

Reconstruções Não-Paramétricas da Curvatura Cósmica

M. Lopes-Dias¹, C. Bengaly¹, A. da Cunha², R. Gonçalves² e J. Moraes²

¹ Observatório Nacional

² Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo

Trabalho apresentado no evento As Astrocientistas: III Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação, realizado entre os dias 31 de março e 4 de abril de 2025.

Abstract

Work presented at the event As Astrocientistas: III Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação, held between March 31 and April 4, 2025.

Palavras-chave: Cosmologia, Princípio Cosmológico, Curvatura Cósmica.

Keywords: Cosmology, Cosmological Principle, Cosmic Curvature.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53381](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53381)

1 Introdução

Desde o final da década de 1990 o modelo cosmológico padrão tem sido representado de forma satisfatória pelo modelo Λ CDM plano. Este modelo propõe que o Universo é dominado por matéria escura fria (responsável pela formação de estruturas cósmicas) e pela constante cosmológica Λ (associada à energia escura, que explica a expansão acelerada do Universo) ([1, 2]). O modelo Λ CDM tem tido sucesso em explicar observações cosmológicas, como a Radiação Cósmica de Fundo (CMB) ([3, 4]), as distâncias de luminosidade das Supernovas do Tipo Ia (SNe) ([5–7]) e as idades diferenciais das galáxias pelo método do Cronômetro Cósmico (CC) ([8]). No entanto, enfrenta problemas teóricos como problemas de ajuste fino e a coincidência cósmica, e observacionais como a tensão de $\sim 5\sigma$ nas medições da Constante de Hubble (H_0) entre observações primordiais e locais.

Diante desses desafios, é crucial testar os fundamentos físicos do modelo padrão atual, a Teoria da Relatividade Geral e o Princípio Cosmológico (que assume homogeneidade e isotropia em grandes escalas), pois qualquer desvio estatisticamente significativo exigiria uma reformulação do nosso entendimento ([9–11]).

O objetivo deste trabalho é realizar um

teste de consistência do Princípio Cosmológico, sendo este, um teste de consistência da métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), e desta forma analisar a curvatura cósmica em função do *redshift*.

2 Metodologia

Performamos dois testes nulos, propostos originalmente em [12], o primeiro para compreender se a curvatura do Universo é constante ao longo do *redshift*, ou seja, se a métrica FLRW é válida, e o segundo para identificar qual o tipo dessa curvatura:

Seguindo [12, 13],

$$\Omega_{k,0} = \frac{E^2(z)D'^2(z) - 1}{D^2(z)}, \quad (1)$$

se $\Omega_{k,0} \neq \text{constante} \Rightarrow \text{FLRW descartado}$.

E seguindo [14],

$$\mathcal{O}_k(z) \equiv E(z)D'(z) - 1, \quad (2)$$

se $\mathcal{O}_k(z) \neq 0 \Rightarrow \text{Universo Plano descartado}$.

$$\Omega_{k,0} \begin{cases} > 0 \text{ (aberto)} \\ = 0 \text{ (plano)} \\ < 0 \text{ (fechado)} \end{cases}, \quad \mathcal{O}_k \begin{cases} > 0 \text{ (aberto)} \\ = 0 \text{ (plano)} \\ < 0 \text{ (fechado)} \end{cases} \quad (3)$$

A distância comóvel, $D(z)$, é definida de forma adimensional a partir da distância de luminosidade ($d_L(z)$), da constante de Hubble (H_0) e da velocidade da luz (c); é definido também o parâmetro de Hubble reduzido, $E(z)$. Ambos são utilizados nas definições dos testes nulos, equações (1) e (2).

$$D(z) = \frac{H_0 d_L(z)}{c(1+z)}, \quad E(z) \equiv \frac{H(z)}{H_0}. \quad (4)$$

Usamos dados observacionais de Supernovas (SN) do Pantheon+ e SH0ES para o cálculo da quantidade de distância de luminosidade ($d_L(z)$), e os Cronômetros Cósmicos (CC) são utilizados para o cálculo do parâmetro de Hubble ($H(z)$).

Além disso, simulamos dados do parâmetro de Hubble, $H(z)$, a partir de medidas de Oscilações Acústicas de Bárions (BAO) que esperamos obter futuramente com levantamentos de *redshift* como o J-PAS ([15]), além de simulações de medidas de distância de luminosidade, $d_L(z)$, a partir de eventos de Ondas Gravitacionais (GW) seguindo as especificações do interferômetro LIGO ([16]).

Todos os testes nulos foram desenvolvidos com o uso do GAPP¹ (*Gaussian Process in Python*), foram reconstruídas as quantidades, $E(z)$, $D(z)$ e $D'(z)$, observadas e simuladas, para então calcularmos $\Omega_{k,0}$ e $\mathcal{O}_k(z)$. Esta é uma abordagem não-paramétrica dos dados, assim não precisamos assumir modelos cosmológicos, evitando o viés proveniente deles nas nossas análises. Nesta pesquisa foram utilizados reconstruções com 1000 pontos para o intervalo de *redshift* $0 < z < 2.5$.

3 Resultados

A partir das performances dos testes nulos discutidos na seção anterior, apresentamos nesta seção os resultados obtidos a partir de dados observacionais e simulados. O foco principal recai sobre a análise das quantidades $\Omega_{k,0}$ e $\mathcal{O}_k(z)$, bem como a reconstrução dos mensuráveis $E(z)$ e $D(z)$.

No caso dos dados observacionais, os resultados indicam que a curvatura cósmica é compatível com um Universo plano, $\Omega_{k,0} = 0$, dentro

de 1σ de nível de confiança. Além disso, o comportamento da quantidade $\mathcal{O}_k(z)$ permanece consistente com um cenário sem curvatura até 2σ , sugerindo compatibilidade com a métrica FLRW ao longo do intervalo de *redshift* analisado, veja primeiro painel da Figura 1.

Para os dados simulados, observamos uma redução significativa nas incertezas associadas tanto a $\Omega_{k,0}$ quanto a $\mathcal{O}_k(z)$, especialmente em altos *redshifts* ($z > 1.0$). Esse resultado evidencia o potencial de futuros levantamentos observacionais em aprimorar as restrições sobre a geometria do espaço-tempo (veja segundo painel da Figura 1). A combinação entre dados observacionais e simulados produz resultados consistentes com aqueles obtidos a partir dos dados simulados isoladamente, reforçando a robustez dos testes nulos aplicados, veja terceiro painel da Figura 1.

Por fim, analisamos as reconstruções das funções $E(z)$ e $D(z)$, obtidas a partir de diferentes sondas cosmológicas (painéis inferiores da Figura 1). Em ambos os casos, os resultados observacionais e simulados apresentam bom acordo entre si, fornecendo suporte adicional às análises de curvatura realizadas nesta seção.

4 Conclusões

Neste trabalho não foram encontradas evidências para um Universo não-plano, assim como não encontramos nenhuma evidência para uma evolução da curvatura cósmica ao longo do *redshift*. No entanto, as incertezas obtidas com os dados observacionais são grandes, especialmente em altos *redshifts* ($z > 1.0$) devido à escassez de dados nesta faixa.

Então, para prevermos o quanto estas incertezas podem ser melhoradas com dados que são plausíveis de serem obtidos na próxima década, realizamos simulações baseadas nas especificações do LIGO e do J-PAS, obtendo incertezas muito melhores em ambos os testes nulos. Este estudo contribuiu para a literatura ao resultar na publicação do artigo [17].

¹<https://github.com/astrobengaly/GaPP>

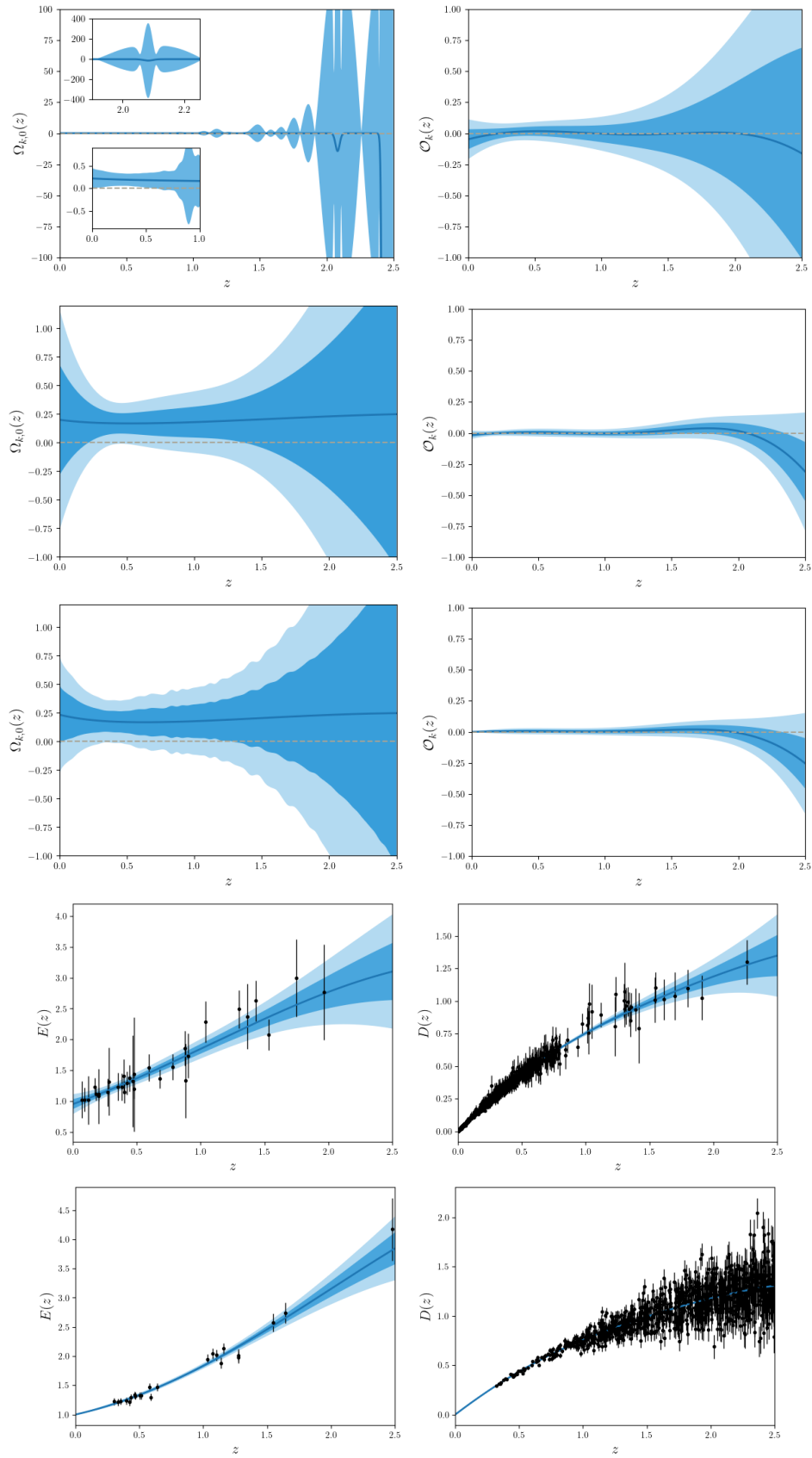


Figura 1: Reconstruções da curvatura cósmica para dados observacionais, simulados e análise conjunta, respectivamente. À esquerda apresenta-se $\Omega_{k,0}$ e à direita o diagnóstico nulo $\mathcal{O}_k(z)$. As figuras inferiores mostram as reconstruções de $E(z)$ e $D(z)$.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES e a FAPERJ pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Sobre os autores

M. Lopes-Dias (marianadias@on.br), C. Bengaly, A. da Cunha, R. Gonçalves e J. Morais são especialistas na área de Cosmologia realizando pesquisa sobre temas como o Princípio Cosmológico, escala de homogeneidade do Universo, parâmetros cosmográficos e ondas gravitacionais.

Referências

- [1] A. G. Riess et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, **116**(3), 1009 (1998). [ArXiv:astro-ph/9805201](#).
- [2] S. Perlmutter et al., *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, *Astrophys. J.* **517**(2), 565 (1999). [ArXiv:astro-ph/9812133](#).
- [3] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, *Astron. Astrophys.* **641**, A1 (2020). [ArXiv:1807.06205](#).
- [4] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020). [Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021)]. [ArXiv:1807.06209](#).
- [5] D. Brout et al., *The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints*, *Astrophys. J.* **938**, 110 (2022).
- [6] D. Rubin et al., *Union Through UNITY: Cosmology with 2,000 SNe Using a Unified Bayesian Framework*, *Astrophys. J.* **986**(2), 231 (2025). [ArXiv:2311.12098](#).
- [7] T. M. C. Abbott et al., *The Dark Energy Survey: Cosmology Results with ~ 1500 New High-redshift Type Ia Supernovae Using the Full 5 yr Data Set*, *Astrophys. J. Lett.* **973**(1), L14 (2024). [ArXiv:2401.02929](#).
- [8] M. Moresco et al., *Unveiling the Universe with emerging cosmological probes*, *Living Rev. Rel.* **25**(1), 6 (2022). [ArXiv:2201.07241](#).
- [9] C. Clarkson e R. Maartens, *Inhomogeneity and the foundations of concordance cosmology*, *Class. Quant. Grav.* **27**, 124008 (2010). [ArXiv:1005.2165](#).
- [10] R. Maartens, *Is the Universe homogeneous?*, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* **369**, 5115 (2011). [ArXiv:1104.1300](#).
- [11] C. Clarkson, *Establishing homogeneity of the universe in the shadow of dark energy*, *Comptes Rendus Physique* **13**, 682 (2012). [ArXiv:1204.5505](#).
- [12] C. Clarkson, B. Bassett e T. H.-C. Lu, *A general test of the Copernican Principle*, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 011301 (2008). [ArXiv:0712.3457](#).
- [13] C. Clarkson, M. Cortes e B. A. Bassett, *Dynamical Dark Energy or Simply Cosmic Curvature?*, *JCAP* **08**, 011 (2007). [ArXiv:astro-ph/0702670](#).
- [14] R.-G. Cai, Z.-K. Guo e T. Yang, *Null test of the cosmic curvature using $H(z)$ and supernovae data*, *Phys. Rev. D* **93**(4), 043517 (2016). [ArXiv:1509.06283](#).
- [15] N. Benitez et al., *J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey* (2014). [ArXiv:1403.5237](#).
- [16] R. Abbott et al., *GWTC-2.1: Deep extended catalog of compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the first half of the third observing run*, *Phys. Rev. D* **109**(2), 022001 (2024). [ArXiv:2108.01045](#).
- [17] M. L. S. Dias et al., *Non-parametric reconstructions of cosmic curvature: current constraints and forecasts* (2024). [ArXiv:2411.19252](#).