The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

# A régua cósmica mais precisa do DESI e um «talvez» cuidadoso sobre a energia escura

*O DESI mediu a história da expansão do Universo com a régua de oscilações acústicas de bariões mais precisa até agora, usando seis milhões de objetos. Sozinha, essa régua concorda com o modelo padrão em que a energia escura é constante. Só quando o DESI é combinado com o fundo cósmico de micro-ondas e uma amostra de supernovas aparece uma preferência por energia escura evolutiva — entre 2,6$\sigma$ e 3,9$\sigma$ consoante as supernovas acrescentadas, abaixo do limiar exigido pelos físicos para uma descoberta e sensível aos dados com que é combinado. Uma pergunta real tornada precisa, não uma resposta.*

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations*, DESI Collaboration: A. G. Adame, J. Aguilar, S. Ahlen, S. Alam, D. M. Alexander, et al., Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP) 02 (2025) 021 · DOI: 10.1088/1475-7516/2025/02/021

# Uma régua feita de som

No Universo primitivo, antes de existirem estrelas, o plasma quente de matéria normal e luz ressoava. Ondas de pressão propagavam-se através dele a mais de metade da velocidade da luz, até o Universo arrefecer o suficiente para se formarem átomos e essa ressonância parar — congelando uma ténue distância preferencial na distribuição da matéria. Essa distância, o *horizonte sonoro*, corresponde hoje a cerca de 150 megaparsecs (aproximadamente 490 milhões de anos-luz) e aparece como um ligeiro excesso de galáxias separadas por essa distância, em todas as direções e épocas. Os cosmólogos chamam-lhe oscilação acústica de bariões, ou BAO, e usam-na como régua padrão: medindo o tamanho aparente dessa escala congelada no céu a diferentes distâncias, traça-se a velocidade a que o Universo se expandiu ao longo da sua história.

O Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) foi construído para medir essa régua melhor do que qualquer outro instrumento. A sua primeira publicação de dados mapeia a escala BAO em galáxias, quasares e na floresta de Lyman-alfa de nuvens de gás distantes — mais de seis milhões de objetos, distribuídos por sete intervalos de redshift entre 0,1 e 4,2. Para manter as expectativas humanas fora do resultado, a equipa executou a análise *às cegas*, escondendo de si própria a resposta cosmológica até os métodos estarem fixados. É, por larga margem, a medição BAO mais precisa alguma vez realizada.

O DESI está instalado no telescópio Nicholas U. Mayall de 4 metros, em Kitt Peak, Arizona. O instrumento alimenta espectrógrafos com milhares de fibras óticas, transformando posições no céu em espectros e redshifts para milhões de galáxias e quasares.

KPNO/NOIRLab/NSF/AURA/P. Marenfeld CC BY 4.0

### O que é o DESI

O **Dark Energy Spectroscopic Instrument** é um espectrógrafo instalado no telescópio Nicholas U. Mayall de 4 metros, em Kitt Peak, Arizona. Não observa diretamente a energia escura — nada consegue fazê-lo, já que a energia escura não emite luz. Em vez disso, regista simultaneamente os espectros de cerca de 5 000 galáxias e quasares, lê o redshift de cada objeto a partir do alongamento da sua luz causado pela expansão do Universo e constrói um mapa tridimensional de milhões deles. A energia escura é então inferida a partir da forma como esse mapa mostra a expansão cósmica a mudar ao longo do tempo. Para toda a cadeia — das fibras robóticas à régua acústica — veja Como funciona o DESI.

A manchete que mais circulou a partir destes dados dizia que a energia escura talvez não seja constante — que a coisa misteriosa que acelera a expansão do Universo pode estar a *enfraquecer* com o tempo, abrindo uma fissura no modelo cosmológico padrão. A afirmação não é inventada, mas é fácil lê-la em excesso. A versão honesta é mais específica e mais interessante: a régua do próprio DESI, sozinha, concorda com o modelo mais simples. O indício de algo novo só aparece quando se combina o DESI com outros dados — e a força do indício depende de que outros dados se escolhem.

A régua das oscilações acústicas de bariões do DESI, por si só, é compatível com energia escura constante (uma constante cosmológica). A preferência por energia escura *evolutiva* só emerge quando o DESI é combinado com o fundo cósmico de micro-ondas e uma amostra de supernovas — e a força dessa preferência muda consoante a amostra de supernovas utilizada.

### Régua padrão e as duas formas de a energia escura poder variar

A escala BAO é uma *régua padrão*: como conhecemos o seu comprimento real a partir da física do Universo primitivo, comparar esse comprimento com o tamanho aparente da escala a uma dada distância diz-nos quanto o Universo tinha expandido até então. Medida a muitas distâncias, a régua traça toda a história da expansão — precisamente aquilo que a energia escura governa.

No modelo padrão, chamado ΛCDM, a energia escura é uma *constante cosmológica*: uma densidade fixa de energia do espaço vazio que nunca muda. Os físicos descrevem o seu comportamento com um parâmetro de «equação de estado», $w$, que para uma verdadeira constante cosmológica é exatamente $-1$, em todo o lado e em todos os momentos.

Para testar isso, pode relaxar-se a hipótese de duas formas. A mais simples é deixar $w$ assumir outro valor constante — ainda fixo no tempo — o modelo «wCDM». A forma mais rica é permitir que $w$ mude à medida que o Universo se expande, descrito por dois números: $w_0$, o valor atual, e $w_a$, a velocidade a que varia. Este modelo «$w_0w_a$CDM» reduz-se a ΛCDM num único ponto, $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Uma preferência por $w_0$ maior do que $-1$ e $w_a$ negativo é aquilo que aqui significa «energia escura evolutiva»: energia escura que era mais repulsiva no passado e está agora a perder força.

# O que fizeram os autores

- Mediram a escala BAO com o primeiro ano de dados do DESI — galáxias, quasares e floresta de Lyman-alfa — em mais de seis milhões de objetos, distribuídos por sete intervalos de redshift entre $0.1 < z < 4.2$.
- Executaram a análise **às cegas**, ocultando o resultado cosmológico até a metodologia estar fixada, para proteger contra enviesamento de confirmação.
- Ajustaram o modelo ΛCDM plano padrão apenas aos BAO do DESI e depois em combinação com um prior de nucleossíntese primordial e o fundo cósmico de micro-ondas (CMB) do Planck e ACT.
- Alargaram o modelo de duas formas: um $w$ constante para a energia escura (wCDM) e um $w_0 w_a$ variável no tempo ($w_0 w_a$CDM).
- Testaram o modelo variável no tempo combinando DESI+CMB, sucessivamente, com três compilações diferentes de supernovas do tipo Ia — Pantheon+, Union3 e DES-SN5YR — em vez de escolher apenas uma.
- Impuseram limites à soma das massas dos neutrinos e verificaram como esses limites se deslocam quando se permite que o fundo de energia escura varie.

# O que encontraram

- **Os BAO do DESI, sozinhos, são compatíveis com o modelo padrão.** Dão uma densidade de matéria $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ e, quando se permite à energia escura um $w$ constante, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — praticamente em cima do valor $-1$ da constante cosmológica.
- Combinado com o CMB e o seu efeito de lente, o DESI dá $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ e uma constante de Hubble $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s$^{-1}$ Mpc$^{-1}$ ($68.52 \pm 0.62$ quando combinado, em alternativa, com nucleossíntese e a escala acústica do CMB).
- **No modelo variável no tempo, as combinações preferem energia escura evolutiva** — $w_0 > -1$ e $w_a < 0$. A preferência é de $2.6\sigma$ para DESI+CMB e, quando se acrescenta uma amostra de supernovas, passa a $2.5\sigma$, $3.5\sigma$ ou $3.9\sigma$ para Pantheon+, Union3 ou DES-SN5YR, respetivamente (sigma mede quão longe um resultado se encontra da expectativa do modelo padrão; $5\sigma$ é o limiar convencional para anunciar uma descoberta, e não significa que a interpretação esteja correta — guia).
- Deixando-a livre, a soma das massas dos neutrinos fica fortemente limitada — abaixo de 0,072 eV (95% de confiança) para DESI+CMB — mas o artigo é explícito em dizer que este limite se torna substancialmente mais fraco se se permitir que o fundo de energia escura se afaste de ΛCDM.

# O que isto não demonstra

- **Não** mostra que a energia escura esteja a evoluir. A régua do próprio DESI é compatível com uma constante cosmológica; o indício de evolução só aparece em ajustes *combinados* e apenas no modelo mais rico com dois parâmetros.

- **Não** significa «ΛCDM morreu» nem «Einstein estava errado». O número mais forte, $3.9\sigma$, fica abaixo da convenção de $5\sigma$ exigida pelos físicos antes de chamar a algo uma descoberta — e o modelo padrão continua a ajustar bem o DESI sozinho.
- O resultado **não** é independente da amostra. Trocar a compilação de supernovas move a significância de $2.5\sigma$ para $3.9\sigma$ — mais de um sigma inteiro. Um sinal cujo tamanho depende tanto do conjunto de dados externo acrescentado é um indício a investigar, não uma medição para dar por garantida.
- A inclinação do DESI *sozinho* para $w_0 > -1$ é impulsionada **em parte por um único ponto anómalo** — o intervalo de galáxias a redshift 0,51, que fica ligeiramente alto face a ΛCDM. Mas é aqui que o artigo faz o trabalho de casa: trata esse ponto como uma flutuação estatística e mostra que substituir *todas* as medições do DESI a baixo redshift ($z < 0.6$) pelas antigas medições do SDSS deixa o resultado sobre energia escura inalterado. O ponto estranho puxa o DESI isoladamente; **não** sustenta o indício combinado. (Grupos independentes analisaram depois mais profundamente o seu papel.) Portanto, esta ressalva funciona no sentido oposto ao que às vezes se conta: o resultado foi submetido a um teste de robustez contra o seu dado mais anómalo e resistiu.
- O limite da massa dos neutrinos **não** é um veredicto independente do modelo. Só é apertado se a expansão de fundo for mantida em ΛCDM; relaxe-se essa hipótese e o limite relaxa também.

# Quão forte é a evidência

- **Muito forte enquanto medição de distâncias.** A régua BAO é uma das ferramentas mais limpas da cosmologia, a do DESI é a mais precisa até agora e a análise cega é exatamente a salvaguarda desejável contra ler nos dados a resposta que se espera encontrar.
- **Genuinamente intrigante, mas não decisiva, enquanto afirmação sobre energia escura.** Uma preferência de $2.6\sigma$ em DESI+CMB, que sobe para $3.9\sigma$ com a amostra de supernovas mais restritiva, é o tipo de resultado que justifica mais tempo de telescópio — não o tipo que derruba um modelo. A razão honesta para cautela é a variação entre amostras de supernovas; para crédito dos autores, eles verificaram também que o ponto BAO mais anómalo não conduz o resultado — exatamente o trabalho que uma afirmação deste tipo exige.
- O artigo é cuidadoso consigo próprio: relata a significância de três formas em vez de citar apenas a maior e assinala a dependência do modelo no resultado sobre neutrinos. O exagero, quando existe, está na recontagem, não no artigo.

# Porque importa

Durante um quarto de século, «energia escura» e «constante cosmológica» foram usados quase como sinónimos, porque todas as medições eram compatíveis com um $w$ exatamente igual a $-1$. O DESI é o primeiro conjunto de dados suficientemente preciso para, combinado com outros, sequer *perguntar* se esse $-1$ se desloca — e obter uma resposta que não seja um simples não. É uma mudança real naquilo que os dados conseguem fazer, e por isso o resultado merece atenção. Mas a mesma precisão permite ver quão condicional é o indício: vivo em algumas combinações de dados, silencioso noutras

e sensível, sobretudo, ao catálogo de supernovas emparelhado com o DESI. A postura correta não é desprezar o resultado nem anunciar uma revolução cedo demais. É acompanhar a próxima publicação maior do DESI — DR2, já publicada em 2025 — e as amostras independentes de supernovas, e ver se a deriva se fortalece ou desaparece. É este o aspeto de um verdadeiro «talvez» em cosmologia, e merece ser relatado como um talvez.

## Resumo claro

O DESI mediu a história da expansão do Universo com a melhor régua de oscilações acústicas de bariões já construída, usando seis milhões de objetos. Sozinha, essa régua concorda com o modelo padrão em que a energia escura é uma constante. Combinando-a com o fundo cósmico de micro-ondas e uma amostra de supernovas, emerge uma preferência por energia escura que muda ao longo do tempo — entre $2.6\sigma$ e $3.9\sigma$, dependendo das supernovas acrescentadas. É um indício real e interessante, não uma descoberta: continua abaixo do limiar exigido pelos físicos e varia com os dados de supernovas que se juntam ao DESI. A energia escura pode estar a evoluir. O DESI tornou essa pergunta suficientemente precisa para valer a pena fazê-la — ainda não a respondeu.

## Fontes

DESI Collaboration, arXiv:2404.03002 (published in JCAP)
https://arxiv.org/abs/2404.03002

DESI Collaboration, JCAP 02 (2025) 021, DOI 10.1088/1475-7516/2025/02/021
https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021