Análise e obtenção de vínculos em uma teoria f(R) cosmologicamente viável

Pedro Bessa

PPGCosmo - UFES

pedro.h.dutra@edu.ufes.br

October 6, 2021

Índice

- Uma brevíssima revisão de teorias f(R) e perturbações cosmológicas
- Vínculos teóricos
- Vínculos observacionais
- $f\sigma_8$ e vínculos
- Métodos para a obtenção de vínculos

Brevíssima revisão de f(R)

Modificando a ação gravitacional

Uma primeira modificação da ação de Einstein-Hilbert nos leva a um acoplamento mais geral ao campo gravitacional, através de uma função $f(R)$ no lugar do escalar de curvatura:

$$\mathcal{S} = \int d^4x\sqrt{-g}f(R). \tag{1}$$

Limitações Teóricas

Podemos limitar a forma de $f(R)$ por exigências de estabilidade sobre nossas equações de movimento, necessidades de regularidade no comportamento assintótico das métricas e equivalências com outros tipos de teorias gravitacionais, por exemplo.

Brevíssima revisão de f(R)

Limitações observacionais

A boa concordância do Universo observado com a Relatividade Geral+Λ impõe margens restritas para desvios muito grandes da ação gravitacional de Einstein-Hilbert. Quais os vínculos advindos de observações cosmológicas?

Modelos cosmologicamente viáveis

Para que uma teoria $f(R)$ seja viável de tal maneira a reproduzir as diferentes fases do Universo após o Universo primordial, é necessário que ela satisfaça certas condições sobre a forma da função $f(R)$. As instabilidades de Dolgov-Kawasaki e de-Sitter [DK03, Far05] impõem limites sobre possíveis parâmetros da teoria $f(R)$.

Modelo f(R) de Starobinsky para o Universo Tardio

Um modelo de f(R) estável e que obedece a todas as necessidades teóricas para reproduzir os estágios da evolução cosmológica é o que possui uma função da forma [Sta07]

$$f(R) = R - R_* \lambda \left(\left(1 + \frac{R}{R_*} \right)^n - 1 \right), \tag{2}$$

onde R_* é o valor do escalar de curvatura no limite de-Sitter da teoria, λ e n são parâmetros livres. Se escolhermos um valor fixo de n, a teoria possui a mesma quantidade de parâmetros livres que ΛCDM, visto que podemos vincular R_* a Ω_m

Formação de estruturas e vínculos cosmológicos

Perturbações cosmológicos

Perturbações cosmológicas fornecem o aparato teórico para vincular o que se observa no céu em questão de distribuição de objetos e a história cósmica. Teorias que alteram o acoplamento gravitacional fornecem uma história de formação de estruturas distinta daquela contada por ΛCDM.

Parâmetros vinculáveis

- $f\sigma_8$
- Ω_m

  $\Longrightarrow$
- λ
- R_*

Formação de estruturas e vínculos cosmológicos

O procedimento para obter a evolução de perturbações em teorias modificadas é basicamente o mesmo que o para Relatividade Geral:
Escolha de um calibre
$\rightarrow$ perturbação das equações de campo até 1a ordem
$\rightarrow$ transformação de Fourier; desacoplamento dos modos
$\rightarrow$ obtenção de um sistema de equações acoplado para a evolução dos contrastes de densidade
O tratamento canônico para uma diversa gama de teorias modificadas pode ser encontrado, por exemplo, em [Tsu07].

Formação de estruturas e vínculos cosmológicos

Para teorias $f(R)$, a forma geral da perturbação do constrante de densidade é dada por

$$\delta'' + \left(2 + \frac{H'}{H}\right)\delta' - \frac{3}{2}\Omega_m^{\text{eff}}\delta, \tag{3}$$

onde

$$\Omega_m^{\text{eff}} \equiv \frac{G_{\text{eff}}}{G}\Omega_m.$$

e

$$G_{\text{eff}} \equiv \frac{G}{8\pi f'}\frac{1 + 4\frac{k^2}{a^2}\frac{f''}{f'}}{1 + 3\frac{k^2}{a^2}\frac{f''}{f'}}$$

Formação de estruturas e vínculos cosmológicos

Função de crescimento

Podemos associar a taxa em que se formam estruturas no Universo à evolução do contraste de densidade atráves da **função de crescimento**

$$f \equiv \frac{d \ln \delta}{d \ln a} \tag{4}$$

σ_8

O desvio padrão médio de homogeneidade σ_8, associado à função de crescimento fornece um observável cosmológico, obtido pela evolução da escala de homogeneidade em função do redshift dos objetos, dada pela relação

$$\sigma_8(z) = \sigma_8|_{z=0}\delta(z) \implies f\sigma_8(z) = \frac{d}{d \ln a}\sigma_8(z)$$

Vinculando parâmetros

Resgatando a equação (2), podemos obter a relação entre os parâmetros cosmológicos e os parâmetros do modelo de gravidade:

$$R_* = 6H_0^2(1 - \Omega_{m0}) \tag{5}$$

- O regime de fundo (ou de ordem 0) da teoria, por construção, não é capaz de distinguir a teoria de ΛCDM.
- Vínculos sobre Ω_m ou $\lambda \implies$ necessitam do regime perturbativo.
- Podemos usar os observáveis $H(z)$ e $f\sigma_8(z)$ para tentar fechar o espaço de parâmetros possíveis da teoria, e seu desvio de Λ CDM.

Vinculando parâmetros

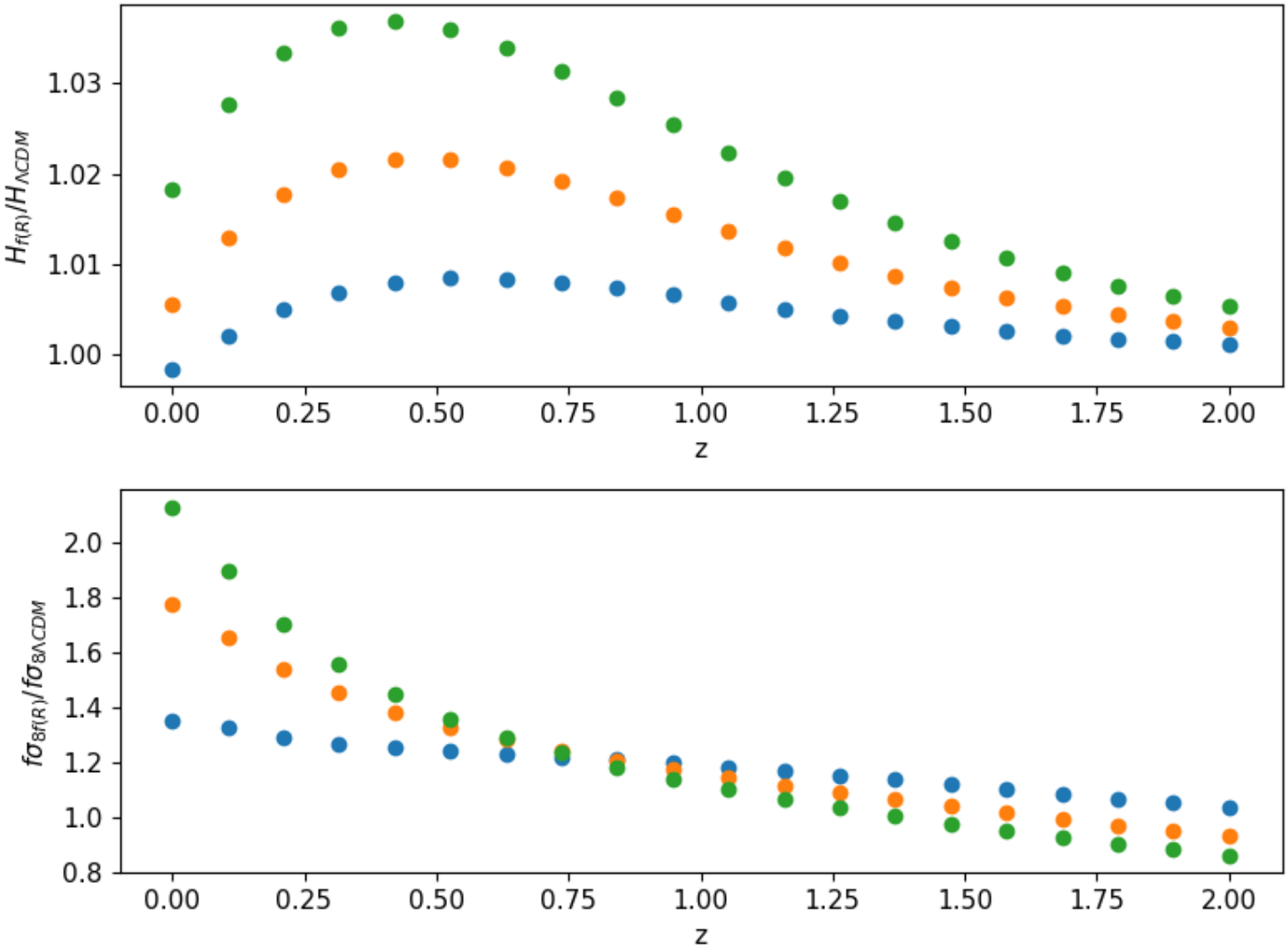


Figure: Razão de $H(z)$ e $f\sigma_8$ entre $f(R)$ de Starobinsky e ΛCDM, para diferentes valores dos parâmetros da teoria.

H(z) e fσ_8

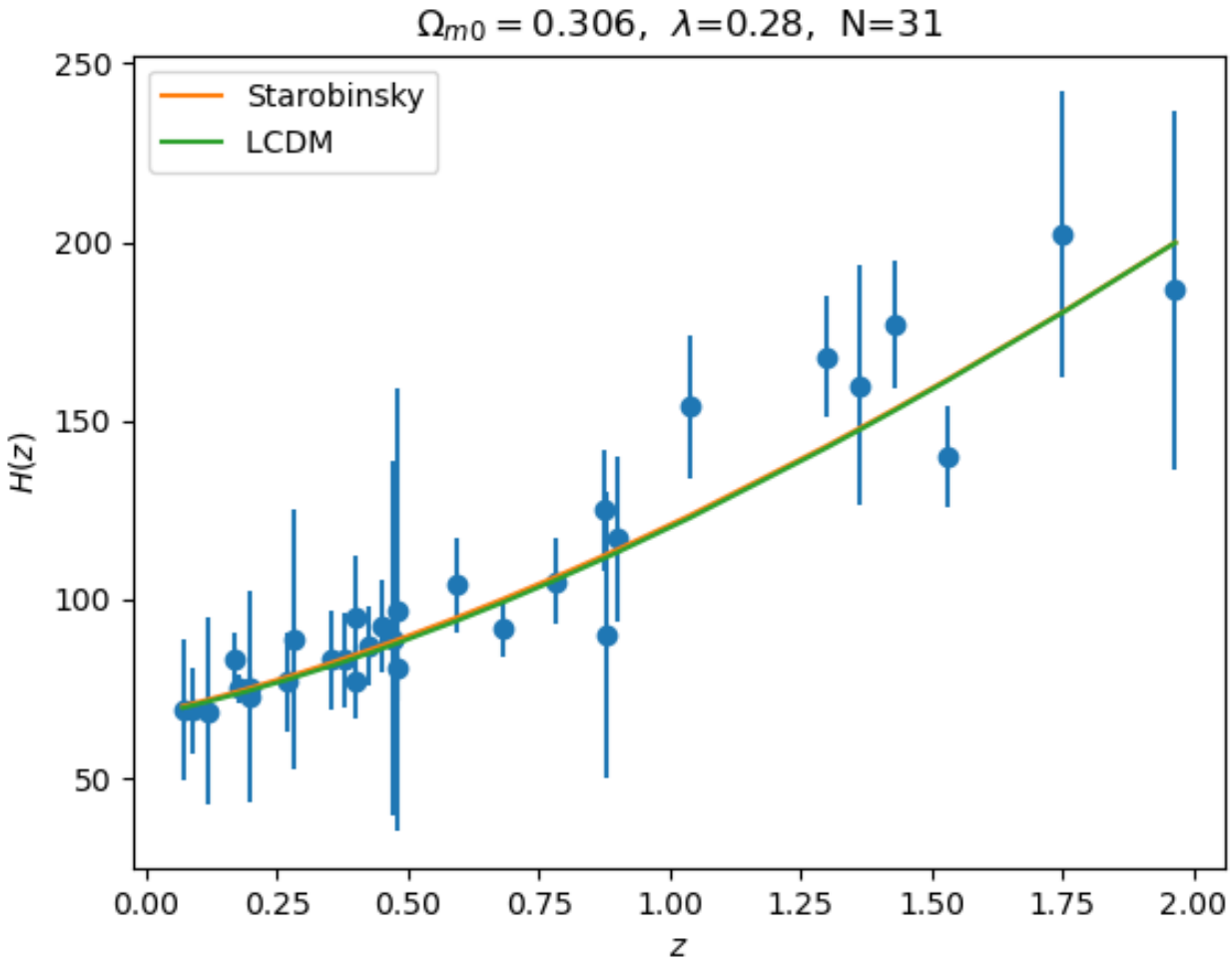


Figure: H(z) por z; dados de supernovas

H(z) e $f\sigma_8$

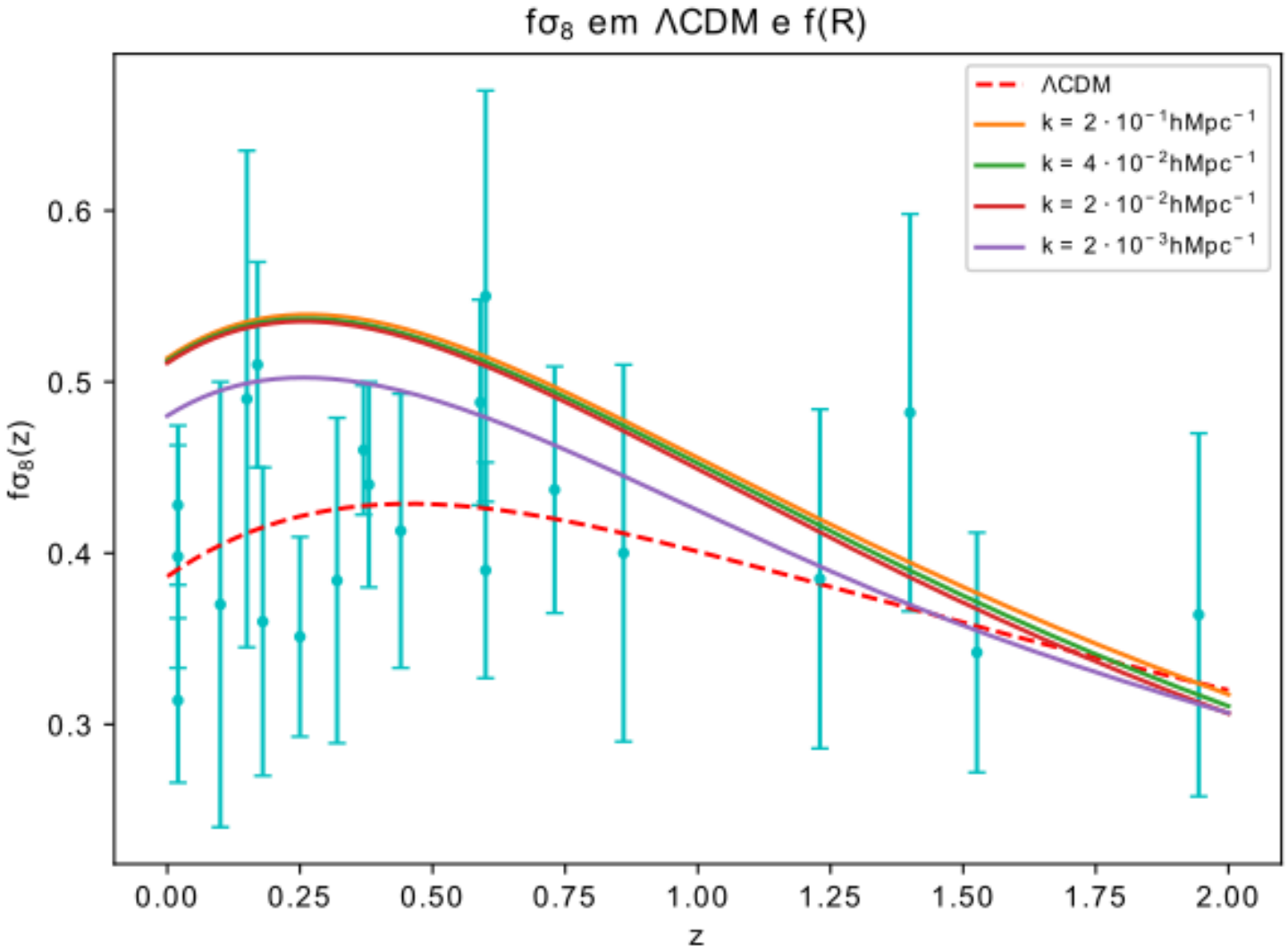
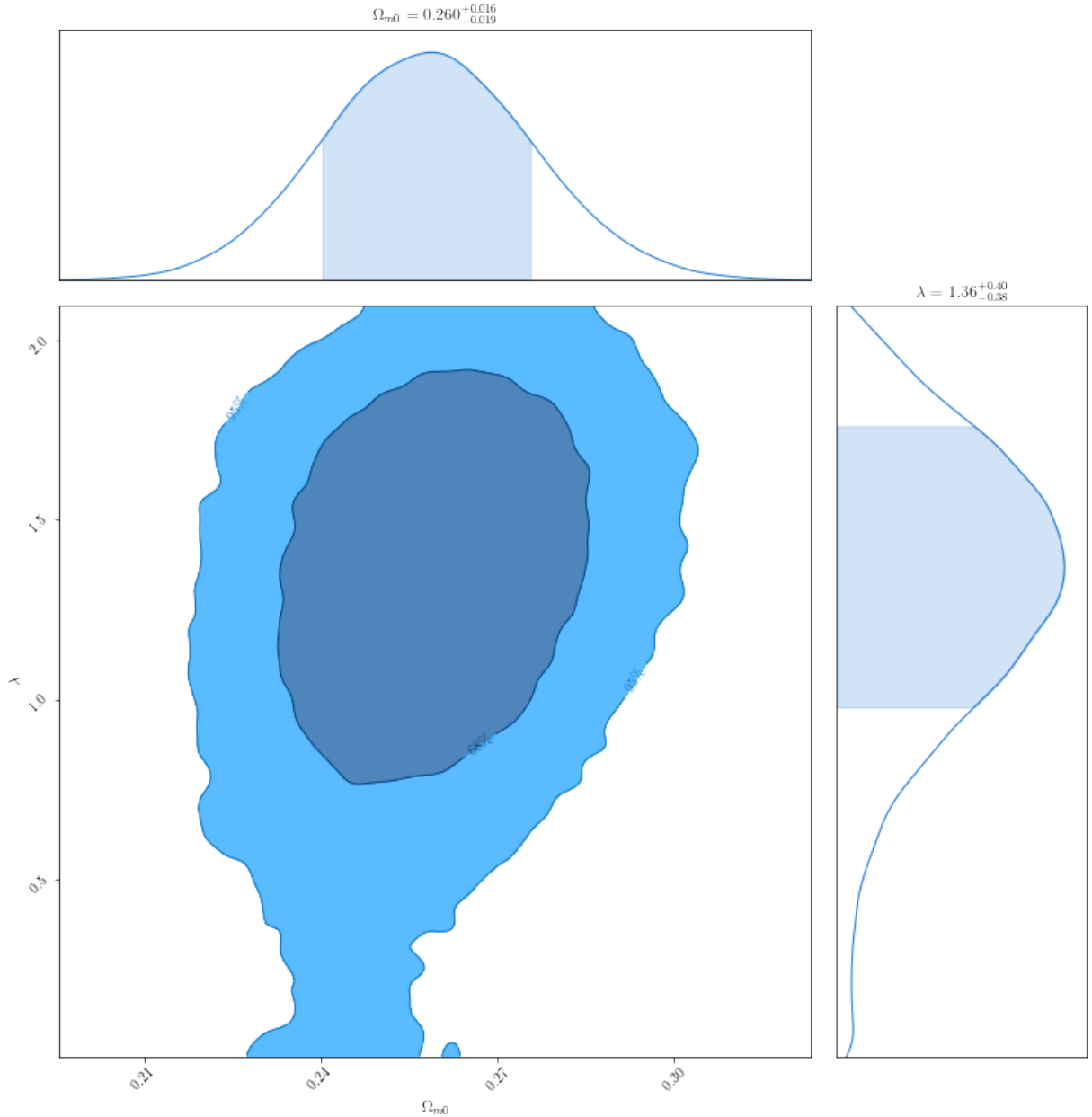


Figure: $f\sigma_8(z)$ por z; golden sample [ZVA]

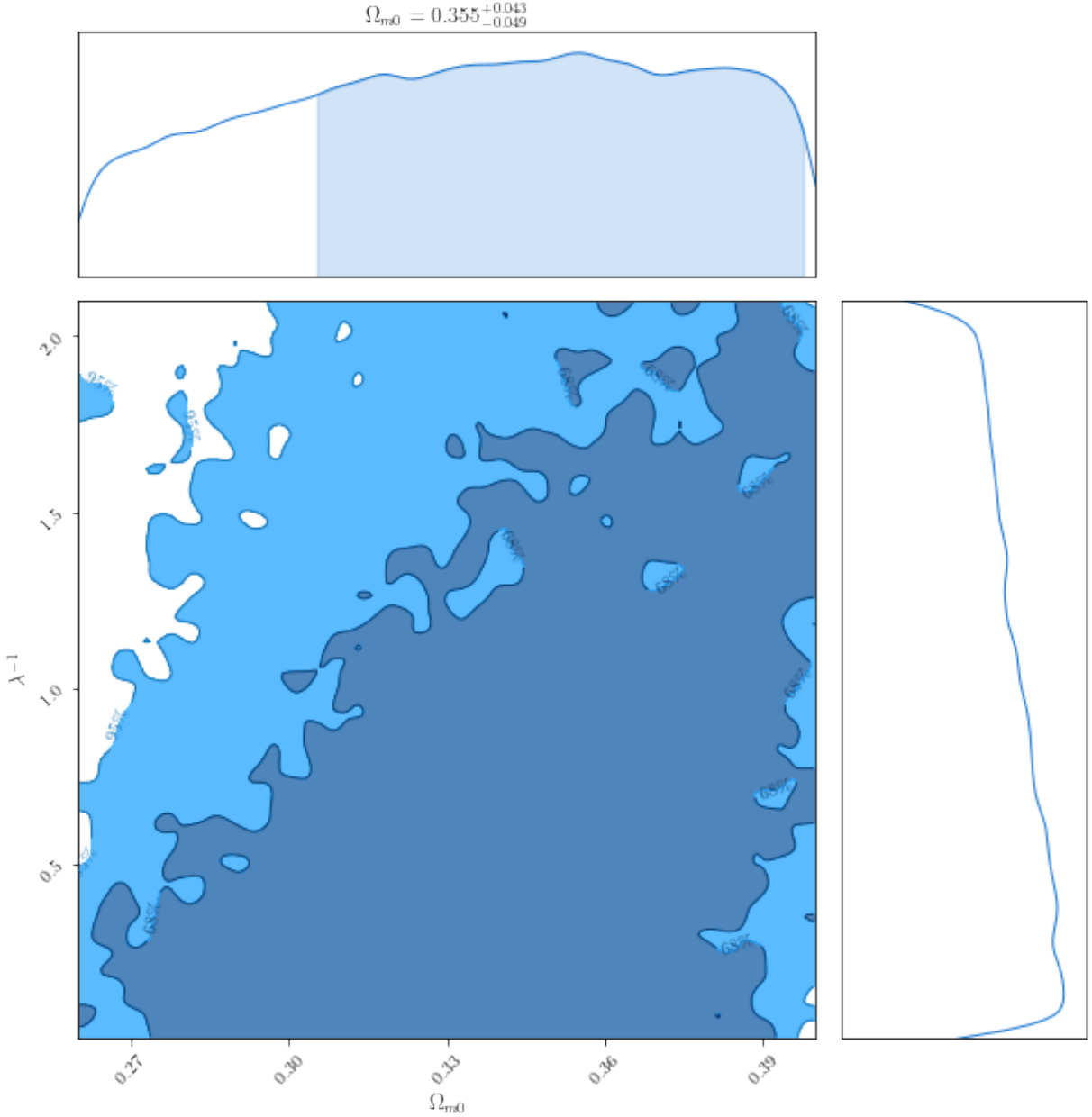
H(z) e fσ_8

- Há uma enorme degenerescência entre as curvas de $f(R)$ e ΛCDM para a evolução de H
- A dependência em k do contraste de densidade δ em teorias $f(R)$ gera diferentes perfis de curvas de $f\sigma_8$
- Escolhemos uma escala característica para as perturbações: $k \approx 0.1 h Mpc^{-1}$, associada à escala de homogeneidade $\sigma_8|_{z=0} = 8h^{-1}Mpc$

Vinculando λ e Ω_m



Vinculando λ e Ω_m



Vinculando λ e Ω_m: análise conjunta

- H_0 não consegue sozinho extrair vínculos dos observáveis;
- $f\sigma_8$ possui certa degenerescência em redshifts baixos para diferentes modelos alternativos;
- Por que não extrair um best fit para os parâmetros utilizando MCMC, e depois um fit da curva de $H(z)$ e $f\sigma_8$ conjunta? [Lin17, MOS20]

Vinculando λ e Ω_m: Curva $H - f\sigma_8$

- Linder propõe utilizar uma curva conjunta de $h(z)$ e $f\sigma_8(z)$ [Lin17] para quebrar a degenerescência de certos parâmetros em ΛCDM extendido.
- Matsumoto propõe uma análise parecida [MOS20] para quebrar a degenerescência para Horndeski em geral.
- Filtrar datasets de $f\sigma_8$ e $H(z) \rightarrow$ Construir boas binagens de redshift $\rightarrow$ encontrar o fit com as curvas teóricas.

Curva $H - f\sigma_8$

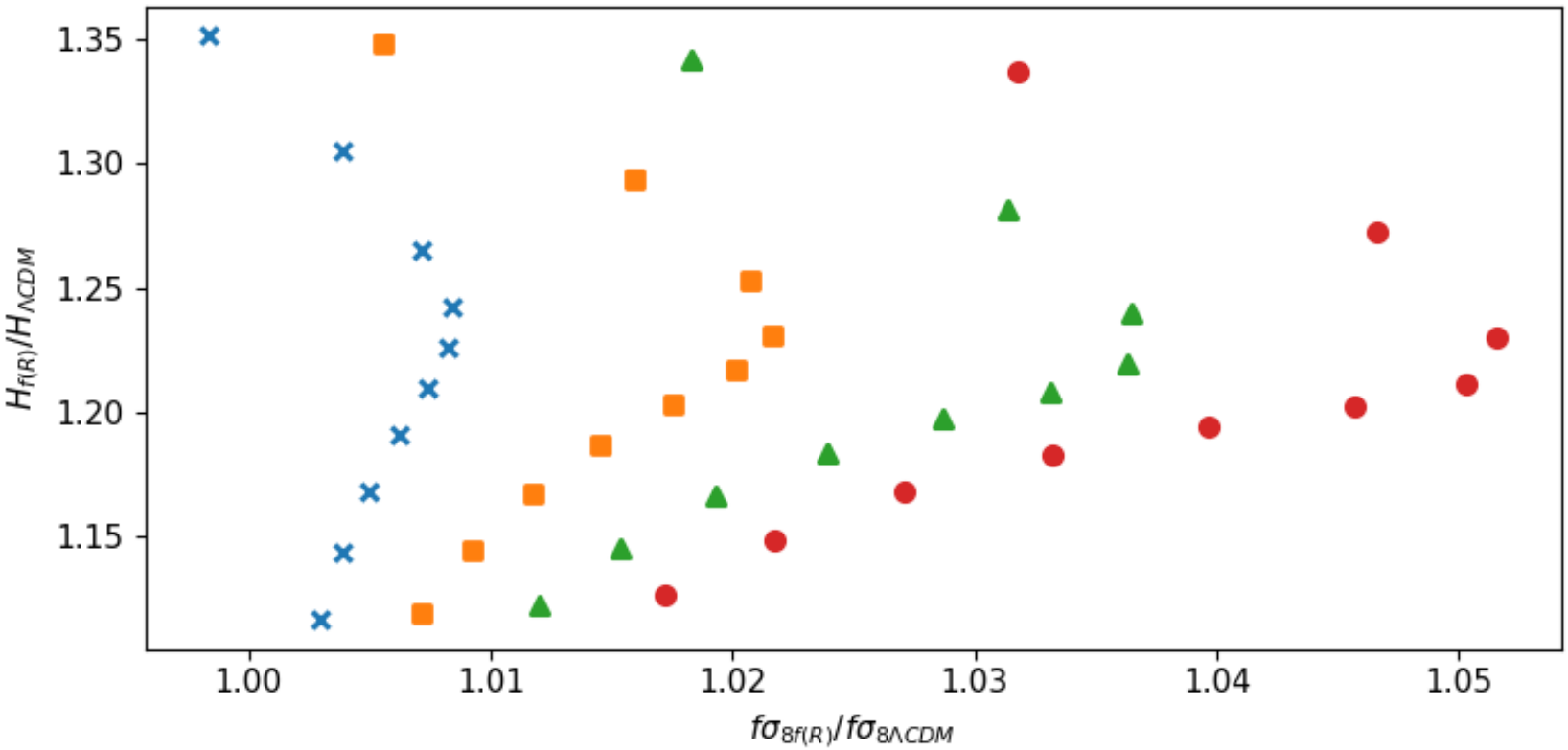


Figure: Curva $H/H_{LCDM} - f\sigma_{f(R)}$ para diferentes valores de λ

Curva $H - f\sigma_8$

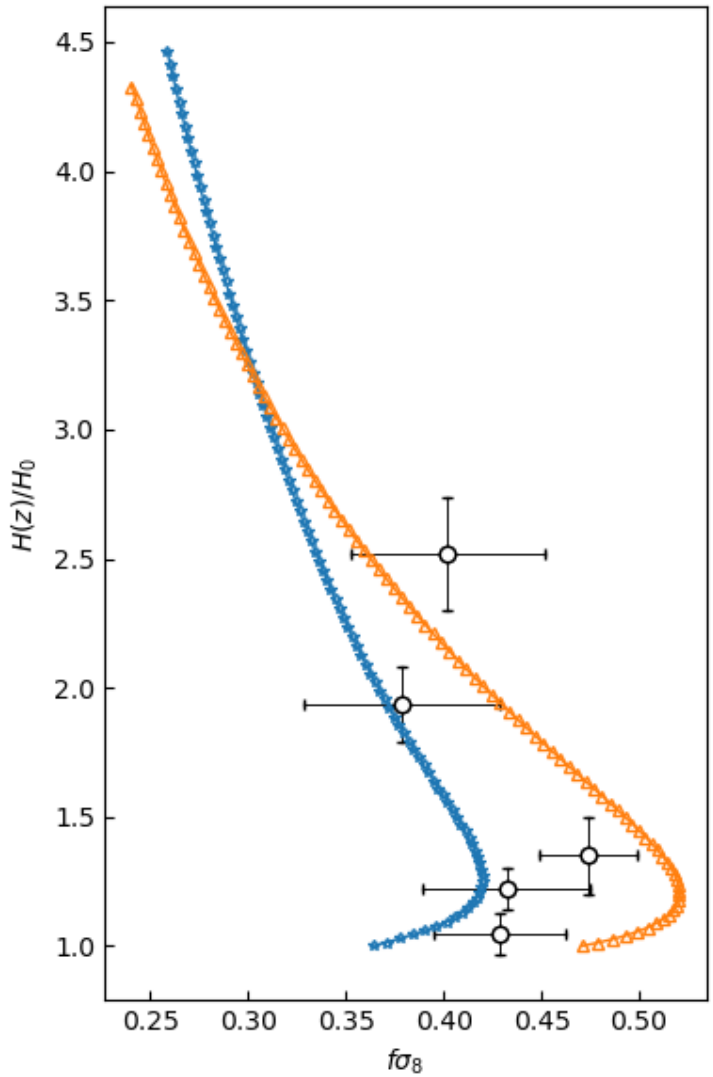


Figure: Curva $f - H$ para ΛCDM e o best-fit da $f(R)$ a partir de 3 parâmetros.

Resumo

Resumo do método

-Teoria de perturbações na Gravidade Modificada
$\rightarrow$ ponte entre parâmetros da teoria e observáveis cosmológicos
$\rightarrow$ Observáveis associados ao Background + observáveis associados às perturbações (H, $Omega_m$)
$\rightarrow$ best fit dos parâmetros utilizando MCMC em cima da Likelihood conjunta dos observáveis
$\rightarrow$ least square fit utilizando a curva conjunta

Work in progress...

- Ajustes na likelihood
- Outros métodos de exploração do espaço de parâmetros além de MCMC(?)
- Publicar!

Referências I

- A.D. Dolgov and M. Kawasaki, *Can modified gravity explain accelerated cosmic expansion?*, Physics Letters B **573** (2003), 1–4.
- Valerio Faraoni, *Modified gravity and the stability of de sitter space*, Physical Review D **72** (2005), no. 6.
- Eric V. Linder, *Cosmic growth and expansion conjoined*, Astroparticle Physics **86** (2017), 41–45.
- Jiro Matsumoto, Teppei Okumura, and Misao Sasaki, *New measures to test modified gravity cosmologies*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **2020** (2020), no. 7.
- A. A. Starobinsky, *Disappearing cosmological constant in f(r) gravity*, JETP Letters **86** (2007), no. 3, 157–163.

Referências II

Shinji Tsujikawa, *Matter density perturbations and effective gravitational constant in modified gravity models of dark energy*, Tech. report, 2007.

Winfried Zimdahl, Hermano E S Velten, and William C Algoner, *Matter Growth in Imperfect Fluid Cosmology*.