



The CLEAN PAPER

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

DESI 最精準的宇宙標尺，以及暗能量可能演化的一個審慎訊號

DESI 利用六百萬個天體，以迄今最精準的重子聲學標尺量測宇宙的膨脹史。單看這把標尺，結果與暗能量為常數的標準模型一致。只有把 *DESI* 與宇宙微波背景及超新星樣本結合後，才會出現暗能量隨時間演化的偏好；顯著性依加入哪一組超新星資料而落在 2.6σ 到 3.9σ ，仍低於物理學界宣稱發現的門檻，而且會隨搭配資料而變。這是一個被量得更精確的真問題，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

一把由聲音留下的標尺

宇宙早期，在恆星出現之前，普通物質與光形成的高溫電漿曾經「鳴響」。壓力波以超過光速一半的速度在其中傳播，直到宇宙冷卻到足以形成原子，振盪才停止——並把一個微弱但偏好的距離尺度凍結在物質分布裡。今天，這個距離，也就是聲視界，大約是 150 百萬秒差距（約 4.9 億光年）；在各個方向、各個時代的星系分布中，都能看到相隔這個尺度的星系略為過量。宇宙學家把它稱為重子聲學振盪（baryon acoustic oscillation，BAO），並把它當成標準尺：量出這個凍結尺度在不同距離上看起來有多大，就能描繪宇宙在整段歷史中膨脹得有多快。

暗能量光譜儀（Dark Energy Spectroscopic Instrument，DESI）就是為了把這把標尺量得比任何人都更精準。它的第一批資料利用星系、類星體，以及遙遠氣體雲的 Lyman-alpha forest 來測量 BAO——涵蓋超過六百萬個天體，分布於從紅移 0.1 到 4.2 的七個紅移區間。為了避免研究人員的期待滲入結果，團隊採用盲分析：在分析方法完全固定前，把宇宙學答案對自己隱藏起來。就精度而言，這是目前大幅領先的 BAO 量測。



DESI 安裝在亞利桑那州基特峰的 Nicholas U. Mayall 4 公尺望遠鏡上。儀器把數千條光纖送入光譜儀，將天空中的位置轉成光譜與紅移，從而取得數百萬個星系與類星體的三維資訊。

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

DESI 是什麼

暗能量光譜儀（Dark Energy Spectroscopic Instrument）是一台裝在亞利桑那州基特峰

Nicholas U. Mayall 4 公尺望遠鏡上的光譜儀。它並不是直接「看到」暗能量——任何儀器都做不到，因為暗能量不會發光。它一次記錄約 5,000 個星系與類星體的光譜，從宇宙膨脹如何拉長光的波長讀出每個天體的紅移，再建立包含數百萬個天體的三維地圖。研究者接著從這張地圖看出宇宙膨脹隨時間的變化，再反推出暗能量的行為。從機器人光纖到聲學標尺的完整流程，可見 DESI 如何運作。

這項研究最廣為流傳的標題是：暗能量可能不是常數——這個驅動宇宙加速膨脹的神祕成分，或許正隨時間變弱，因而撼動標準宇宙學模型。這個說法不是憑空捏造，但很容易被讀得過頭。更誠實的版本其實更具體，也更有意思：DESI 自己的標尺，單獨拿來看，與最普通的標準模型相符。新物理的暗示只有在把 DESI 與其他資料結合後才出現，而且暗示有多強，還取決於你選了哪些其他資料。

DESI 的重子聲學標尺本身與恆定的暗能量——也就是宇宙常數——一致。只有將 DESI 與宇宙微波背景及一組超新星資料結合後，才會出現對演化中的暗能量的偏好；而且換一組超新星樣本，訊號強度也會跟著改變。

標準尺，以及暗能量可以變化的兩種方式

BAO 尺度是一把標準尺：因為早期宇宙物理讓我們知道它真正的長度，所以把真實長度和它在某個距離上看起來的角尺度相比，就能知道宇宙在那個時刻已經膨脹了多少。在許多不同距離上重複量測，這把尺就能勾勒整段膨脹史——而暗能量正是控制這段歷史的重要成分。

在標準模型 Λ CDM 中，暗能量是一個宇宙常數：真空具有固定的能量密度，永遠不變。物理學家用「狀態方程」參數 w 描述它；如果真的是宇宙常數，那麼在所有地方、所有時刻， w 都恰好等於 -1 。

要測試這件事，可以用兩種方式放鬆限制。較簡單的做法，是讓 w 是另一個常數（仍不隨時間變）——這就是 w CDM。更豐富的做法則是允許 w 隨宇宙膨脹而變，用兩個數字描述： w_0 是今天的值， w_a 描述它改變得多快。這個 w_0w_a CDM 模型在 $w_0 = -1$ 、 $w_a = 0$ 這一點會退化成 Λ CDM。這裡所謂「演化中的暗能量」，指的就是資料偏好 $w_0 > -1$ 、 $w_a < 0$ ：暗能量在過去具有更強的排斥效果，如今則正在減弱。

作者做了什麼

- 利用 DESI 第一年的資料——星系、類星體與 Lyman-alpha forest——測量 BAO 尺度，涵蓋超過六百萬個天體、七個紅移區間，範圍為 $0.1 < z < 4.2$ 。
- 採用**盲分析**，在方法固定之前隱藏宇宙學結果，以降低確認偏誤。
- 先以 DESI BAO 單獨擬合平坦的標準 Λ CDM 模型，再加入大霹靂核合成先驗，以及 Planck 與 ACT 的宇宙微波背景（CMB）資料。
- 再把模型擴展兩種：允許暗能量有一個恆定但非 -1 的 w （ w CDM），以及允許 w 隨時間變化的 w_0w_a （ w_0w_a CDM）。
- 為測試時間變化模型，研究者分別把 DESI+CMB 與三套 Ia 型超新星彙編結合——Pantheon+、Union3 與 DES-SN5YR——而不是只挑其中一套。
- 對中微子總質量設定上限，並檢查一旦允許暗能量背景偏離 Λ CDM，這些限制會如何移動。

他們發現了什麼

- **DESI BAO 單獨與標準模型一致。**它給出的物質密度是 $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ ；若允許暗能量具有一個恆定 w ，則 $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ ——幾乎正落在宇宙常數的 -1 上。
- 與 CMB 及其重力透鏡資訊結合後，DESI 得到 $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ，以及哈伯常數 $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （若搭配核合成與 CMB 聲學尺度，則為 68.52 ± 0.62 ）。
- 在允許時間變化的模型裡，資料組合偏好演化中的暗能量—— $w_0 > -1$ 、 $w_a < 0$ 。DESI+CMB 的偏好為 2.6σ ；加入超新星樣本後，Pantheon+、Union3、DES-SN5YR 分別得到 2.5σ 、 3.5σ 與 3.9σ 。（sigma 表示結果離標準模型預期有多遠；物理學界慣例通常要求 5σ 才宣稱發現，而且顯著性並不等於對詮釋本身的正確性保證——說明）。
- 若讓中微子總質量自由變化，限制會非常緊：DESI+CMB 下，95% 信賴度的上限低於 0.072 eV 。但論文明確指出，只要允許暗能量背景偏離 ΛCDM ，這個上限就會顯著放寬。

這並沒有證明什麼

- 它**沒有**證明暗能量正在演化。DESI 自己的標尺與宇宙常數相容；演化訊號只出現在聯合擬合裡，而且只在較豐富的雙參數模型中出現。
- 它**不代表**「 ΛCDM 已死」或「愛因斯坦錯了」。最強的 3.9σ 仍低於物理學家通常要求的 5σ 發現門檻；而且標準模型對 DESI 單獨資料仍有良好擬合。
- 這個結果**不是與樣本無關的**。換一套超新星彙編，顯著性會從 2.5σ 變到 3.9σ ，相差超過一個 sigma。一個強度如此依賴外接資料集的訊號，值得追蹤，但還不能當成已經穩固量測到的事實。
- DESI 單獨對 $w_0 > -1$ 的微傾向，**部分由一個異常資料點驅動**——紅移 0.51 的星系區間相對 ΛCDM 稍微偏高。不過論文在這點上做了該做的檢查：作者把它視為統計波動，並顯示即使把 DESI 所有低紅移（ $z < 0.6$ ）量測都換成較舊的 SDSS 資料，暗能量結果仍不變。這個異常點會拉動 DESI 單獨的結果，但**不是**聯合訊號的支柱。（之後也有獨立團隊更仔細檢查它的作用。）所以這個限制其實和有些轉述恰好相反：作者真的針對最異常的 BAO 資料做了壓力測試，而且結果撐住了。
- 中微子質量上限**不是模型無關的定論**。它只有在背景膨脹固定為 ΛCDM 時才特別嚴格；一旦放鬆背景模型，限制也會一起放寬。

證據有多強

- **作為距離量測，非常強。**BAO 標尺是宇宙學最乾淨的工具之一，DESI 又是目前最精準的版本；盲分析也正是防止研究者把期待中的答案讀進資料裡所需要的保護措施。
- **作為暗能量主張，確實很有意思，但還不具決定性。**DESI+CMB 的偏好為 2.6σ ，加上限制最強的超新星資料後升到 3.9σ ；這種結果值得爭取更多望遠鏡時間，卻還不足以推翻模型。真正需要謹慎的原因，是不同超新星樣本之間的落差。值得肯定的是，作者也檢查了最異常的單一 BAO 點並非結果來源——這正是這類主張應該完成的功課。
- 論文本身相當克制：它不是只挑最大的數字，而是把三種顯著性都報出來，也明確標示中微子結果對模型的依賴。若有誇大，多半出現在後續轉述，而不是論文自身。

為什麼重要

過去四分之一個世紀，「暗能量」幾乎常被當作「宇宙常數」的同義詞，因為所有量測都與 w 恰好等於 -1 相容。DESI 是第一個精準到能夠在與其他資料結合後，真正追問這個 -1 是否會漂移的資料集，而且得到的回答不再只是乾脆的「沒有」。這代表資料能做的事情真的變了，也正是這項結果值得關注的原因。

但同樣的精度，也讓我們看見這個訊號有多具條件性：在某些資料組合中活著，在另一些組合中沉寂，而且最敏感的就是你拿哪一套超新星目錄與 DESI 配對。正確的態度既不是一笑置之，也不是提前宣布革命，而是看下一批更大的 DESI 資料——DR2 已在 2025 年釋出——以及獨立超新星樣本，看看這個漂移訊號究竟會變得更穩固，還是淡去。這就是宇宙學裡真正的「也許」應該長什麼樣子，而它值得被如實報導成「也許」。

重點摘要

DESI 利用六百萬個天體，以目前最好的重子聲學標尺量測了宇宙膨脹史。單獨看，這把尺與暗能量為常數的標準模型一致。把它與宇宙微波背景及超新星樣本結合後，才會出現暗能量隨時間改變的偏好——顯著性依加入哪一套超新星資料而落在 2.6σ 到 3.9σ 。這是真實而有趣的訊號，但不是發現：它仍低於物理學界要求的門檻，而且會隨搭配的超新星資料而改變。暗能量也許正在演化。DESI 讓這個問題第一次值得被精確地問——但還沒有回答它。

來源

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>