The Clean Paper

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

Најпрецизниот космички линијар на DESI и внимателното „можеби“ за темната енергија

DESI ја измери историјата на ширењето на универзумот со најпрецизниот барионско-акустичен линијар досега, од шест милиони објекти. Сам за себе, линијарот се согласува со стандардниот модел во кој темната енергија е константа. Само кога DESI се комбинира со космичката микробранова заднина и примерок супернови се појавува предност за еволуирачка темна енергија — од 2,6σ до 3,9σ зависно од тоа кои супернови се додаваат, под прагот за откритие и чувствително на спарените податоци. Реално прашање направено прецизно, не одговор.

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

Линијар направен од звук

Во раниот универзум, пред да постојат ѕвезди, жешката плазма од обична материја и светлина „ѕвонела“. Бранови на притисок се движеле низ неа со повеќе од половина од брзината на светлината, сè додека универзумот не се оладил доволно за да се формираат атоми и осцилациите не престанале — оставајќи слаб, претпочитан размер во распределбата на материјата. Тој размер, *звучниот хоризонт*, денес е околу 150 мегапарсеци (приближно 490 милиони светлосни години) и се гледа како мал вишок галаксии оддалечени токму за толкаво растојание, во сите насоки и во различни космички епохи. Космолозите го нарекуваат барионска акустична осцилација, или BAO, и го користат како стандарден линијар: ако измерите колку голем изгледа тој замрзнат размер на небото на различни растојанија, ја реконструирате брзината со која универзумот се ширел низ својата историја.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) е изграден за да го измери тој линијар попрецизно од сè претходно. Првото објавување податоци ја мапира BAO-скалата во галаксии, квазари и Лајман-алфа шумата од далечни облаци гас — повеќе од шест милиони објекти во седум интервали на црвено поместување од 0,1 до 4,2. За човечките очекувања да не влијаат врз резултатот, тимот ја спровел анализата *слепо*, криејќи го космолошкиот одговор од самите себе сè додека методите не биле заклучени. Со голема разлика, ова е најпрецизното BAO-мерење досега.

DESI е поставен на 4-метарскиот телескоп Nicholas U. Mayall на Kitt Peak, Аризона. Инструментот води

илјадници оптички влакна кон спектрографи, претворајќи ги положбите на небото во спектри и црвени поместувања за милиони галаксии и квазари.

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

Што е DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument е спектрограф на 4-метарскиот телескоп Nicholas U. Mayall на Kitt Peak, Аризона. Тој не ја гледа темната енергија директно — ништо не може, бидејќи темната енергија не емитува светлина. Наместо тоа, истовремено ги снима спектрите на околу 5.000 галаксии и квазари, го одредува црвеното поместување на секој објект од тоа колку ширењето на универзумот му ја растегнало светлината и создава тридимензионална карта од милиони објекти. Темната енергија потоа се заклучува индиректно од тоа како картата покажува дека космичкото ширење се менувало низ времето. За целиот синџир — од роботските влакна до акустичниот линијар — видете Како работи DESI.

Насловот што најмногу се прошири беше дека темната енергија можеби не е константа — дека мистериозната компонента што го забрзува ширењето на универзумот можеби *ослабува* со времето, што би го нарушило стандардниот космолошки модел. Тврдењето не е измислено, но лесно се преувеличува. Поточната верзија е поспецифична и поинтересна: сопствениот линијар на DESI, сам за себе, се согласува со стандардниот модел. Назнаката за нешто ново се појавува само кога DESI се комбинира со други податоци — а нејзината сила зависи од тоа кои други податоци ќе се изберат.

Барионско-акустичниот линијар на DESI сам по себе е согласен со константна темна енергија, односно космолошка константа. Предноста за *еволуирачка* темна енергија се појавува само кога DESI се комбинира со космичката микробранова заднина и примерок супернови — а јачината се менува зависно од тоа кој примерок супернови се користи.

Стандарден линијар и двата начини на кои темната енергија може да се менува

BAO-скалата е *стандарден линијар*: бидејќи ја знаеме нејзината вистинска должина од физиката на раниот универзум, споредбата на вистинската должина со привидната големина на дадено растојание кажува колку универзумот дотогаш се проширил. Измерен на многу растојанија, линијарот ја следи целата историја на ширењето — токму она врз што влијае темната енергија.

Во стандардниот модел, ΛCDM, темната енергија е *космолошка константа*: фиксна енергетска густина на празниот простор што не се менува. Физичарите го опишуваат нејзиното однесување со параметарот на „равенката на состојба“ w, кој за вистинска космолошка константа е точно -1, секогаш и насекаде.

Тоа може да се тестира со две проширувања. Поедноставното дозволува w да биде некоја друга константа, но и понатаму непроменлива во времето — моделот „wCDM“. Побогатото дозволува w да се менува додека универзумот се шири,

> опишано со две бројки: w_0, денешната вредност, и w_a, брзината на промена. Овој модел „w_0w_aCDM“ се сведува на ΛCDM во единствената точка $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Предност за w_0 поголемо од -1 и негативно w_a е она што тука се нарекува „еволуирачка темна енергија“: темна енергија што во минатото била поодбивна, а денес ослабува.

Што направиле авторите

- Ја измериле BAO-скалата од првата година податоци на DESI — галаксии, квазари и Лајман-алфа шумата — со повеќе од шест милиони објекти во седум интервали на црвено поместување, $0.1 < z < 4.2$.
- Ја спровеле анализата **слепо**, криејќи го космолошкиот резултат додека методологијата не била фиксирана, за да се намали ризикот од пристрасност кон очекуван исход.
- Го вклопиле стандардниот рамен ΛCDM-модел само со BAO од DESI, а потоа и во комбинација со претходна информација од нуклеосинтезата на Големата експлозија и космичката микробранова заднина (CMB) од Planck и ACT.
- Го прошириле моделот на два начина: со константно w за темната енергија (wCDM) и со временски променливо w_0w_a (w_0w_aCDM).
- Го тестирале временски променливиот модел со DESI+CMB и, поединечно, три различни компилации на супернови тип Ia — Pantheon+, Union3 и DES-SN5YR — наместо да изберат само една.
- Поставиле ограничувања на збирната маса на неутрината и провериле како тие се менуваат ако позадинското ширење поради темната енергија се дозволи да отстапува од ΛCDM.

Што откриле

- **BAO од DESI сами се согласуваат со стандардниот модел.** Даваат густина на материјата $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, а кога на темната енергија ѝ се дозволува константно w, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — практично точно на вредноста -1 за космолошка константа.
- Во комбинација со CMB и нејзиното гравитациско леќирање, DESI дава $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ и Хаблова константа $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 кога наместо тоа се комбинира со нуклеосинтеза и акустичната скала на CMB).
- **Во моделот со временски променлива темна енергија, комбинациите претпочитаат еволуирачка темна енергија** — $w_0 > -1$ и $w_a < 0$. Предноста е 2.6σ за DESI+CMB, а со додавање примерок супернови станува 2.5σ, 3.5σ или 3.9σ за Pantheon+, Union3 и DES-SN5YR, соодветно (сигма мери колку резултатот е оддалечен од очекувањето на стандардниот модел; 5σ е вообичаениот праг за тврдење за откритие и не значи дека толкувањето нужно е точно — водич).
- Ако се остави слободна, збирната маса на неутрината е силно ограничена — под

0,072 eV (95% доверба) за DESI+CMB — но трудот експлицитно нагласува дека границата значително се олабавува ако на позадинската темна енергија ѝ се дозволи да отстапува од ΛCDM.

Што ова не докажува

- **Не** покажува дека темната енергија еволуира. Сопствениот линијар на DESI е согласен со космолошка константа; назнаката за еволуција се појавува само во *комбинирани* вклопувања и само во побогатиот модел со два параметра.
- **Не** значи „ΛCDM е мртов“ или „Ајнштајн погрешил“. Најсилната бројка, 3.9σ, е под конвенционалниот праг 5σ што физичарите го бараат за да зборуваат за откритие — а стандардниот модел и натаму добро ги опишува DESI-податоците сами по себе.
- Резултатот **зависи од примерокот**. Промената на компилацијата супернови ја поместува значајноста од 2.5σ до 3.9σ — повеќе од цела сигма. Сигнал чија големина толку зависи од тоа која надворешна база се додава е назнака што треба дополнително да се истражува, не веќе утврдена мерка.
- Наклонот на DESI *сам* кон $w_0 > -1$ е **делумно поттикнат од една аномална точка** — галаксискиот интервал на црвено поместување 0,51, кој лежи малку високо во однос на ΛCDM. Но трудот го проверува токму тоа: ја третира точката како статистичка флуктуација и покажува дека замената на *сите* мерења на DESI на ниско црвено поместување ($z < 0.6$) со постарите мерења од SDSS не го менува резултатот за темната енергија. Чудната точка го влече DESI кога се гледа самостојно; **не** ја држи комбинираната назнака. (Независни групи подоцна подетално ја анализирале нејзината улога.) Значи ова ограничување всушност оди спротивно од начинот на кој понекогаш се прераскажува: резултатот бил намерно стрес-тестиран со најаномалниот податок и останал.
- Ограничувањето на масата на неутрината **не е модел-независна пресуда**. Строго е само ако позадинското ширење е фиксирано на ΛCDM; ако тоа се олабави, се олабавува и границата.

Колку се убедливи доказите?

- **Многу силни како мерење растојание.** BAO-линијарот е една од најчистите алатки во космологијата, мерењето на DESI е најпрецизно досега, а слепата анализа е токму заштитата што сакате да ја имате против несвесно барање на посакуваниот одговор во податоците.
- **Навистина интригантни, но не одлучувачки како тврдење за темната енергија.** Предност од 2.6σ за DESI+CMB, која расте до 3.9σ со најстрогиот примерок супернови, е резултат што оправдува повеќе набљудувања — не резултат што го урива моделот. Најчесната причина за претпазливост е распонот меѓу примероците супернови; во корист на авторите, тие провериле и дека најаномалната BAO-точка не го носи

резултатот — токму проверката што вакво тврдење ја бара.
- Трудот е внимателен со сопствениот резултат: ја пријавува значајноста на три начини наместо само најголемата вредност и ја означува моделската зависност на резултатот за неутрината. Претерувањето, каде што го има, е во прераскажувањето, не во самиот труд.

Зошто е важно

Четврт век „темна енергија“ и „космолошка константа“ речиси се користат како синоними, бидејќи сите мерења биле согласни со w точно -1. DESI е првата база доволно прецизна за, во комбинација со други, воопшто сериозно да праша дали тој -1 се менува — и да добие одговор што не е рамно „не“. Тоа е вистинска промена во она што податоците можат да го тестираат и затоа резултатот заслужува внимание. Но истата прецизност покажува и колку е условна назнаката: присутна во некои комбинации, тивка во други и особено чувствителна на тоа кој каталог на супернови се спарува со DESI. Правилниот став не е ниту отфрлање ниту предвремено прогласување револуција. Треба да се гледа следното, поголемо објавување на DESI — DR2, веќе објавено во 2025 година — и независните примероци супернови, и да се види дали отстапувањето ќе се зацврсти или ќе исчезне. Вака изгледа вистинско „можеби“ во космологијата и вреди да се извести токму како „можеби“.

Кратко резиме

DESI ја измери историјата на ширењето на универзумот со најдобриот барионско-акустичен линијар досега, користејќи шест милиони објекти. Сам за себе, тој линијар се согласува со стандардниот модел во кој темната енергија е константа. Кога се комбинира со космичката микробранова заднина и примерок супернови, се појавува предност за темна енергија што се менува со времето — од 2.6σ до 3.9σ, зависно од тоа кои супернови се додаваат. Тоа е реална и интересна назнака, не откритие: останува под прагот што го бараат физичарите и се менува со надворешните податоци со кои се спарува. Темната енергија можеби еволуира. DESI го направи тоа прашање доволно прецизно за сериозно да се постави — но сè уште не го одговори.

Извори

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