The Clean Paper

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

Cây thước vũ trụ sắc nhất của DESI, và một "có thể" thận trọng về năng lượng tối

DESI đo lịch sử giãn nở của vũ trụ bằng cây thước dao động âm baryon chính xác nhất từng có, từ sáu triệu vật thể. Xét riêng, cây thước ấy phù hợp với mô hình chuẩn trong đó năng lượng tối là hằng số. Chỉ khi kết hợp DESI với nền vi sóng vũ trụ và một mẫu siêu tân tinh mới xuất hiện sự ưu tiên cho năng lượng tối biến đổi — ở mức 2,6σ đến 3,9σ tùy bộ siêu tân tinh được thêm vào, vẫn dưới ngưỡng phát hiện và nhạy với dữ liệu được ghép. Một câu hỏi thật được đặt chính xác hơn, chưa phải một câu trả lời.

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

Một cây thước làm từ âm thanh

Thuở vũ trụ còn rất trẻ, trước khi có các ngôi sao, plasma nóng gồm vật chất thông thường và ánh sáng từng "vang". Các sóng áp suất lan qua nó với tốc độ hơn nửa tốc độ ánh sáng, cho đến khi vũ trụ nguội đủ để nguyên tử hình thành và tiếng vang dừng lại — đóng băng một khoảng cách ưu tiên rất mờ vào sự phân bố của vật chất. Khoảng cách đó, *chân trời âm thanh* (*sound horizon*), ngày nay vào khoảng 150 megaparsec (xấp xỉ 490 triệu năm ánh sáng), và nó hiện ra như một chút dư thừa các cặp thiên hà cách nhau đúng cỡ ấy, ở mọi hướng và mọi thời kỳ. Các nhà vũ trụ học gọi dấu vết này là dao động âm baryon, hay BAO, và dùng nó như một thước chuẩn: đo xem thang khoảng cách bị đóng băng ấy trông lớn bao nhiêu trên bầu trời ở các khoảng cách khác nhau, ta có thể vẽ lại tốc độ giãn nở của vũ trụ trong suốt lịch sử.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) được chế tạo để đo cây thước ấy tốt hơn bất kỳ thiết bị nào trước đó. Bản công bố dữ liệu đầu tiên đo thang BAO bằng các thiên hà, quasar và rừng Lyman-alpha của các đám khí xa — hơn sáu triệu vật thể, trải trên bảy khoảng dịch đỏ từ 0,1 đến 4,2. Để kỳ vọng của con người không len vào kết quả, nhóm phân tích theo kiểu *blind*: họ che đáp án vũ trụ học khỏi chính mình cho đến khi phương pháp đã được khóa. Đây, với khoảng cách lớn, là phép đo BAO chính xác nhất từng có.

DESI được lắp trên Kính thiên văn Nicholas U. Mayall 4 mét tại Kitt Peak, Arizona. Thiết bị đưa hàng nghìn sợi quang vào các máy quang phổ, biến vị trí trên bầu trời thành quang phổ và dịch đỏ của hàng triệu thiên hà và quasar.

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

DESI là gì

Dark Energy Spectroscopic Instrument là một máy quang phổ trên kính thiên văn Nicholas U. Mayall 4 mét tại Kitt Peak, Arizona. Nó không nhìn thấy năng lượng tối trực tiếp — không thiết bị nào có thể, vì năng lượng tối không phát sáng. Thay vào đó, DESI ghi quang phổ của khoảng 5.000 thiên hà và quasar cùng lúc, đọc dịch đỏ của mỗi vật thể từ mức độ vũ trụ giãn nở đã kéo dài ánh sáng của nó, rồi dựng bản đồ ba chiều của hàng triệu vật thể. Năng lượng tối sau đó được suy ra từ cách bản đồ này cho thấy tốc độ giãn nở vũ trụ thay đổi theo thời gian. Để xem toàn bộ chuỗi — từ các sợi quang robot đến cây thước âm học — xem DESI hoạt động như thế nào.

Tiêu đề lan truyền từ kết quả này là năng lượng tối có thể không phải một hằng số — rằng thứ bí ẩn đang làm vũ trụ giãn nở gia tốc có thể *yếu dần* theo thời gian, làm nứt mô hình vũ trụ học chuẩn. Tuyên bố đó không phải bịa ra, nhưng rất dễ đọc quá tay. Phiên bản trung thực cụ thể hơn, và cũng thú vị hơn: cây thước của riêng DESI, xét một mình, đồng ý với mô hình "chuẩn" quen thuộc. Dấu hiệu của cái gì đó mới chỉ xuất hiện khi ghép DESI với dữ liệu khác — và dấu hiệu mạnh đến đâu phụ thuộc vào chính dữ liệu được ghép vào.

Cây thước dao động âm baryon của DESI khi xét riêng phù hợp với năng lượng tối không đổi, tức hằng số vũ trụ. Sự ưu tiên cho năng lượng tối *biến đổi theo thời gian* chỉ xuất hiện khi DESI được kết hợp với nền vi sóng vũ trụ và một mẫu siêu tân tinh — và độ mạnh thay đổi tùy bộ siêu tân tinh được dùng.

Thước chuẩn và hai cách để năng lượng tối biến đổi

Thang BAO là một *thước chuẩn*: vì ta biết độ dài thật của nó từ vật lý vũ trụ sơ khai, so độ dài thật với kích thước biểu kiến ở một khoảng cách nhất định cho biết vũ trụ đã giãn nở bao nhiêu vào thời điểm ấy. Đo cây thước ở nhiều khoảng cách sẽ lần theo toàn bộ lịch sử giãn nở — thứ mà năng lượng tối chi phối.

Trong mô hình chuẩn ΛCDM, năng lượng tối là một *hằng số vũ trụ*: mật độ năng lượng cố định của không gian rỗng, không thay đổi. Các nhà vật lý mô tả hành vi của nó bằng tham số "phương trình trạng thái" w, bằng đúng -1 ở mọi nơi và mọi thời điểm nếu đó thật sự là hằng số vũ trụ.

Để kiểm tra giả định này, có thể nới lỏng nó theo hai cách. Đơn giản hơn là cho w nhận một giá trị hằng khác (vẫn không đổi theo thời gian) — đó là "wCDM". Cách phong phú hơn là cho w thay đổi khi vũ trụ giãn nở, mô tả bằng hai số: w_0, giá trị hôm nay, và w_a, tốc độ nó trôi theo thời gian. Mô hình "w_0w_aCDM" này trở về ΛCDM đúng tại điểm $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Sự ưu tiên cho w_0 lớn hơn -1 cùng w_a âm chính là điều "năng lượng tối biến đổi" có nghĩa ở đây: năng lượng tối từng gây lực đẩy mạnh hơn trong quá khứ và đang dịu đi hiện nay.

Các tác giả đã làm gì

- Đo thang BAO từ năm dữ liệu đầu tiên của DESI — thiên hà, quasar và rừng Lyman-alpha — với hơn sáu triệu vật thể trong bảy khoảng dịch đỏ trải trên $0.1 < z < 4.2$.
- Tiến hành phân tích **blind**, che kết quả vũ trụ học cho đến khi phương pháp đã cố định, để giảm thiên kiến xác nhận.
- Khớp mô hình ΛCDM phẳng chuẩn với BAO của DESI riêng lẻ, rồi kết hợp với một tiên nghiệm từ tổng hợp hạt nhân Big Bang và nền vi sóng vũ trụ (CMB) từ Planck và ACT.
- Mở rộng mô hình theo hai cách: năng lượng tối có w hằng (wCDM), và $w_0 w_a$ biến đổi theo thời gian ($w_0 w_a$CDM).
- Kiểm tra mô hình biến thiên theo thời gian bằng cách lần lượt kết hợp DESI+CMB với ba bộ siêu tân tinh type Ia khác nhau — Pantheon+, Union3 và DES-SN5YR — thay vì chỉ chọn một bộ.
- Đặt giới hạn cho tổng khối lượng neutrino và kiểm tra giới hạn đó thay đổi ra sao nếu nền năng lượng tối được phép lệch khỏi ΛCDM.

Họ tìm thấy gì

- **BAO của DESI riêng lẻ phù hợp với mô hình chuẩn.** Chúng cho mật độ vật chất $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, và khi cho năng lượng tối có w hằng, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — gần như nằm đúng trên giá trị -1 của hằng số vũ trụ.
- Khi kết hợp với CMB và hiệu ứng thấu kính của nó, DESI cho $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ và hằng số Hubble $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 khi ghép với tổng hợp hạt nhân và thang âm học của CMB).
- **Trong mô hình biến thiên theo thời gian, các tổ hợp dữ liệu ưu tiên năng lượng tối biến đổi** — $w_0 > -1$ và $w_a < 0$. Mức ưu tiên là 2.6σ cho DESI+CMB, và khi thêm dữ liệu siêu tân tinh thì thành 2.5σ, 3.5σ hoặc 3.9σ tương ứng với Pantheon+, Union3 hoặc DES-SN5YR (sigma đo một kết quả lệch khỏi kỳ vọng của mô hình chuẩn bao xa; 5σ là ngưỡng quy ước thường dùng để tuyên bố phát hiện, và không có nghĩa diễn giải chắc chắn đúng — hướng dẫn).
- Nếu để tự do, tổng khối lượng neutrino bị chặn rất chặt — dưới 0,072 eV (độ tin cậy 95%) cho DESI+CMB — nhưng bài báo nói rõ giới hạn này nới ra đáng kể nếu nền năng lượng tối được phép rời khỏi ΛCDM.

Điều nghiên cứu này không chứng minh

- Nó **không** cho thấy năng lượng tối đang biến đổi. Cây thước của chính DESI phù hợp với hằng số vũ trụ; dấu hiệu biến đổi chỉ xuất hiện trong các phép khớp *kết hợp*, và chỉ trong mô hình hai tham số phong phú hơn.
- Nó **không** có nghĩa "ΛCDM đã chết" hay "Einstein sai". Con số mạnh nhất, 3.9σ, vẫn dưới

quy ước 5σ mà các nhà vật lý thường đòi hỏi trước khi gọi một kết quả là phát hiện — và mô hình chuẩn vẫn khớp tốt với DESI riêng lẻ.

- Kết quả **không độc lập với mẫu dữ liệu**. Đổi bộ siêu tân tinh làm ý nghĩa thống kê dịch từ 2.5σ lên 3.9σ — hơn một sigma đầy đủ. Một tín hiệu thay đổi mạnh đến vậy tùy bộ dữ liệu ngoài được ghép vào là thứ đáng theo đuổi, không phải con số có thể coi như đã chốt.
- Xu hướng của DESI *riêng lẻ* về $w_0 > -1$ được thúc đẩy **một phần bởi một điểm bất thường duy nhất** — bin thiên hà ở dịch đỏ 0,51, hơi cao so với ΛCDM. Nhưng đây cũng là nơi bài báo làm bài kiểm tra cần thiết: họ xem điểm đó như dao động thống kê và cho thấy thay *toàn bộ* phép đo DESI ở dịch đỏ thấp ($z < 0.6$) bằng các phép đo SDSS cũ hơn vẫn để kết quả về năng lượng tối không đổi. Điểm lạ kéo DESI riêng lẻ theo một hướng; nó **không** chống đỡ dấu hiệu trong tổ hợp dữ liệu. (Các nhóm độc lập sau đó cũng đã xem xét vai trò của nó kỹ hơn.) Vì vậy lưu ý này thực ra đi ngược với cách câu chuyện đôi khi được kể: kết quả đã được stress-test bằng chính dữ liệu bất thường nhất và vẫn đứng vững.
- Giới hạn khối lượng neutrino **không** phải phán quyết độc lập với mô hình. Nó chỉ rất chặt nếu lịch sử giãn nở nền bị giữ theo ΛCDM; nới mô hình đó thì giới hạn cũng nới theo.

Bằng chứng mạnh đến đâu

- **Rất mạnh với tư cách phép đo khoảng cách.** Thước BAO là một trong những công cụ sạch nhất của vũ trụ học, phép đo của DESI là chính xác nhất đến nay, và phân tích blind chính là biện pháp bảo vệ bạn muốn có trước nguy cơ đọc câu trả lời mong đợi vào dữ liệu.
- **Thực sự hấp dẫn nhưng chưa mang tính quyết định đối với tuyên bố về năng lượng tối.** Mức ưu tiên 2.6σ từ DESI+CMB, tăng lên 3.9σ với bộ siêu tân tinh ràng buộc mạnh nhất, là loại kết quả đáng được cấp thêm thời gian kính thiên văn — không phải loại lật đổ một mô hình. Lý do trung thực để thận trọng là độ phân tán giữa các mẫu siêu tân tinh; đáng ghi nhận, các tác giả cũng kiểm tra rằng điểm BAO bất thường nhất không điều khiển kết quả — đúng loại "bài tập về nhà" mà một tuyên bố như vậy cần làm.
- Bản thân bài báo khá cẩn thận: họ báo ý nghĩa thống kê theo ba cách thay vì chỉ trích con số lớn nhất, và đánh dấu rõ tính phụ thuộc mô hình của kết quả neutrino. Sự phóng đại, nếu có, nằm ở cách kể lại hơn là ở bài báo.

Vì sao nó quan trọng

Trong một phần tư thế kỷ, "năng lượng tối" và "hằng số vũ trụ" gần như được dùng thay thế cho nhau, vì mọi phép đo đều phù hợp với w đúng bằng -1. DESI là bộ dữ liệu đầu tiên đủ chính xác để, khi kết hợp với dữ liệu khác, thực sự *hỏi* liệu -1 ấy có trôi theo thời gian hay không — và nhận được một câu trả lời không phải một tiếng "không" phẳng lì. Đó là thay đổi thật trong khả năng của dữ liệu, và là lý do kết quả đáng chú ý. Nhưng chính độ chính xác ấy cũng cho ta thấy dấu hiệu này có điều kiện đến mức nào: sống trong một số tổ hợp dữ liệu, im lặng trong những tổ hợp khác, và đặc biệt nhạy với bộ siêu tân tinh nào được ghép cùng DESI. Thái độ đúng không phải bác bỏ cũng không phải tuyên bố cách mạng sớm. Hãy nhìn

bản công bố DESI lớn tiếp theo — DR2, đã ra năm 2025 — và các mẫu siêu tân tinh độc lập, rồi xem độ trôi này mạnh lên hay tan đi. Đây là hình dạng của một “có thể” thật sự trong vũ trụ học, và nó đáng được kể đúng là một “có thể”.

Tóm tắt gọn

DESI đã đo lịch sử giãn nở của vũ trụ bằng cây thước dao động âm baryon chính xác nhất từng được xây, từ sáu triệu vật thể. Xét riêng, cây thước ấy đồng ý với mô hình chuẩn trong đó năng lượng tối là hằng số. Chỉ khi kết hợp DESI với nền vi sóng vũ trụ và một mẫu siêu tân tinh mới xuất hiện sự ưu tiên cho năng lượng tối thay đổi theo thời gian — ở mức 2.6σ đến 3.9σ, tùy bộ siêu tân tinh được thêm vào. Đây là một dấu hiệu thật và đáng quan tâm, không phải phát hiện: nó vẫn dưới ngưỡng mà các nhà vật lý thường yêu cầu và thay đổi theo chính dữ liệu siêu tân tinh được ghép vào. Năng lượng tối *có thể* đang biến đổi. DESI đã biến điều đó thành một câu hỏi có thể đặt ra chính xác — chưa phải một câu hỏi nó đã trả lời.

Nguồn

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