



The CLEAN PAPER

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

DESI 最精确的宇宙标尺，以及关于暗能量的一个谨慎“也许”

DESI 以 600 万个天体为样本，利用迄今最精确的重子声学标尺测量了宇宙的膨胀历史。单独来看，这把标尺与暗能量为常数的标准模型一致。只有把 *DESI* 与宇宙微波背景和一套超新星样本结合时，才会出现对随时间演化的暗能量的偏好——强度为 2.6σ 至 3.9σ ，取决于加入哪些超新星；它低于物理学家要求的发现阈值，也对配对数据十分敏感。这是一个得到精确表达的真实问题，不是答案。

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · 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

一把由声音制成的尺子

在宇宙早期、恒星尚未出现之前，普通物质和光组成的炽热等离子体曾经回响。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，回响才停止——在物质分布中冻结下一个微弱的优选距离。这个距离称为声学视界，如今约为 150 Mpc（约 4.9 亿光年）；无论方向和时代，相隔这一距离的星系都会略微多一些。这就是宇宙学家所说的重子声学振荡（BAO），他们把它用作标准尺：测量这段冻结尺度在不同距离的天空中看起来有多大，就能绘出宇宙在整个历史中膨胀得多快。

暗能量光谱仪（DESI）的建造目的，就是比任何仪器都更准确地测量这把尺子。它的首次数据发布绘制了星系、类星体以及遥远气体云的莱曼 α 森林中的 BAO 尺度——涉及超过 600 万个天体，分布在从红移 0.1 到 4.2 的七个红移区间。为了排除人的预期对结果的影响，团队采用盲法分析，在方法锁定之前连自己也看不到宇宙学答案。它以很大优势成为迄今最精确的 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。该仪器把数千根光纤接入光谱仪，将天空中的位置转化为数百万个星系和类星体的光谱与红移。

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

什么是 DESI

暗能量光谱仪是安装在亚利桑那州基特峰 Nicholas U. Mayall 4 米望远镜上的一台光谱仪。它并不直接看见暗能量——任何仪器都做不到，因为暗能量不发光。它会同时记录约 5,000 个星系和类星体的光谱，根据膨胀的宇宙如何拉伸每个天体的光来读取其红移，并建立包含数百万天体

的三维地图。随后，研究人员从这张地图呈现的宇宙膨胀随时间变化的方式推断暗能量。若想了解从机器人光纤到声学标尺的完整过程，请参阅DESI如何工作。

由此传播最广的标题是：暗能量可能并非常数——这种加速宇宙膨胀的神秘事物可能正随时间减弱，从而动摇标准宇宙学模型。这种说法并非凭空捏造，却很容易被过度解读。更诚实的版本更具体，也更有意思：DESI自己的标尺单独来看，与最朴素的标准模型一致。只有把DESI与其他数据结合时，才会出现新现象的迹象——而迹象看起来有多强，取决于选择了哪些其他数据。

DESI的重子声学标尺本身与恒定的暗能量（宇宙学常数）一致。只有把DESI与宇宙微波背景和一个超新星样本结合时，才会出现对随时间演化的暗能量的偏好；而偏好的强度会随所用超新星样本而变化。

标准尺，以及暗能量可能变化的两种方式

BAO尺度是一把标准尺：由于我们从早期宇宙物理中知道它的真实长度，把真实长度与它在某个距离上的表观大小进行比较，就能得知宇宙当时已经膨胀了多少。在许多距离上测量这把尺子，就能追踪完整的膨胀历史——而膨胀历史正是由暗能量支配的。

在称为 Λ CDM的标准模型中，暗能量是一个宇宙学常数：真空中固定不变、永远不会变化的能量密度。物理学家用“状态方程”参数 w 描述它的行为；对于真正的宇宙学常数，无论何处、任何时候， w 都恰好等于 -1 。

要检验这一点，可以从两个方向放宽限制。较简单的方法是允许 w 取另一个常数值（随时间仍保持不变）——这就是“ w CDM”。更丰富的方法是允许 w 随宇宙膨胀而变化，并用两个数描述： w_0 是它今天的值， w_a 是它漂移的速度。这个“ w_0w_a CDM”模型只在 $w_0 = -1$ 、 $w_a = 0$ 这一个点上退化为 Λ CDM。对 w_0 大于 -1 且 w_a 为负的偏好，就是这里所谓的“随时间演化的暗能量”：暗能量过去的排斥作用更强，如今正在减弱。

作者做了什么

- 利用DESI第一年的数据——星系、类星体和莱曼 α 森林——测量BAO尺度，涵盖七个红移区间中的600多万天体，跨度为 $0.1 < z < 4.2$ 。
- 采用盲法分析，在方法固定之前隐藏宇宙学结果，以防范确认偏误。
- 先用DESI BAO单独拟合标准的平直 Λ CDM模型，再把它与大爆炸核合成先验以及Planck和ACT测得的宇宙微波背景（CMB）结合。
- 以两种方式扩展模型：暗能量 w 为常数的 w CDM，以及 w_0w_a 随时间变化的 w_0w_a CDM。
- 把DESI+CMB依次与三套不同的Ia型超新星汇编结合——Pantheon+、Union3和DES-SN5YR——来检验随时间变化的模型，而不是只挑选其中一套。
- 对中微子质量总和设定上限，并检验允许暗能量背景变化时这些上限如何改变。

他们发现了什么

- **DESI BAO 本身与标准模型一致。**它给出的物质密度为 $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ ；当允许暗能量采用恒定的 w 时， $w = -0.99 (+0.15/-0.13)$ ——正好落在宇宙学常数的 -1 附近。
- 与 CMB 及其引力透镜效应结合时，DESI 给出 $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ，哈勃常数 $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （若与核合成和 CMB 声学尺度结合，则为 68.52 ± 0.62 ）。
- **在随时间变化的模型中，组合数据偏好随时间演化的暗能量—— $w_0 > -1$ 且 $w_a < 0$ 。**DESI+CMB 的偏好为 2.6σ ；加入超新星样本后，Pantheon+、Union3 和 DES-SN5YR 对应的偏好分别为 2.5σ 、 3.5σ 和 3.9σ （ σ 衡量结果偏离标准模型预期的程度；通常要达到 5σ 才会宣称发现，而且它并不表示相应解释一定正确——指南）。
- 如果允许中微子质量总和自由变化，DESI+CMB 会给出严格的上限——低于 0.072 eV （95% 置信度）——但论文明确指出，如果允许暗能量背景偏离 ΛCDM ，这个上限会大幅放宽。

这项研究没有证明什么

- 它**没有**表明暗能量正在演化。DESI 自己的标尺与宇宙学常数一致；演化迹象只出现在组合拟合中，而且只出现在更丰富的双参数模型中。
- 它**不意味着**“ ΛCDM 已经死亡”或“爱因斯坦错了”。最强的数值 3.9σ 仍低于物理学家宣称发现所要求的 5σ 惯例——而且标准模型仍能很好地拟合 DESI 本身。
- 结果**并非**与样本无关。更换超新星汇编，会使显著性从 2.5σ 变为 3.9σ ——相差超过一个 σ 。如果一个信号的大小如此依赖与之搭配的具体数据集，它就是值得继续追踪的迹象，而不是可以视为确证的测量。
- DESI 单独对 $w_0 > -1$ 的倾向，**部分由一个异常数据点驱动**——红移 0.51 的星系区间相对于 ΛCDM 略高。但论文在这里做了应有的核查：它把这个点视为统计涨落，并表明用较早的 SDSS 测量替换 DESI 的全部低红移 ($z < 0.6$) 测量后，暗能量结果仍保持不变。这个异常点会拉动 DESI 单独分析，却**没有**支撑起组合数据中的迹象。（此后，独立团队进一步研究了它的作用。）因此，这一点的意义与有时流传的说法恰好相反：研究针对最异常的数据对结果进行了压力检验，而结果仍然成立。
- 中微子质量上限**不是**与模型无关的定论。只有把背景膨胀固定为 ΛCDM 时，它才如此严格；放宽这个假设，上限也会随之放宽。

证据有多强

- 作为距离测量，证据**非常强**。BAO 标尺是宇宙学中最干净的工具之一，DESI 的测量是迄今最精确的，而盲法分析恰好是防止人们把期待的答案读入数据所需要的保障。
- 作为暗能量主张，它**确实引人注目，却不具决定性**。DESI+CMB 给出 2.6σ 的偏好，加入约束力最强的超新星样本后升至 3.9σ ；这种结果值得获得更多望远镜观测时间，却不足以推翻一个模型。谨慎的诚实理由在于不同超新星样本之间的差异；值得肯定的是，作者也检验了最异常的单个 BAO 点并非结果的驱动因素——这正是此类主张需要完成的核查。
- 论文对自身结果十分谨慎：它用三种方式报告显著性，而不是只引用最大的一个数值，也指出其中微子结果依赖模型。如果存在过度解读，那发生在转述中，而不是论文里。

为什么重要

四分之一世纪以来，“暗能量”和“宇宙学常数”几乎被当作同义词，因为所有测量都与 w 恰好为 -1 一致。DESI 是第一套精确到足以在与其他数据结合时真正追问这个 -1 是否会漂移、并得到并非断然否定答案的数据。这是数据能力的真实转变，也是结果值得关注的原因。但同样的精度也让我们看清这种迹象有多依赖条件：它在某些数据组合中存在，在另一些组合中沉寂，尤其敏感于与 DESI 配对的是哪一套超新星目录。恰当的态度既不是驳回它，也不是过早宣布革命，而是关注 DESI 接下来规模更大的数据发布——DR2 已于 2025 年发布——以及独立的超新星样本，看看这种漂移会变得更确凿还是消失。这就是宇宙学中一个真正的“也许”应有的样子，也值得被如实报道为“也许”。

清晰摘要

DESI 以 600 万个天体为样本，利用迄今最好的重子声学标尺测量了宇宙的膨胀历史。单独来看，这把标尺与暗能量为常数的标准模型一致。把它与宇宙微波背景和一套超新星样本结合后，才会出现对暗能量随时间变化的偏好——强度为 2.6σ 至 3.9σ ，取决于加入哪一套超新星数据。这是一个真实而有意思的迹象，不是发现：它低于物理学家要求的阈值，也会随与 DESI 配对的超新星数据而变化。暗能量可能正在演化。DESI 让这个问题值得被精确地提出，却还没有回答它。

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>