



The CLEAN PAPER

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

DESI 最精确的宇宙标尺，以及暗能量可能演化的一个审慎信号

DESI 利用六百万个天体，用迄今最精确的重子声学标尺测量宇宙的膨胀史。单看这把标尺，结果与暗能量为常数的标准模型一致。只有把 *DESI* 与宇宙微波背景及超新星样本结合后，才会出现暗能量随时间演化的偏好；显著性依加入哪一组超新星数据而落在 2.6σ 到 3.9σ ，仍低于物理学界宣称发现的门槛，而且会随搭配数据而变。这是一个被测得更精确的真实问题，而不是答案。

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

一把由声音留下的标尺

宇宙早期，在恒星出现之前，普通物质与光形成的高温等离子体曾经“鸣响”。压力波以超过光速一半的速度在其中传播，直到宇宙冷却到足以形成原子，振荡才停止——并把一个微弱但偏好的距离尺度冻结在物质分布里。今天，这个距离，也就是声学视界，大约是 1.5 亿秒差距（约 4.9 亿光年）；在各个方向、各个时代的星系分布中，都能看到相隔这个尺度的星系略为过量。宇宙学家把它称为重子声学振荡（baryon acoustic oscillation, BAO），并把它当成标准尺：测出这个冻结尺度在不同距离上看起来有多大，就能描绘宇宙在整段历史中膨胀得有多快。

暗能量光谱仪（Dark Energy Spectroscopic Instrument, DESI）就是为了把这把标尺测得比以往任何工作都更精确。它的第一批数据利用星系、类星体，以及遥远气体云的 Lyman-alpha forest 来测量 BAO——涵盖超过六百万个天体，分布于从红移 0.1 到 4.2 的七个红移区间。为了避免研究人员的期待渗入结果，团队采用盲分析：在分析方法完全固定前，把宇宙学答案对自己隐藏起来。就精度而言，这是目前大幅领先的 BAO 测量。



DESI 安装在亚利桑那州基特峰的 Nicholas U. Mayall 4 米望远镜上。仪器把数千条光纤送入光谱仪，将天空中的位置转成光谱与红移，从而获得数百万个星系与类星体的三维信息。

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

DESI 是什么

暗能量光谱仪（Dark Energy Spectroscopic Instrument）是一台装在亚利桑那州基特峰

Nicholas U. Mayall 4 米望远镜上的光谱仪。它并不是直接“看到”暗能量——任何仪器都做不到，因为暗能量不会发光。它一次记录约 5,000 个星系与类星体的光谱，从宇宙膨胀如何拉长光的波长读出每个天体的红移，再建立包含数百万个天体的三维地图。研究者接着从这张地图看出宇宙膨胀随时间的变化，再反推出暗能量的行为。从机器人光纤到声学标尺的完整流程，可见 DESI 如何运作。

这项研究最为流传的标题是：暗能量可能不是常数——这个驱动宇宙加速膨胀的神秘成分，或许正随时间变弱，因而撼动标准宇宙学模型。这个说法不是凭空捏造，但很容易被读得过头。更诚实的版本其实更具体，也更有意思：DESI 自己的标尺，单独拿来看，与最常用的标准模型相符。新物理的暗示只有在把 DESI 与其他数据结合后才出现，而且暗示有多强，还取决于你选了哪些其他数据。

DESI 的重子声学标尺本身与恒定的暗能量——也就是宇宙常数——一致。只有将 DESI 与宇宙微波背景及一组超新星数据结合后，才会出现对演化中的暗能量的偏好；而且换一组超新星样本，信号强度也会跟着改变。

标准尺，以及暗能量可以变化的两种方式

BAO 尺度是一把标准尺：因为早期宇宙物理让我们知道它真正的长度，所以把真实长度和它在某个距离上看起来的角尺度相比，就能知道宇宙在那个时刻已经膨胀了多少。在许多不同距离上重复测量，这把尺就能勾勒整段膨胀史——而暗能量正是控制这段历史的重要成分。

在标准模型 Λ CDM 中，暗能量是一个宇宙常数：真空具有固定的能量密度，永远不变。物理学家用“状态方程”参数 w 描述它；如果真的是宇宙常数，那么在所有地方、所有时刻， w 都恰好等于 -1 。

要测试这件事，可以用两种方式放松限制。较简单的做法，是让 w 是另一个常数（仍不随时间变）——这就是 w CDM。更丰富的做法则是允许 w 随宇宙膨胀而变，用两个数字描述： w_0 是今天的值， w_a 描述它改变得多快。这个 w_0w_a CDM 模型在 $w_0 = -1$ ， $w_a = 0$ 这一点会退化成 Λ CDM。这里所谓“演化中的暗能量”，指的就是数据偏好 $w_0 > -1$ 、 $w_a < 0$ ：暗能量在过去具有更强的排斥效果，如今则正在减弱。

作者做了什么

- 利用 DESI 第一年的数据——星系、类星体与 Lyman-alpha forest——测量 BAO 尺度，涵盖超过六百万个天体、七个红移区间，范围为 $0.1 < z < 4.2$ 。
- 采用盲分析，在方法固定之前隐藏宇宙学结果，以降低确认偏误。
- 先以 DESI BAO 单独拟合平坦的标准 Λ CDM 模型，再加入大爆炸核合成先验，以及 Planck 与 ACT 的宇宙微波背景（CMB）数据。
- 再把模型扩展两种：允许暗能量有一个恒定但非 -1 的 w （ w CDM），以及允许 w 随时间变化的 w_0w_a （ w_0w_a CDM）。
- 为测试时间变化模型，研究者分别把 DESI+CMB 与三套 Ia 型超新星数据集结合——Pantheon+、Union3 与 DES-SN5YR——而不是只挑其中一套。
- 对中微子总质量设定上限，并检查一旦允许暗能量背景偏离 Λ CDM，这些限制会如何移动。

他们发现了什么

- **DESI BAO 单独与标准模型一致。**它给出的物质密度是 $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ ；若允许暗能量具有一个恒定 w ，则 $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ ——几乎正落在宇宙常数的 -1 上。
- 与 CMB 及其重力透镜信息结合后，DESI 得到 $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ，以及哈勃常数 $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （若搭配核合成与 CMB 声学尺度，则为 68.52 ± 0.62 ）。
- **在允许时间变化的模型里，数据组合偏好演化中的暗能量——** $w_0 > -1$ 、 $w_a < 0$ 。DESI+CMB 的偏好为 2.6σ ；加入超新星样本后，Pantheon+、Union3、DES-SN5YR 分别得到 2.5σ 、 3.5σ 与 3.9σ 。（sigma 表示结果离标准模型预期有多远；物理学界惯例通常要求 5σ 才宣称发现，而且显著性并不等于对这种解读本身正确性的保证——说明）。
- 若让中微子总质量自由变化，限制会非常紧：DESI+CMB 下，95% 置信水平下的上限低于 0.072 eV 。但论文明确指出，只要允许暗能量背景偏离 ΛCDM ，这个上限就会显著放宽。

这并没有证明什么

- 它**没有**证明暗能量正在演化。DESI 自己的标尺与宇宙常数兼容；演化信号只出现在联合拟合里，而且只在较丰富的双参数模型中出现。
- 它**不代表**“ ΛCDM 已死”或“爱因斯坦错了”。最强的 3.9σ 仍低于物理学家通常要求的 5σ 发现门槛；而且标准模型对 DESI 单独数据仍有良好拟合。
- 这个结果**不是与样本无关的**。换一套超新星数据集，显著性会从 2.5σ 变到 3.9σ ，相差超过一个 sigma。一个强度如此依赖外部数据集的信号，值得追踪，但还不能当成已经稳固测得的事实。
- DESI 单独对 $w_0 > -1$ 的些微倾向，**部分由一个异常数据点驱动——**红移 0.51 的星系区间相对 ΛCDM 稍微偏高。不过论文在这点上做了该做的检查：作者把它视为统计波动，并显示即使把 DESI 所有低红移（ $z < 0.6$ ）测量都换成较旧的 SDSS 数据，暗能量结果仍不变。这个异常点会拉动 DESI 单独的结果，但**不是**联合信号的支柱。（之后也有独立团队更仔细检查它的作用。）所以这个限制其实和有些转述恰好相反：作者真的针对最异常的 BAO 数据做了压力测试，而且结果撑住了。
- 中微子质量上限**不是模型无关的定论**。它只有在背景膨胀固定为 ΛCDM 时才特别严格；一旦放松背景模型，限制也会一起放宽。

证据有多强

- **作为距离测量，非常强。**BAO 标尺是宇宙学最干净的工具之一，DESI 又是目前最精确的版本；盲分析也正是防止研究者把期待中的答案读进数据里所需要的保护措施。
- **作为暗能量主张，确实很有意思，但还不具决定性。**DESI+CMB 的偏好为 2.6σ ，加上限制最强的超新星数据后升到 3.9σ ；这种结果值得争取更多望远镜时间，却还不足以推翻模型。真正需要谨慎的原因，是不同超新星样本之间的落差。值得肯定的是，作者也检查了最异常的单一 BAO 点并非结果来源——这正是这类主张应该完成的功课。
- 论文本身相当克制：它不是只挑最大的数字，而是把三种显著性都报出来，也明确标出中微子结果对模型的依赖。若有夸大，多半出现在后续转述，而不是论文自身。

为什么重要

过去四分之一世纪，“暗能量”几乎常被当作“宇宙常数”的同义词，因为所有测量都与 w 恰好等于 -1 兼容。DESI 是第一个精确到能够在与其他数据结合后，真正追问这个 -1 是否会漂移的数据集，而且得到的回答不再只是干脆的“没有”。这代表数据能做的事情真的变了，也正是这项结果值得关注的原因。

但同样的精度，也让我们看见这个信号有多依赖具体的数据组合：在某些数据组合中活着，在另一些组合中沉寂，而且最敏感的就是你拿哪一套超新星目录与 DESI 配对。正确的态度既不是一笑置之，也不是提前宣布革命，而是看下一批更大的 DESI 数据——DR2 已于 2025 年发布——以及独立超新星样本，看看这个漂移信号究竟会变得更稳固，还是淡去。这就是宇宙学里真正的“也许”应该长什么样子，而它值得被如实报道成“也许”。

简明总结

DESI 利用六百万个天体，以目前最好的重子声学标尺测量了宇宙膨胀史。单独看，这把尺与暗能量为常数的标准模型一致。把它与宇宙微波背景及超新星样本结合后，才会出现暗能量随时间改变的偏好——显著性依加入哪一套超新星数据而落在 2.6σ 到 3.9σ 。这是真实而有趣的信号，但不是发现：它仍低于物理学界要求的门槛，而且会随搭配的超新星数据而改变。暗能量也许正在演化。DESI 让这个问题第一次值得被精确地问——但还没有回答它。

来源

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>