



The CLEAN PAPER

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

DESI 最精確的宇宙標尺，以及關於暗能量的一個謹慎「也許」

DESI 以 600 萬個天體為樣本，利用迄今最精確的重子聲學標尺測量了宇宙的膨脹歷史。單獨來看，這把標尺與暗能量為常數的標準模型一致。只有把 *DESI* 與宇宙微波背景和一套超新星樣本結合時，才會出現對隨時間演化的暗能量的偏好——強度為 2.6σ 至 3.9σ ，取決於加入哪些超新星；它低於物理學家要求的發現閾值，也對配對資料十分敏感。這是一個得到精確表達的真實問題，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

一把由聲音製成的尺子

在宇宙早期、恆星尚未出現之前，普通物質和光組成的熾熱電漿曾經回響。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，回響才停止——在物質分布中凍結下一個微弱的優選距離。這個距離稱為聲學視界，如今約為 150 Mpc（約 4.9 億光年）；無論方向和時代，相隔這一距離的星系都會略微多一些。這就是宇宙學家所說的重子聲學振盪（BAO），他們把它用作標準尺：測量這段凍結尺度在不同距離的天空中看起來有多大，就能繪出宇宙在整個歷史中膨脹得多快。

暗能量光譜儀（DESI）的建造目的，就是比任何儀器都更準確地測量這把尺子。它的首次資料發布繪製了星系、類星體以及遙遠氣體雲的萊曼 α 森林中的 BAO 尺度——涉及超過 600 萬個天體，分布在從紅移 0.1 到 4.2 的七個紅移區間。為了排除人的預期對結果的影響，團隊採用盲法分析，在方法鎖定之前連自己也看不到宇宙學答案。它以很大優勢成為迄今最精確的 BAO 測量。



DESI 安裝在亞利桑那州基特峰的 Nicholas U. Mayall 4 公尺望遠鏡上。該儀器把數千根光纖接入光譜儀，將天空中的位置轉化為數百萬個星系和類星體的光譜與紅移。

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

什麼是 DESI

暗能量光譜儀是安裝在亞利桑那州基特峰 Nicholas U. Mayall 4 公尺望遠鏡上的一部光譜儀。它並不直接看見暗能量——任何儀器都做不到，因為暗能量不發光。它會同時記錄約 5,000 個星系和類星體的光譜，根據膨脹的宇宙如何拉伸每個天體的光來讀取其紅移，並建立包含數百

萬天體的三維地圖。隨後，研究人員從這張地圖呈現的宇宙膨脹隨時間變化的方式推斷暗能量。若想了解從機器人光纖到聲學標尺的完整過程，請參閱DESI 如何運作。

由此傳播最廣的標題是：暗能量可能並非常數——這種加速宇宙膨脹的神祕事物可能正隨時間減弱，從而動搖標準宇宙學模型。這種說法並非憑空捏造，卻很容易被過度解讀。更誠實的版本更具體，也更有趣：DESI 自己的標尺單獨來看，與最樸素的標準模型一致。只有把 DESI 與其他資料結合時，才會出現新現象的跡象——而跡象看起來有多強，取決於選擇了哪些其他資料。

DESI 的重子聲學標尺本身與恆定的暗能量（宇宙學常數）一致。只有把 DESI 與宇宙微波背景和一個超新星樣本結合時，才會出現對隨時間演化的暗能量的偏好；而偏好的強度會隨所用超新星樣本而變化。

標準尺，以及暗能量可能變化的兩種方式

BAO 尺度是一把標準尺：由於我們從早期宇宙物理中知道它的真實長度，把真實長度與它在某個距離上的表觀大小進行比較，就能得知宇宙當時已經膨脹了多少。在許多距離上測量這把尺子，就能追蹤完整的膨脹歷史——而膨脹歷史正是由暗能量支配的。

在稱為 Λ CDM 的標準模型中，暗能量是一個宇宙學常數：真空中固定不變、永遠不會變化的能量密度。物理學家用「狀態方程」參數 w 描述它的行為；對於真正的宇宙學常數，無論何處、任何時候， w 都恰好等於 -1 。

要檢驗這一點，可以從兩個方向放寬限制。較簡單的方法是允許 w 取另一個常數值（隨時間仍保持不變）——這就是「 w CDM」。更豐富的方法是允許 w 隨宇宙膨脹而變化，並用兩個數描述： w_0 是它今天的值， w_a 是它漂移的速度。這個「 w_0w_a CDM」模型只在 $w_0 = -1$ 、 $w_a = 0$ 這一個點上退化為 Λ CDM。對 w_0 大於 -1 且 w_a 為負的偏好，就是這裡所謂的「隨時間演化的暗能量」：暗能量過去的排斥作用更強，如今正在減弱。

作者做了什麼

- 利用 DESI 第一年的資料——星系、類星體和萊曼 α 森林——測量 BAO 尺度，涵蓋七個紅移區間中的 600 多萬個天體，跨度為 $0.1 < z < 4.2$ 。
- 採用盲法分析，在方法固定之前隱藏宇宙學結果，以防範確認偏誤。
- 先用 DESI BAO 單獨擬合標準的平直 Λ CDM 模型，再把它與大霹靂核合成先驗以及 Planck 和 ACT 測得的宇宙微波背景（CMB）結合。
- 以兩種方式擴展模型：暗能量 w 為常數的 w CDM，以及 w_0w_a 隨時間變化的 w_0w_a CDM。
- 把 DESI+CMB 依次與三套不同的 Ia 型超新星彙編結合——Pantheon+、Union3 和 DES-SN5YR——來檢驗隨時間變化的模型，而不是只挑選其中一套。
- 對微中子質量總和設定上限，並檢驗允許暗能量背景變化時這些上限如何改變。

他們發現了什麼

- **DESI BAO 本身與標準模型一致。**它給出的物質密度為 $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ ；當允許暗能量採用恆定的 w 時， $w = -0.99 (+0.15/-0.13)$ ——正好落在宇宙學常數的 -1 附近。
- 與 CMB 及其重力透鏡效應結合時，DESI 給出 $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ，哈伯常數 $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （若與核合成和 CMB 聲學尺度結合，則為 68.52 ± 0.62 ）。
- 在隨時間變化的模型中，組合資料偏好隨時間演化的暗能量—— $w_0 > -1$ 且 $w_a < 0$ 。DESI+CMB 的偏好為 2.6σ ；加入超新星樣本後，Pantheon+、Union3 和 DES-SN5YR 對應的偏好分別為 2.5σ 、 3.5σ 和 3.9σ （sigma 衡量結果偏離標準模型預期的程度；通常要達到 5σ 才會宣稱發現，而且它並不表示相應解釋一定正確——指南）。
- 如果允許微中子質量總和自由變化，DESI+CMB 會給出嚴格的上限——低於 0.072 eV （95% 信賴度）——但論文明確指出，如果允許暗能量背景偏離 ΛCDM ，這個上限會大幅放寬。

這項研究沒有證明什麼

- 它**沒有**表明暗能量正在演化。DESI 自己的標尺與宇宙學常數一致；演化跡象只出現在組合擬合中，而且只出現在更豐富的雙參數模型中。
- 它**不意味著**「 ΛCDM 已經死亡」或「愛因斯坦錯了」。最強的數值 3.9σ 仍低於物理學家宣稱發現所要求的 5σ 慣例——而且標準模型仍能很好地擬合 DESI 本身。
- 結果**並非**與樣本無關。更換超新星彙編，會使顯著性從 2.5σ 變為 3.9σ ——相差超過一個 sigma。如果一個訊號的大小如此依賴與之搭配的具體資料集，它就是值得繼續追蹤的跡象，而不是可以視為確證的測量。
- DESI 單獨對 $w_0 > -1$ 的傾向，**部分由一個異常資料點驅動**——紅移 0.51 的星系區間相對於 ΛCDM 略高。但論文在這裡做了應有的核查：它把這個點視為統計漲落，並表明用較早的 SDSS 測量替換 DESI 的全部低紅移（ $z < 0.6$ ）測量後，暗能量結果仍保持不變。這個異常點會拉動 DESI 單獨分析，卻**沒有**支撐起組合資料中的跡象。（此後，獨立團隊進一步研究了它的作用。）因此，這一點的意義與有時流傳的說法恰好相反：研究針對最異常的資料對結果進行了壓力檢驗，而結果仍然成立。
- 微中子質量上限**不是**與模型無關的定論。只有把背景膨脹固定為 ΛCDM 時，它才如此嚴格；放寬這個假設，上限也會隨之放寬。

證據有多強

- 作為距離測量，證據**非常強**。BAO 標尺是宇宙學中最乾淨的工具之一，DESI 的測量是迄今最精確的，而盲法分析恰好是防止人們把期待的答案讀入資料所需要的保障。
- 作為暗能量主張，它**確實引人注目，卻不具決定性**。DESI+CMB 給出 2.6σ 的偏好，加入約束力最強的超新星樣本後升至 3.9σ ；這種結果值得獲得更多望遠鏡觀測時間，卻不足以推翻一個模型。謹慎的誠實理由在於不同超新星樣本之間的差異；值得肯定的是，作者也檢驗了最異常的單個 BAO 點並非結果的驅動因素——這正是此類主張需要完成的核查。
- 論文對自身結果十分謹慎：它用三種方式報告顯著性，而不是只引用最大的一個數值，也指出其

微中子結果依賴模型。如果存在過度解讀，那發生在轉述中，而不是論文裡。

為什麼重要

四分之一個世紀以來，「暗能量」和「宇宙學常數」幾乎被當作同義詞，因為所有測量都與 w 恰好為 -1 一致。DESI 是第一套精確到足以在與其他資料結合時真正追問這個 -1 是否會漂移、並得到並非斷然否定答案的資料。這是資料能力的真實轉變，也是結果值得關注的原因。但同樣的精度也讓我們看清這種跡象有多依賴條件：它在某些資料組合中存在，在另一些組合中沉寂，尤其敏感於與 DESI 配對的是哪一套超新星目錄。恰當的態度既不是駁回它，也不是過早宣佈革命，而是關注 DESI 接下來規模更大的資料發布——DR2 已於 2025 年發布——以及獨立的超新星樣本，看看這種漂移會變得更確鑿還是消失。這就是宇宙學中一個真正的「也許」應有的樣子，也值得被如實報導為「也許」。

清晰摘要

DESI 以 600 萬個天體為樣本，利用迄今最好的重子聲學標尺測量了宇宙的膨脹歷史。單獨來看，這把標尺與暗能量為常數的標準模型一致。把它與宇宙微波背景和一套超新星樣本結合後，才會出現對暗能量隨時間變化的偏好——強度為 2.6σ 至 3.9σ ，取決於加入哪一套超新星資料。這是一個真實而有意思的跡象，不是發現：它低於物理學家要求的閾值，也會隨與 DESI 配對的超新星資料而變化。暗能量可能正在演化。DESI 讓這個問題值得被精確地提出，卻還沒有回答它。

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>