The Clean Paper

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

Най-точната космическа линийка на DESI и едно внимателно „може би“ за тъмната енергия

DESI измери историята на разширението на Вселената с най-прецизната досега барионно-акустична линийка, използвайки шест милиона обекта. Сама по себе си тази линийка е съгласувана със стандартния модел, в който тъмната енергия е константа. Предпочитание към променяща се тъмна енергия се появява само когато DESI се комбинира с космическия микровълнов фон и извадка от свръхнови — при 2,6σ до 3,9σ според това кои свръхнови се добавят, под прага, който физиците изискват за откритие, и чувствително към данните, с които се комбинира. Реален въпрос, формулиран по-точно, а не отговор.

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

Линийка, направена от звук

В ранната Вселена, преди да има звезди, горещата плазма от обикновена материя и светлина е „звъняла“. Вълни на налягане са се движели през нея с повече от половината скорост на светлината, докато Вселената не се охлажда достатъчно, за да се образуват атоми и звъненето да спре — замразявайки едно слабо предпочитано разстояние в разпределението на материята. Това разстояние, *звуковият хоризонт*, днес е около 150 мегапарсека (приблизително 490 милиона светлинни години) и се проявява като малък излишък от двойки галактики, разделени на такова разстояние, във всички посоки и епохи. Космолозите го наричат барионни акустични осцилации, или BAO, и го използват като стандартна линийка: измерват колко голям изглежда този замръзнал мащаб на небето на различни разстояния и така проследяват колко бързо се е разширявала Вселената през историята си.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) е създаден да измери тази линийка по-добре от всеки преди него. Първото му публикуване на данни картографира мащаба BAO в галактики, квазари и Лайман-алфа гората от далечни газови облаци — над шест милиона обекта, разпределени в седем интервала по червено отместване от 0,1 до 4,2. За да не позволи очакванията на хората да влияят върху резултата, екипът провежда анализа *на сляпо*, скривайки космологичния отговор от самите себе си, докато методите не бъдат фиксирани. Това е с голяма преднина най-прецизното BAO измерване досега.

DESI е монтиран на 4-метровия телескоп Nicholas U. Mayall в Kitt Peak, Аризона. Инструментът подава светлина през хиляди оптични влакна към спектрографи и превръща позиции на небето в спектри и червени отмествания за милиони галактики и квазари.

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

Какво е DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument е спектрограф на 4-метровия телескоп Nicholas U. Mayall в Kitt Peak, Аризона. Той не вижда тъмната енергия директно — това не е възможно, защото тъмната енергия не излъчва светлина. Вместо това записва едновременно спектрите на около 5 000 галактики и квазари, определя червеното отместване на всеки обект по това колко разширяващата се Вселена е разтегнала светлината му и изгражда триизмерна карта на милиони такива обекти. След това тъмната енергия се извежда от начина, по който тази карта показва промяната на космическото разширение във времето. За цялата верига — от роботизираните влакна до акустичната линийка — вижте Как работи DESI.

Заглавието, което обиколи света, беше, че тъмната енергия може би не е константа — че загадъчното нещо, което ускорява разширението на Вселената, може да *отслабва* с времето и така да пропуква стандартния космологичен модел. Това твърдение не е измислено, но лесно може да бъде прочетено прекалено силно. Честната версия е по-конкретна и по-интересна: собствената линийка на DESI, взета сама, е съгласувана с обикновения стандартен модел. Намекът за нещо ново се появява едва когато DESI се съчетае с други данни — и колко силен изглежда този намек зависи от това кои други данни избирате.

Барионно-акустичната линийка на DESI сама по себе си е съвместима с постоянна тъмна енергия (космологична константа). Предпочитанието към *променяща се* тъмна енергия възниква само когато DESI се комбинира с космическия микровълнов фон и извадка от свръхнови — и силата му се променя според използваната извадка от свръхнови.

Стандартна линийка и двата начина тъмната енергия да се променя

Мащабът BAO е *стандартна линийка*: понеже знаем истинската му дължина от физиката на ранната Вселена, сравнението между тази истинска дължина и видимия му размер на дадено разстояние показва колко се е разширила Вселената дотогава. Измерена на много разстояния, линийката проследява цялата история на разширението — именно онова, което тъмната енергия управлява.

В стандартния модел, наречен ΛCDM, тъмната енергия е *космологична константа*: фиксирана енергийна плътност на празното пространство, която никога не се променя. Физиците описват поведението ѝ с параметъра на „уравнението на състоянието“ w, който за истинска космологична константа е

точно -1 — навсякъде и винаги.
За да проверите това, можете да отпуснете условието по два начина. По-простият е да позволите w да бъде друга константа (все още неизменна във времето) — това е „wCDM“. По-богатият модел позволява w да се променя с разширяването на Вселената и се описва с две числа: w_0, стойността му днес, и w_a, скоростта на промяната. Този модел „w_0w_aCDM“ се свежда до ΛCDM в единствената точка $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Предпочитание към w_0 по-голямо от -1 и w_a отрицателно е това, което тук означава „еволюираща тъмна енергия“: тъмна енергия, която е била по-силно отблъскваща в миналото и отслабва сега.

Какво направиха авторите

- Измериха мащаба BAO от първата година данни на DESI — галактики, квазари и Лайман-алфа гората — над шест милиона обекта в седем интервала по червено отместване, обхващащи $0.1 < z < 4.2$.
- Проведоха анализа **на сляпо**, като скриха космологичния резултат, докато методологията не бъде фиксирана, за да ограничат потвърждаващото пристрастие.
- Напаснаха стандартния плосък модел ΛCDM към BAO данните на DESI самостоятелно, а после в комбинация с априорно ограничение от нуклеосинтезата на Големия взрив и космическия микровълнов фон (CMB) от Planck и ACT.
- Разшириха модела по два начина: постоянна стойност на тъмноенергийния w (wCDM) и променящ се във времето w_0w_a (w_0w_aCDM).
- Провериха модела с променяща се тъмна енергия, като комбинираха DESI+CMB последователно с три различни компилации от свръхнови тип Ia — Pantheon+, Union3 и DES-SN5YR — вместо да изберат само една.
- Поставиха граници върху сумарната маса на неутриното и провериха как се променят тези граници, ако се позволи тъмноенергийният фон да се отклонява.

Какво откриха

- **BAO данните на DESI сами по себе си са съвместими със стандартния модел.** Те дават плътност на материята $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, а когато на тъмната енергия се позволи постоянна стойност на w, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — практически върху стойността -1 за космологична константа.
- В комбинация с CMB и неговото гравитационно лещене DESI дава $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ и константа на Хъбъл $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 при комбинация с нуклеосинтезата и акустичния мащаб на CMB вместо това).
- **В модела с променяща се във времето тъмна енергия комбинациите предпочитат еволюираща тъмна енергия** — $w_0 > -1$ и $w_a < 0$. Предпочитанието е 2.6σ за DESI+CMB, а когато се добави извадка от свръхнови, става 2.5σ, 3.5σ или 3.9σ

съответно за Pantheon+, Union3 или DES-SN5YR (sigma показва колко далеч стои резултатът от очакването на стандартния модел; 5σ е обичайният праг за заявено откритие и не означава, че интерпретацията непременно е правилна — ръководство).
- Ако се остави свободна, сумарната маса на неутриното е силно ограничена — под 0,072 eV (95% доверителност) за DESI+CMB — но статията изрично отбелязва, че това ограничение отслабва значително, ако се позволи тъмноенергийният фон да се отклонява от ΛCDM.

Какво не доказва това

- Това **не** показва, че тъмната енергия се променя. Собствената линийка на DESI е съвместима с космологична константа; намекът за еволюция се появява само в *комбинирани* напасвания и само в по-богатия модел с два параметъра.
- Това **не** означава „ΛCDM е мъртъв“ или „Айнщайн е грешал“. Най-силното число, 3.9σ, е под конвенционалния праг 5σ, който физиците изискват, преди да нарекат нещо откритие — а стандартният модел остава добро описание на DESI самостоятелно.
- Резултатът **не е независим от извадката**. Смяната на компилацията от свръхнови променя значимостта от 2.5σ до 3.9σ — с повече от една цяла sigma. Сигнал, чийто размер зависи толкова силно от това кой външен набор данни прикрепяте към него, е намек за последващо изследване, не измерване, което вече може да се приеме за установено.
- Наклонът на DESI *самостоятелно* към $w_0 > -1$ е задвижван **отчасти от една аномална точка** — галактичния интервал при червено отместване 0,51, който стои малко по-високо от ΛCDM. Но точно тук статията прави необходимата проверка: третира точката като статистическа флуктуация и показва, че замяната на *всички* измервания на DESI при ниско червено отместване ($z < 0.6$) с по-старите от SDSS не променя тъмноенергийния резултат. Странната точка дърпа DESI, когато е самостоятелно; тя **не** поддържа комбинирания намек. (Независими групи впоследствие разгледаха ролята ѝ по-подробно.) Така че тази уговорка сочи в обратната посока на някои популярни преразкази: резултатът е бил натоварен с тест срещу най-аномалната си точка и е издържал.
- Ограничението върху масата на неутриното **не е моделно независимо заключение**. То е строго само ако фоновото разширение се фиксира по ΛCDM; ако това условие се отпусне, отслабва и ограничението.

Колко силни са доказателствата

- **Много силни като измерване на разстояния.** BAO линийката е един от най-чистите инструменти в космологията, тази на DESI е най-прецизната досега, а слепият анализ е точно защитата, която бихте искали срещу прочитане на желан отговор в данните.

- **Наистина интригуващи, но не решаващи, като твърдение за тъмната енергия.** Предпочитание от 2.6σ при DESI+CMB, нарастващо до 3.9σ с най-ограничаващата извадка от свръхнови, е вид резултат, който заслужава повече телескопно време — не такъв, който преобръща модел. Честната причина за предпазливост е разликата между извадките от свръхнови; в полза на авторите е, че те проверяват и дали най-аномалната им BAO точка не задвижва резултата — точно домашната работа, от която подобно твърдение се нуждае.
- Статията е внимателна към собствените си ограничения: съобщава значимостта по три начина, вместо да цитира само най-голямата стойност, и отбелязва моделната зависимост на резултата за неутриното. Преувеличението, когато го има, е в преразказа, не в статията.

Защо това има значение

В продължение на четвърт век „тъмна енергия“ и „космологична константа“ се използваха почти като взаимозаменяеми понятия, защото всяко измерване беше съвместимо със стойност на w точно -1. DESI е първият набор данни с достатъчна точност, че в комбинация с други данни изобщо да може да *попита* дали тази -1 се променя — и да получи отговор, който не е просто твърдо „не“. Това е реална промяна в това, което данните могат да правят, и затова резултатът заслужава внимание. Но същата точност ни позволява да видим колко условен е намекът: жив в някои комбинации от данни, тих в други и чувствителен най-вече към това кой каталог от свръхнови се съчетава с DESI. Правилната позиция не е нито пренебрежение, нито преждевременно обявена революция. Трябва да се следи следващото, по-голямо публикуване на DESI — DR2, което вече излезе през 2025 г. — и независимите извадки от свръхнови, за да се види дали отклонението ще се затвърди или ще изчезне. Така изглежда едно истинско „може би“ в космологията и си струва да бъде съобщено като „може би“.

Кратко и ясно

DESI измери историята на разширението на Вселената с най-добрата барионно-акустична линийка досега, използвайки шест милиона обекта. Сама по себе си тази линийка е съгласувана със стандартния модел, в който тъмната енергия е константа. Комбинирайте я с космическия микровълнов фон и извадка от свръхнови и се появява предпочитание към тъмна енергия, която се променя във времето — при 2.6σ до 3.9σ според това кои свръхнови добавяте. Това е реален и интересен намек, не откритие: остава под прага, който физиците изискват, и се променя според данните за свръхнови, с които го комбинирате. Тъмната енергия може би еволюира. DESI превърна това във въпрос, който си струва да бъде задаван прецизно — но все още не във въпрос, на който е отговорил.

Източници

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