The Clean Paper

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

Найточніша космічна лінійка DESI — і обережне «можливо» щодо темної енергії

DESI виміряв історію розширення Всесвіту за допомогою найточнішої баріонно-акустичної лінійки з усіх створених, використавши шість мільйонів об'єктів. Сама по собі ця лінійка узгоджується зі стандартною моделлю, у якій темна енергія стала. Лише коли DESI об'єднують із космічним мікрохвильовим фоном і вибіркою наднових, з'являється перевага на користь еволюції темної енергії — від 2,6σ до 3,9σ залежно від доданої вибірки наднових, нижче порогу відкриття й із помітною залежністю від поєднаних даних. Точне формулювання справжнього запитання, а не готова відповідь.

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

Лінійка, зроблена зі звуку

На початку історії Всесвіту, ще до появи зір, гаряча плазма зі звичайної матерії та світла буквально «дзвеніла». Хвилі тиску поширювалися крізь неї зі швидкістю понад половину швидкості світла, доки Всесвіт не охолов настільки, що змогли утворитися атоми й цей дзвін припинився — залишивши в розподілі матерії слабко виражену переважну відстань. Сьогодні ця відстань, *звуковий горизонт*, становить близько 150 мегапарсеків (приблизно 490 мільйонів світлових років) і проявляється як невеликий надлишок пар галактик, розділених саме такою відстанню, в усіх напрямках і на всіх епохах. Космологи називають це баріонними акустичними осциляціями, або BAO, і використовують їх як стандартну лінійку: вимірюючи, яким виглядає цей «заморожений» масштаб на небі на різних відстанях, можна відновити, як швидко розширювався Всесвіт упродовж своєї історії.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) створили, щоб виміряти цю лінійку краще за всіх попередників. Перший випуск даних DESI картує масштаб BAO в галактиках, квазарах і лісі Лайман-альфа далеких газових хмар — понад шість мільйонів об’єктів у семи інтервалах червоного зміщення від 0,1 до 4,2. Щоб людські очікування не вплинули на результат, команда проводила аналіз *засліплено*, приховуючи від самих себе космологічну відповідь доти, доки методику не зафіксували. Із великим відривом це найточніше вимірювання BAO з усіх виконаних.

DESI встановлено на 4-метровому телескопі Nicholas U. Mayall на Кітт-Пік в Аризоні. Інструмент подає

світло через тисячі оптичних волокон у спектрографи, перетворюючи положення на небі на спектри й червоні зміщення для мільйонів галактик і квазарів.

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

Що таке DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument — це спектрограф на 4-метровому телескопі Nicholas U. Mayall на Кітт-Пік в Аризоні. Він не бачить темну енергію безпосередньо — цього не може зробити жоден прилад, адже темна енергія не випромінює світла. Натомість DESI одночасно записує спектри приблизно 5 000 галактик і квазарів, визначає червоне зміщення кожного об'єкта за тим, як розширення Всесвіту розтягнуло його світло, і будує тривимірну карту мільйонів таких об'єктів. Темну енергію потім виводять із того, як ця карта показує зміну космічного розширення з часом. Увесь ланцюжок — від роботизованих волокон до акустичної лінійки — описаний у матеріалі Як працює DESI.

Гучний висновок, який розійшовся світом, звучав так: темна енергія, можливо, не є сталою — загадкова причина прискореного розширення Всесвіту може *слабшати* з часом, розхитуючи стандартну космологічну модель. Це твердження не вигадане, але його легко прочитати занадто широко. Чесна версія конкретніша й цікавіша: власна лінійка DESI, взята окремо, узгоджується зі звичайною стандартною моделлю. Натяк на щось нове з'являється лише тоді, коли DESI об'єднують з іншими даними, — і сила цього натяку залежить від того, які саме інші дані обрати.

Баріонно-акустична лінійка DESI сама по собі сумісна зі сталою темною енергією (космологічною сталою). Перевага на користь *еволюції* темної енергії виникає лише тоді, коли DESI об'єднують із космічним мікрохвильовим фоном і вибіркою наднових, причому її сила змінюється залежно від вибірки наднових.

Стандартна лінійка і два способи, якими темна енергія може змінюватися

Масштаб BAO — це *стандартна лінійка*: оскільки з фізики раннього Всесвіту нам відома її справжня довжина, порівняння цієї довжини з її видимим розміром на певній відстані показує, наскільки Всесвіт уже розширився до того моменту. Вимірюючи лінійку на багатьох відстанях, можна простежити всю історію розширення — саме нею керує темна енергія.

У стандартній моделі, що називається ΛCDM, темна енергія є *космологічною сталою*: незмінною густиною енергії порожнього простору. Фізики описують її поведінку параметром «рівняння стану» w; для справжньої космологічної сталої він дорівнює рівно -1 всюди й завжди.

Щоб перевірити це припущення, його можна послабити двома способами. Простіший — дозволити w бути іншою сталою величиною (але все одно незмінною в часі): це модель «wCDM». Багатша модель дозволяє w змінюватися в міру розширення Всесвіту й описує це двома числами: w_0, значенням сьогодні,

та w_a, швидкістю його зміни. Ця модель «w_0w_aCDM» зводиться до ΛCDM в єдиній точці $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Перевага значення w_0 більшого за -1 разом із від'ємним w_a — це саме те, що тут мається на увазі під «еволюцією темної енергії»: у минулому її відштовхувальна дія була сильнішою, а нині слабшає.

Що зробили автори

- Виміряли масштаб BAO за перший рік даних DESI — у галактиках, квазарах і лісі Лайман-альфа — для понад шести мільйонів об'єктів у семи інтервалах червоного зміщення, що охоплюють $0.1 < z < 4.2$.
- Провели аналіз **засліплено**, приховуючи космологічний результат до остаточної фіксації методики, щоб захиститися від упередження підтвердження.
- Підігнали стандартну пласку модель ΛCDM спочатку лише до BAO DESI, а потім у поєднанні з апріорною інформацією від нуклеосинтезу Великого вибуху та космічного мікрохвильового фону (CMB) за даними Planck і ACT.
- Розширили модель двома способами: сталою величиною w темної енергії (wCDM) та змінною в часі w_0w_a (w_0w_aCDM).
- Перевірили модель зі змінним у часі w, по черзі об'єднавши DESI+CMB із трьома різними каталогами наднових типу Ia — Pantheon+, Union3 і DES-SN5YR, — замість того щоб обрати один.
- Встановили межі на сумарну масу нейтрино й перевірили, як ці межі змінюються, якщо дозволити фоновій еволюції темної енергії відхилятися від ΛCDM.

Що вони виявили

- **BAO DESI самі по собі узгоджуються зі стандартною моделлю.** Вони дають густину матерії $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, а якщо дозволити темній енергії мати сталий w, отримуємо $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — практично точно значення -1 для космологічної сталої.
- У поєднанні з CMB та його гравітаційним лінзуванням DESI дає $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ і сталу Габбла $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ (68.52 ± 0.62 у поєднанні з нуклеосинтезом і акустичним масштабом CMB).
- **У моделі зі змінним у часі w комбінації даних віддають перевагу еволюції темної енергії** — $w_0 > -1$ і $w_a < 0$. Для DESI+CMB перевага становить 2.6σ, а після додавання вибірки наднових — 2.5σ, 3.5σ або 3.9σ для Pantheon+, Union3 або DES-SN5YR відповідно (сигма показує, наскільки далеко результат лежить від очікування стандартної моделі; 5σ — звичайний поріг для заяви про відкриття, і сам по собі він не означає, що інтерпретація правильна — пояснення).
- Якщо сумарну масу нейтрино залишити вільним параметром, на неї накладається жорстка межа — менше 0,072 еВ (95% довірчий рівень) для DESI+CMB, — але стаття прямо зазначає, що ця межа суттєво слабшає, якщо дозволити фону темної енергії

відхилятися від ΛCDM.

Чого це не доводить

- Це **не показує**, що темна енергія еволюціонує. Власна лінійка DESI узгоджується з космологічною сталою; натяк на еволюцію з'являється лише в *комбінованих* підгонках і лише в багатшій двопараметричній моделі.
- Це **не означає**, що «ΛCDM мертва» або що «Ейнштейн помилявся». Найсильніший показник, 3.9σ, нижчий за прийнятий фізиками поріг 5σ для заяви про відкриття, а стандартна модель залишається добрим описом DESI сам по собі.
- Результат **залежить від вибірки**. Заміна каталогу наднових змінює значущість від 2.5σ до 3.9σ — більш ніж на цілу сигму. Сигнал, сила якого настільки залежить від зовнішнього набору даних, що до нього додають, — це натяк, який треба перевіряти, а не результат, який уже можна вважати встановленим.
- Схильність даних *лише DESI* до $w_0 > -1$ **частково зумовлена однією аномальною точкою** — галактичним інтервалом при червоному зміщенні 0,51, який лежить трохи вище прогнозу ΛCDM. Але саме тут автори виконують необхідну перевірку: вони трактують цю точку як статистичну флуктуацію й показують, що заміна *всіх* низькочервонозсувних ($z < 0.6$) вимірювань DESI на старіші дані SDSS не змінює результат щодо темної енергії. Дивна точка тягне за собою DESI, взятий окремо, але **не** підтримує комбінований натяк. (Незалежні групи згодом детальніше досліджували її роль.) Отже, це застереження працює протилежно до того, як його іноді переказують: результат перевірили на стійкість саме до найбільш аномальної точки, і він витримав.
- Межа на масу нейтрино **не є модельно незалежним вердиктом**. Вона дуже жорстка лише за умови, що фонове розширення фіксують як ΛCDM; якщо це припущення послабити, межа теж послаблюється.

Наскільки сильні докази

- **Дуже сильні як вимірювання відстаней.** BAO — один із найчистіших інструментів космології, вимірювання DESI є найточнішим на сьогодні, а засліплений аналіз — саме той запобіжник, який потрібен, щоб не «побачити» в даних бажану відповідь.
- **Справді інтригуючі, але не вирішальні як твердження про темну енергію.** Перевага 2.6σ для DESI+CMB, що зростає до 3.9σ з найобмежувальнішою вибіркою наднових, — це результат, який заслуговує додаткового телескопного часу, а не результат, що скасовує модель. Головна чесна причина для обережності — розкид між вибірками наднових; водночас автори перевірили, що найбільш аномальна точка BAO не визначає результат — саме така перевірка й потрібна для твердження цього рівня.
- Стаття обережна у власних формулюваннях: значущість наведено трьома способами,

а не лише найбільше число, і прямо позначено модельну залежність результату щодо нейтрино. Якщо десь і виникає перебільшення, то переважно в переказах, а не в самій роботі.

Чому це важливо

Упродовж чверті століття «темна енергія» і «космологічна стала» вживалися майже як синоніми, бо всі вимірювання були сумісні з w, що дорівнює рівно -1. DESI — перший набір даних настільки точний, що в поєднанні з іншими він узагалі може *запитати*, чи дрейфує це -1, і отримати відповідь, яка не є однозначним «ні». Це справжня зміна того, що можуть робити дані, і тому результат заслуговує уваги. Але та сама точність дозволяє побачити й те, наскільки умовним є натяк: він живий в одних комбінаціях даних, тихий в інших і насамперед чутливий до того, який каталог наднових поєднують із DESI. Правильна реакція — ані відмахнутися, ані оголосити революцію завчасно. Варто дивитися на наступний, більший випуск DESI — DR2, який уже вийшов у 2025 році, — та на незалежні вибірки наднових і перевірити, чи посилиться дрейф, чи зникне. Саме так у космології виглядає справжнє «можливо», і його варто так і подавати.

Короткий підсумок

DESI виміряв історію розширення Всесвіту за допомогою найточнішої баріонно-акустичної лінійки з усіх створених, використавши шість мільйонів об'єктів. Сама по собі ця лінійка узгоджується зі стандартною моделлю, у якій темна енергія стала. Якщо об'єднати DESI з космічним мікрохвильовим фоном і вибіркою наднових, з'являється перевага на користь темної енергії, що змінюється з часом, — від 2.6σ до 3.9σ залежно від того, які наднові додати. Це реальний і цікавий натяк, а не відкриття: він лишається нижче порогу, якого вимагають фізики, і змінюється залежно від даних про наднові, з якими поєднують DESI. Темна енергія *може* еволюціонувати. DESI зробив це запитання достатньо точним, щоб його варто було ставити, — але ще не дав на нього відповіді.

Джерела

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