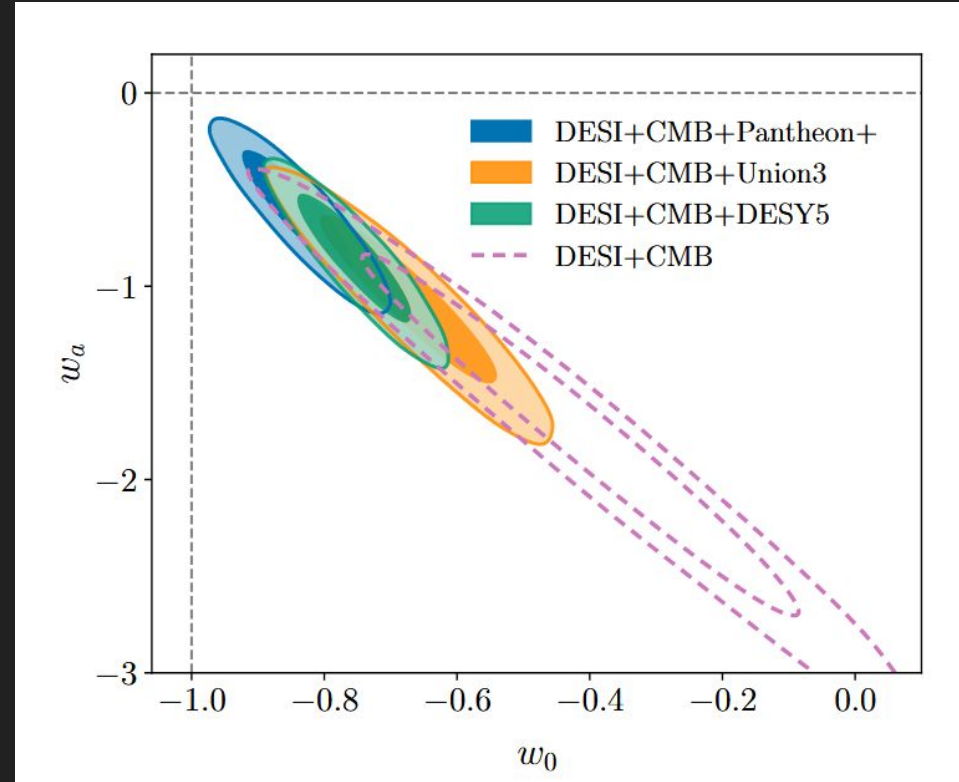
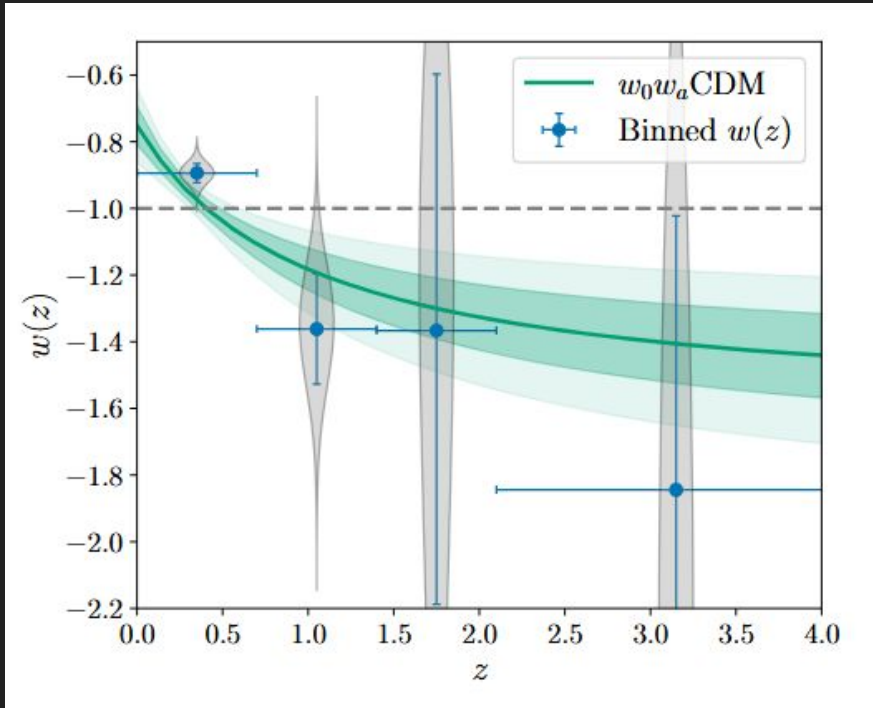
An emerging problem in Physics



Créditos: D'arcy Kenworthy

Créditos: Wright et al. (KiDS-Legacy)
A&A 703, A158 (2025), 2503.14738





Créditos: DESI collaboration, Phys. Rev. D 112, 083515, 2025

Challenges for Λ CDM: An update

L. Perivolaropoulos^{1,*} and F. Skara^{1,†}

¹*Department of Physics, University of Ioannina, 45110 Ioannina, Greece*

(Dated: April 7, 2022)

A number of challenges to the standard Λ CDM model have been emerging during the past few years as the accuracy of cosmological observations improves. In this review we discuss in a unified manner many existing signals in cosmological and astrophysical data that appear to be in some tension (2σ or larger) with the standard Λ CDM model as specified by the Cosmological Principle, General Relativity and the Planck18 parameter values. In addition to the well-studied 5σ challenge of Λ CDM (the Hubble H_0 tension) and other well known tensions (the growth tension, and the lensing amplitude A_L anomaly), we discuss a wide range of other less discussed less-standard signals which appear at a lower statistical significance level than the H_0 tension some of them known as 'curiosities' in the data) which may also constitute hints towards new physics. For example such signals include cosmic dipoles (the fine structure constant α , velocity and quasar dipoles), CMB asymmetries, BAO $\text{Ly}\alpha$ tension, age of the Universe issues, the Lithium problem, small scale curiosities like the core-cusp and missing satellite problems, quasars Hubble diagram, oscillating short range gravity signals etc. The goal of this pedagogical review is to collectively present the current status (2022 update) of these signals and their level of significance, with emphasis on the Hubble tension and refer to recent resources where more details can be found for each signal. We also briefly discuss theoretical approaches that can potentially explain some of these signals.

<https://arxiv.org/abs/2105.05208>

Resumo

Resumo

- O modelo cosmológico padrão hoje (Λ CDM) nos permite conhecer bem como o Universo evolui em grande escala - **mas será que realmente entendemos o Universo?!**
- Ainda não **sabemos sobre a natureza da matéria e energia escura**, fora **problemas teóricos: coincidência cósmica, ajuste fino** etc.
- O cenário inflacionário primordial **permite resolver alguns problemas do Universo - homogeneidade (?), planura e horizonte** - mas ainda não conhecemos a natureza do campo inflaton
- Ademais: **Tensão entre medidas de H_0 de SNs vs RCF, tensão σ_8** etc
- Será que as **hipóteses fundamentais do MCP** são de fato válidas??



Cenas dos próximos capítulos





Cenas dos próximos capítulos



- **Aula 2:** Hipóteses fundamentais do modelo cosmológico padrão
Spoiler: teoria da relatividade geral e o Princípio Cosmológico
- **Aula 3:** Testes observacionais do Princípio Cosmológico (e do modelo padrão)