

# DESI 2024:

## Um possível indício do fim da constante cosmológica?

por Hermano Velten<sup>1</sup> e Rodrigo von Marttens<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto

<sup>2</sup>Universidade Federal da Bahia

Um dos resultados mais intrigantes da cosmologia dos últimos anos foi publicado na plataforma arXiv<sup>1</sup> no mês de abril deste ano [1]. Trata-se do primeiro resultado cosmológico obtido pela colaboração DESI<sup>2</sup> (Dark Energy Spectroscopic Instrument) a partir da medida das impressões deixadas pelas oscilações acústicas de bárions na distribuição de galáxias e quasares. Utilizaremos a sigla BAO para nos referirmos a este observável cosmológico.<sup>3</sup>

*Mas o que seria o BAO?* A evolução do universo já foi descrita em diversos artigos publicados nos Cadernos de Astronomia. Para descrever a física do BAO, estamos interessados nos momentos que se antecederam à emissão da Radiação Cósmica de Fundo (CMB<sup>4</sup>), quando o universo tinha apenas 380.000 anos.<sup>5</sup> Até este instante, o universo é composto por uma mistura de fótons, elétrons e prótons, na qual fótons e elétrons majoritariamente interagem via espalhamento Thompson: o chamado plasma primordial. As primeiras perturbações de densidade geradas na matéria bariônica são então fortemente suprimidas pela pressão de radiação deste plasma, causando, dessa maneira, uma espécie de oscilação na distribuição de densidade. Esta oscilação, por sua vez, acaba por viajar neste plasma como ondas sonoras se propagam em um meio material, de maneira análoga à propagação de ondas na superfície de um lago ao realizarmos uma pequena perturbação em sua superfície. Quando o espalhamento Thompson deixa de ser efetivo e os fótons ficam livres, formando a CMB, a matéria começa a se aglomerar e formar estruturas assim como descrito na Ref. [2]. Como resultado, quando observamos hoje uma região de maior densidade do universo, é possível observar em seu entorno um padrão de distribuição esférica de matéria resultante da onda que se propagou a partir de um ponto denso no universo primordial. Isto acaba por criar uma leve tendência de encontrar mais galáxias nesta casca esférica, de cerca de 500 milhões de anos luz de raio. Há, assim, um excesso de probabilidade de encontrar galáxias separadas por essa distância no universo. Tecnicamente, isto gera um pico na chamada função de correlação de dois pontos da distribuição de galáxias.<sup>6</sup> Este fenômeno foi detectado pela primeira vez, em 2005, pelas colaborações Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and Anglo-Australian Telescope Two-degree Field Galaxy Redshift Survey. Diversos projetos observacionais subsequentes também confirmaram este fenômeno [3, 4].

*O que é o projeto DESI?* Os chamados grandes *surveys* são peças fundamentais da pesquisa atual na área de Cosmologia/Astrofísica. No caso específico do DESI, ele consiste em uma grande colaboração envolvendo cerca de 450 pesquisadores de mais de 70 instituições científicas. Em um período de 5 anos de operação, serão medidos os espectros de cerca de 30 milhões de galáxias compreendendo um terço do céu noturno. Trata-se de

<sup>1</sup><https://arxiv.org/>.

<sup>2</sup><https://www.desi.lbl.gov/>.

<sup>3</sup>Em inglês, Baryon Acoustic Oscillations (BAO)

<sup>4</sup>Em inglês, Cosmic Microwave Background.

<sup>5</sup>Recomendamos ao leitor a edição especial do Cadernos de Astronomia sobre o universo primordial, disponível em <https://periodicos.ufes.br/astronomia/issue/view/1562>.

<sup>6</sup>Recomendamos o vídeo publicado pela colaboração ARC Centre of Excellence for All-sky Astrophysics (CAASTRO) para a visualização deste fenômeno <https://www.youtube.com/watch?v=jpXuYc-wzk4&t=8s>.

um enorme volume de dados que perfazem os últimos 11 bilhões de anos da história do universo. Tudo isso é feito por meio de um novo sistema de captura de espectros montado no telescópio refletor Mayall, com espelho de 4 metros de abertura, no complexo do observatório nacional Kitt Peak, a 90 quilômetros da cidade de Tucson, no estado do Arizona, Estados Unidos. Este complexo conta com 22 telescópios, sendo o Mayall o maior deles. Apesar de o telescópio Mayall ter sido montado em 1973, este novo sistema de captura de espectros foi montado em 2019. Os resultados apresentados na Ref. [1] foram extraídos das observações ocorridas entre 14 de maio de 2021 e 14 de junho de 2022.

*Quais são os novos resultados que a colaboração DESI apresenta na Ref. [1]?* Para responder a esta pergunta, vamos relembrar a dinâmica do modelo  $\Lambda$ CDM, considerado o modelo padrão para descrever a evolução cosmológica recente. Neste modelo, a taxa de expansão do universo é descrita pela expressão

$$H = H_0 \sqrt{\frac{\Omega_{m0}}{a^3} + 1 - \Omega_{m0}}, \quad (1)$$

onde  $H_0$  é a constante de Hubble,  $\Omega_{m0}$  é a densidade fracionária da matéria (bárions + matéria escura) e  $a$  é o fator de escala do universo. Lembre-se que é usual normalizar o fator de escala, ou seja, seu valor hoje vale  $a_0 = 1$ . A contribuição da constante cosmológica se dá na combinação  $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_{m0}$ . A contribuição fracionária de cada componente  $i$  pode ser escrita como

$$\Omega_i(a) = \frac{\Omega_{i0}}{a^{3(1+w_i)}}. \quad (2)$$

Desta expressão, fica claro que se o parâmetro da equação de estado  $w_i = p_i/\rho_i$ , que mede a razão entre a pressão e densidade da componente  $i$ , for  $w_i = -1$ , temos uma contribuição constante para a densidade, isto é, uma densidade que não muda com o tempo independente da expansão do universo. Este caso representa justamente a equação de estado associada à constante cosmológica  $\Lambda$  ( $w_\Lambda = -1$ ) para descrever a energia escura do universo e, conseqüentemente, sua atual fase de expansão acelerada. De fato, a constante cosmológica parece ser o candidato ideal para descrever a energia escura, uma vez que pode ser identificada com a energia do vácuo. No entanto, esta abordagem ainda possui lacunas tanto do ponto de vista teórico [5] quanto observacional [6].

Existem, no entanto, propostas que a energia escura poderia ser descrita por um fluido com uma equação de estado variável, isto é, dependente do tempo. A proposta mais utilizada para esta hipótese é utilizar a parametrização CPL (Chevallier-Polarsky-Linder) [7, 8], que ganhou destaque ao ser considerada pela Dark Energy Task Force (DETF) [9]. A parametrização CPL é dada pela seguinte expressão:

$$w_{de} = w_0 + w_a(1 - a). \quad (3)$$

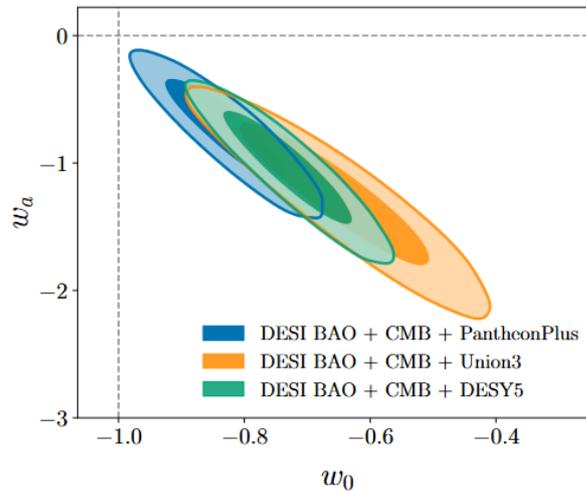
Note que a dependência temporal desta equação de estado está associada ao parâmetro  $w_a$ , que deve ser diferente de zero. Até este momento, todas as principais análises estatísticas para seleção de parâmetros cosmológicos, feitas com diferentes observáveis cosmológicos, indicavam consistência com  $w_a = 0$  em pelo menos  $2\sigma$  de nível de confiança [10]. Isto significa que nenhum resultado anterior proveniente de observações cosmológicas havia indicado, com uma probabilidade considerável, a possibilidade de que a equação de estado da energia escura pudesse variar com o tempo.

Por outro lado, os resultados apresentados na referência [1] indicam, pela primeira vez, uma preferência por  $w_a \neq 0$  que pode atingir até  $3.9\sigma$  de nível de confiança. Além da análise com BAO, a colaboração DESI também apresentou a análise combinando seus dados de BAO com dados de supernovas do tipo Ia e CMB. Para as supernovas do tipo Ia foram consideradas as três amostras de dados mais atuais disponíveis publicamente: PantheonPlus [11], Union 3 [12] e DES-SN5YR [13]. Já para a CMB, foi utilizado o último resultado do satélite Planck (2018), que consiste nos espectros de anisotropia da temperatura, polarização, correlação cruzada entre

**Tabela 1:** Resultado da análise de inferência de parâmetros cosmológicos apresentados pelo DESI. Adaptado da Tabela 3 da Ref. [1].

| Resultados Cosmológicos DESI 2024 |                    |                         |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Dados Observacionais              | $w_0$              | $w_a$                   |
| DESI + CMB + PantheonPlus         | $-0.827 \pm 0.063$ | $-0.75^{+0.29}_{-0.25}$ |
| DESI + CMB + Union 3              | $-0.65 \pm 0.10$   | $-1.27^{+0.40}_{-0.34}$ |
| DESI + CMB + DES-SN5Y5            | $-0.727 \pm 0.067$ | $-1.05^{+0.31}_{-0.27}$ |

temperatura e polarização e lenteamento fraco da CMB [10].<sup>7</sup> De maneira geral, considerando diferentes combinações entre os conjuntos de dados mencionados, os resultados reportados pela colaboração DESI é consistente com  $w_0 < -1$  e  $w_a < 0$ . Em detalhe, os resultados das análises combinadas obtidos pela colaboração DESI para os parâmetros  $w_0$  e  $w_a$  são mostrados na Tabela 1. As curvas de contorno com níveis de  $1\sigma$  e  $2\sigma$  para o plano  $w_0 \times w_a$  obtidos dessas mesmas análises são mostradas na Figura 1. Nesta figura, o caso em que a energia escura não varia com o tempo é representado pela linha tracejada horizontal ( $w_a = 0$ ) que, como pode ser visto, está totalmente fora da região preferida pelos dados. Em particular, o modelo  $\Lambda$ CDM é representado pelo no encontro da linha tracejada horizontal com a linha tracejada vertical ( $w_a = 0$  e  $w_0 = -1$ ), que também está excluído da região preferida pelos dados.

**Figura 1:** Contornos de 68% e 95% de confiança estatística no plano  $w_0 \times w_a$  para diferentes combinações de dados cosmológicos. Cada cor representa a combinação dos dados de DESI BAO e radiação cósmica de fundo (CMB), somados a uma amostra de Supernovas tipo Ia. Figura retirada da Ref. [1].

Reforçamos que ainda é cedo para concluir definitivamente que a energia escura é, de fato, uma componente com variação temporal e, portanto, que a famosa constante cosmológica  $\Lambda$  estaria descartada. No entanto, é natural que estes resultados despertem o interesse da comunidade acadêmica neste tópico. Dessa forma, tão logo os resultados do DESI se tornaram públicos, em abril de 2024, vários grupos de pesquisa se debruçaram sobre estes dados e várias discussões interessantes surgiram na literatura nos últimos 4 meses. Em particular, destacamos resultados de análises com diferentes modelos cosmológicos, que parecem confirmar que os resultados obtidos pelo DESI não são dependentes da parametrização escolhida para a energia escura [16], e os debates acerca dos seguintes tópicos:

<sup>7</sup>Vale ressaltar que para o lenteamento fraco da CMB foi utilizada a *pipeline* mais atual *NPIPE PR4 Planck CMB lensing reconstruction* [14] combinada com o Data Release 6 do Atacama Cosmology Telescope (ACT) [15].

- o papel dos dados de galáxias luminosas vermelhas (LRG<sup>8</sup>) para o resultado final do DESI<sup>9</sup> [17];
- dependência dos resultados do DESI com a escolha dos *priors* estatísticos [18];
- possibilidade de sistemáticos nos dados de supernovas do tipo Ia [19];

Vale ressaltar que este é apenas o resultado do primeiro *data release* do DESI, contendo apenas dados de BAO. É esperado que o DESI divulgue em breve a análise desenvolvida com a totalidade do espectro de potência da matéria (*full shape*) para o primeiro *data release*. Esta análise e as próximas análises lançadas com dados futuros serão cruciais para a confirmação deste primeiro resultado.

## Referências

- [1] A. G. Adame et al., *DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations* (2024). [ArXiv:2404.03002](#).
- [2] H. Velten, *Matéria escura, energia escura e a busca por uma nova teoria para a gravitação*, *Cadernos de Astronomia* **1**(1), 40 (2020).
- [3] I. J. Lewis et al., *The Anglo-Australian Observatory 2dF facility*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **333**(2), 279 (2002). [ArXiv:astro-ph/0202175](#).
- [4] D. G. York et al., *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*, *Astronomical Journal* **120**, 1579 (2000). [ArXiv:astro-ph/0006396](#).
- [5] S. Weinberg, *The Cosmological constant problems*, in *4th International Symposium on Sources and Detection of Dark Matter in the Universe (DM 2000)* (2000), 18–26. [ArXiv:astro-ph/0005265](#).
- [6] A. G. Riess, *The expansion of the Universe is faster than expected*, *Nature Reviews Physics* **2**(1), 10 (2019). [ArXiv:2001.03624](#).
- [7] M. Chevallier e D. Polarski, *Accelerating universes with scaling dark matter*, *International Journal of Modern Physics D* **10**(02), 213 (2001). [ArXiv:gr-qc/0009008](#).
- [8] E. V. Linder, *Exploring the expansion history of the universe*, *Physical Review Letters* **90**(9), 091301 (2003). [ArXiv:astro-ph/0208512](#).
- [9] A. Albrecht et al., *Report of the Dark Energy Task Force* (2006). [ArXiv:astro-ph/0609591](#).
- [10] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020), Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021). [ArXiv:1807.06209](#).
- [11] D. Brout et al., *The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints*, *The Astrophysical Journal* **938**(2), 110 (2022). [ArXiv:2202.04077](#).
- [12] D. Rubin et al., *Union Through UNITY: Cosmology with 2,000 SNe Using a Unified Bayesian Framework* (2023). [ArXiv:2311.12098](#).
- [13] B. O. Sánchez et al., *The Dark Energy Survey Supernova Program: Light curves and 5-Year data release* (2024). [ArXiv:2406.05046](#).
- [14] J. Carron, M. Mirmelstein e A. Lewis, *CMB lensing from Planck PR4 maps*, *JCAP* **09**, 039 (2022). [ArXiv:2206.07773](#).

---

<sup>8</sup>Em inglês, Luminous Red Galaxies.

<sup>9</sup>Conforme pode ser visto na Figura 1 da Ref. [1], os dados que apresentam maior desvio com relação à previsão do modelo  $\Lambda$ CDM são os dados provenientes das LRGs, enquanto os outros dados apresentam boa concordância.

- 
- [15] M. S. Madhavacheril et al., *The Atacama Cosmology Telescope: DR6 Gravitational Lensing Map and Cosmological Parameters*, *The Astrophysical Journal* **962**(2), 113 (2024). [ArXiv:2304.05203](#).
- [16] W. Giarè et al., *Robust Preference for Dynamical Dark Energy in DESI BAO and SN Measurements* (2024). [ArXiv:2407.16689](#).
- [17] Z. Wang et al., *The role of LRG1 and LRG2's monopole in inferring the DESI 2024 BAO cosmology* (2024). [ArXiv:2405.02168](#).
- [18] V. Patel e L. Amendola, *Comments on the prior dependence of the DESI results* (2024). [ArXiv:2407.06586](#).
- [19] G. Efstathiou, *Evolving Dark Energy or Supernovae Systematics?* (2024). [ArXiv:2408.07175](#).