The Clean Paper

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

Самая точная космическая линейка DESI — и осторожное «возможно» о тёмной энергии

DESI измерил историю расширения Вселенной с помощью самой точной барионно-акустической линейки из когда-либо созданных, используя шесть миллионов объектов. Сама по себе эта линейка согласуется со стандартной моделью, в которой тёмная энергия постоянна. Лишь когда DESI объединяют с космическим микроволновым фоном и выборкой сверхновых, появляется предпочтение в пользу эволюции тёмной энергии — от 2.6σ до 3.9σ в зависимости от добавленной выборки сверхновых, ниже порога открытия и с заметной зависимостью от объединяемых данных. Точная постановка настоящего вопроса, а не готовый ответ.

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

Линейка, сделанная из звука

В начале истории Вселенной, ещё до появления звёзд, горячая плазма из обычной материи и света буквально «звенела». Волны давления распространялись через неё со скоростью более половины скорости света, пока Вселенная не остыла настолько, что смогли образоваться атомы и этот звон прекратился — оставив в распределении материи слабо выраженное предпочтительное расстояние. Сегодня это расстояние, *звуковой горизонт*, составляет около 150 мегапарсеков (примерно 490 миллионов световых лет) и проявляется как небольшой избыток пар галактик, разделённых именно таким расстоянием, во всех направлениях и во все эпохи. Космологи называют это барионными акустическими осцилляциями, или BAO, и используют их как стандартную линейку: измеряя, как выглядит этот «замороженный» масштаб на небе на разных расстояниях, можно восстановить, как быстро расширялась Вселенная на протяжении своей истории.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) создали, чтобы измерить эту линейку лучше всех предшественников. Первый выпуск данных DESI картирует масштаб BAO в галактиках, квазарах и лесе Лайман-альфа далёких газовых облаков — более шести миллионов объектов в семи интервалах красного смещения от 0.1 до 4.2. Чтобы человеческие ожидания не повлияли на результат, команда проводила анализ *вслепую*, скрывая от себя космологический ответ до тех пор, пока методика не была зафиксирована. С большим отрывом это самое точное измерение BAO из всех выполненных.

DESI установлен на 4-метровом телескопе Nicholas U. Mayall на Китт-Пик в Аризоне. Инструмент направляет свет через тысячи оптических волокон в спектрографы, превращая положения на небе в спектры и красные смещения для миллионов галактик и квазаров.

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

Что такое DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument — спектрограф на 4-метровом телескопе Nicholas U. Mayall на Китт-Пик в Аризоне. Он не видит тёмную энергию непосредственно — этого не может сделать никакой прибор, потому что тёмная энергия не излучает свет. Вместо этого DESI одновременно записывает спектры примерно 5 000 галактик и квазаров, определяет красное смещение каждого объекта по тому, как расширение Вселенной растянуло его свет, и строит трёхмерную карту миллионов таких объектов. Тёмную энергию затем выводят из того, как эта карта показывает изменение космического расширения со временем. Вся цепочка — от роботизированных волокон до акустической линейки — описана в материале Как работает DESI.

Громкий вывод, разошедшийся по миру, звучал так: тёмная энергия, возможно, не постоянна — загадочная причина ускоренного расширения Вселенной может *ослабевать* со временем, расшатывая стандартную космологическую модель. Это утверждение не выдумано, но его легко прочитать слишком широко. Честная версия конкретнее и интереснее: собственная линейка DESI, взятая отдельно, согласуется с обычной стандартной моделью. Намёк на что-то новое появляется лишь тогда, когда DESI объединяют с другими данными, — и сила этого намёка зависит от того, какие именно другие данные выбрать.

Барионно-акустическая линейка DESI сама по себе совместима с постоянной тёмной энергией (космологической постоянной). Предпочтение в пользу *эволюции* тёмной энергии возникает только тогда, когда DESI объединяют с космическим микроволновым фоном и выборкой сверхновых, причём его сила меняется в зависимости от выборки сверхновых.

Стандартная линейка и два способа, которыми тёмная энергия может меняться

Масштаб BAO — это *стандартная линейка*: поскольку из физики ранней Вселенной нам известна её истинная длина, сравнение этой длины с её видимым размером на определённом расстоянии показывает, насколько Вселенная уже расширилась к тому моменту. Измеряя линейку на множестве расстояний, можно проследить всю историю расширения — именно ею управляет тёмная энергия.

В стандартной модели, называемой ΛCDM, тёмная энергия является *космологической постоянной*: неизменной плотностью энергии пустого пространства. Физики описывают её поведение параметром «уравнения

состояния» w; для настоящей космологической постоянной он равен ровно -1 везде и всегда.
Чтобы проверить это предположение, его можно ослабить двумя способами. Более простой — позволить w быть другой постоянной величиной (но всё ещё неизменной во времени): это модель «wCDM». Более богатая модель позволяет w меняться по мере расширения Вселенной и описывает это двумя числами: w_0, значением сегодня, и w_a, скоростью его изменения. Эта модель «w_0w_aCDM» сводится к ΛCDM в единственной точке $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Предпочтение значения w_0 больше -1 вместе с отрицательным w_a — именно то, что здесь имеется в виду под «эволюцией тёмной энергии»: в прошлом её отталкивающее действие было сильнее, а сейчас ослабевает.

Что сделали авторы

- Измерили масштаб BAO по первому году данных DESI — в галактиках, квазарах и лесе Лайман-альфа — для более шести миллионов объектов в семи интервалах красного смещения, охватывающих $0.1 < z < 4.2$.
- Провели анализ **вслепую**, скрывая космологический результат до окончательной фиксации методики, чтобы защититься от подтверждающего смещения.
- Подогнали стандартную плоскую модель ΛCDM сначала только к BAO DESI, а затем в сочетании с априорной информацией от нуклеосинтеза Большого взрыва и космического микроволнового фона (CMB) по данным Planck и ACT.
- Расширили модель двумя способами: постоянной величиной w тёмной энергии (wCDM) и изменяющейся во времени w_0w_a (w_0w_aCDM).
- Проверили модель с меняющимся во времени w, по очереди объединяя DESI+CMB с тремя разными каталогами сверхновых типа Ia — Pantheon+, Union3 и DES-SN5YR — вместо того, чтобы выбрать один.
- Установили пределы на суммарную массу нейтрино и проверили, как эти пределы меняются, если разрешить фоновой эволюции тёмной энергии отклоняться от ΛCDM.

Что они обнаружили

- **BAO DESI сами по себе согласуются со стандартной моделью.** Они дают плотность материи $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, а если разрешить тёмной энергии иметь постоянный w, получаем $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — практически ровно значение -1 для космологической постоянной.
- В сочетании с CMB и его гравитационным линзированием DESI даёт $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ и постоянную Хаббла $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ (68.52 ± 0.62 в сочетании с нуклеосинтезом и акустическим масштабом CMB).

- **В модели с меняющимся во времени w комбинации данных отдают предпочтение эволюции тёмной энергии** — $w_0 > -1$ и $w_a < 0$. Для DESI+CMB предпочтение составляет 2.6σ, а после добавления выборки сверхновых — 2.5σ, 3.5σ или 3.9σ для Pantheon+, Union3 или DES-SN5YR соответственно (сигма показывает, насколько далеко результат находится от ожидания стандартной модели; 5σ — обычный порог для заявления об открытии, и сам по себе он не означает, что интерпретация правильна — объяснение).
- Если суммарную массу нейтрино оставить свободным параметром, на неё накладывается жёсткий предел — менее 0.072 эВ (95%-й доверительный уровень) для DESI+CMB, — но статья прямо отмечает, что этот предел существенно ослабевает, если разрешить фону тёмной энергии отклоняться от ΛCDM.

Чего это не доказывает

- Это **не показывает**, что тёмная энергия эволюционирует. Собственная линейка DESI согласуется с космологической постоянной; намёк на эволюцию появляется лишь в *комбинированных* подгонках и только в более богатой двухпараметрической модели.
- Это **не означает**, что «ΛCDM мертва» или что «Эйнштейн ошибался». Самый сильный показатель, 3.9σ, ниже принятого физиками порога 5σ для заявления об открытии, а стандартная модель остаётся хорошим описанием DESI самого по себе.
- Результат **зависит от выборки**. Замена каталога сверхновых меняет значимость от 2.5σ до 3.9σ — более чем на целую сигму. Сигнал, сила которого настолько зависит от добавляемого внешнего набора данных, — это намёк, который нужно проверять, а не результат, который уже можно считать установленным.
- Склонность данных *только DESI* к $w_0 > -1$ **частично обусловлена одной аномальной точкой** — галактическим интервалом при красном смещении 0.51, который лежит немного выше прогноза ΛCDM. Но именно здесь авторы выполняют необходимую проверку: они трактуют эту точку как статистическую флуктуацию и показывают, что замена *всех* низкокрасносмещённых ($z < 0.6$) измерений DESI на более старые данные SDSS не меняет результат относительно тёмной энергии. Странная точка тянет за собой DESI, взятый отдельно, но **не** поддерживает комбинированный намёк. (Независимые группы позднее подробнее исследовали её роль.) Поэтому эта оговорка работает противоположно тому, как её иногда пересказывают: результат проверили на устойчивость именно к самой аномальной точке, и он выдержал.
- Предел на массу нейтрино **не является модельно-независимым вердиктом**. Он очень жёсткий только при условии, что фоновое расширение фиксируют как ΛCDM; если это предположение ослабить, предел тоже ослабевает.

Насколько сильны доказательства

- **Очень сильны как измерения расстояний.** BAO — один из самых чистых инструментов космологии, измерение DESI является самым точным на сегодняшний день, а слепой анализ — именно тот предохранитель, который нужен, чтобы не «увидеть» в данных желаемый ответ.
- **Действительно интригуют, но не являются решающими как утверждение о тёмной энергии.** Предпочтение 2.6σ для DESI+CMB, растущее до 3.9σ с наиболее ограничивающей выборкой сверхновых, — это результат, заслуживающий дополнительного телескопного времени, а не результат, отменяющий модель. Главная честная причина для осторожности — разброс между выборками сверхновых; одновременно авторы проверили, что самая аномальная точка BAO не определяет результат — именно такая проверка и нужна для утверждения такого уровня.
- Статья осторожна в собственных формулировках: значимость приведена тремя способами, а не только максимальным числом, и прямо обозначена модельная зависимость результата по нейтрино. Если где и появляется преувеличение, то преимущественно в пересказах, а не в самой работе.

Почему это важно

На протяжении четверти века «тёмная энергия» и «космологическая постоянная» употреблялись почти как синонимы, потому что все измерения были совместимы с w, равным ровно -1. DESI — первый набор данных настолько точный, что в сочетании с другими он вообще может *спросить*, дрейфует ли это -1, и получить ответ, который не является однозначным «нет». Это реальное изменение того, что способны делать данные, и поэтому результат заслуживает внимания. Но та же точность позволяет увидеть и то, насколько условен намёк: он жив в одних комбинациях данных, тих в других и прежде всего чувствителен к тому, какой каталог сверхновых объединяют с DESI. Правильная реакция — ни отмахнуться, ни объявить революцию заранее. Стоит смотреть на следующий, более крупный выпуск DESI — DR2, уже вышедший в 2025 году, — и на независимые выборки сверхновых и проверять, усилится ли дрейф или исчезнет. Именно так в космологии выглядит настоящее «возможно», и именно так его стоит подавать.

Краткий итог

DESI измерил историю расширения Вселенной с помощью самой точной барионно-акустической линейки из когда-либо созданных, используя шесть миллионов объектов. Сама по себе эта линейка согласуется со стандартной моделью, в которой тёмная энергия постоянна. Если объединить DESI с космическим микроволновым фоном и

выборкой сверхновых, появляется предпочтение в пользу тёмной энергии, меняющейся со временем, — от 2.6σ до 3.9σ в зависимости от того, какие сверхновые добавить. Это реальный и интересный намёк, а не открытие: он остаётся ниже порога, которого требуют физики, и меняется в зависимости от данных о сверхновых, с которыми объединяют DESI. Тёмная энергия *может* эволюционировать. DESI сделал этот вопрос достаточно точным, чтобы его стоило задавать, — но ещё не дал на него ответа.

Источники

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