The Clean Paper

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

DESI-jevo najoštrije kozmičko ravnalo i oprezno „možda" o tamnoj energiji

DESI je izmjerio povijest širenja svemira najpreciznijim barionsko-akustičkim ravnalom dosad, na šest milijuna objekata. Samo za sebe, to se ravnalo slaže sa standardnim modelom u kojem je tamna energija konstanta. Tek kada se DESI kombinira s kozmičkom mikrovalnom pozadinom i uzorkom supernova pojavljuje se preferencija za tamnu energiju koja se mijenja — na razini od 2.6σ do 3.9σ, ovisno o tome koje se supernove dodaju, ispod praga koji fizičari traže za otkriće i osjetljivo na podatke s kojima se kombinira. Stvarno pitanje precizno postavljeno, a ne odgovor.

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

Ravnalo načinjeno od zvuka

U ranom svemiru, prije nego što su postojale zvijezde, vruća plazma obične tvari i svjetlosti titrala je poput zvona. Valovi tlaka prolazili su kroz nju brzinom većom od polovice brzine svjetlosti, sve dok se svemir nije dovoljno ohladio da nastanu atomi i titranje prestane — ostavljajući slabu, povlaštenu udaljenost zamrznutu u raspodjeli tvari. Ta udaljenost, *zvučni horizont*, danas iznosi oko 150 megaparseka (otprilike 490 milijuna svjetlosnih godina), a očituje se kao blagi višak galaksija međusobno razdvojenih upravo tom udaljenošću, u svim smjerovima i u svim epohama. Kozmolozi to nazivaju barionskim akustičkim oscilacijama, ili BAO, i koriste ih kao standardno ravnalo: izmjerite kolikom se ta zamrznuta skala čini na nebu na različitim udaljenostima i možete rekonstruirati koliko se brzo svemir širio kroz svoju povijest.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) izgrađen je kako bi to ravnalo izmjerio preciznije nego itko prije. Njegovo prvo izdanje podataka mapira BAO skalu u galaksijama, kvazarima i Lyman-alfa šumi udaljenih oblaka plina — na više od šest milijuna objekata, raspoređenih u sedam intervala crvenog pomaka od 0.1 do 4.2. Kako bi ljudska očekivanja što manje utjecala na rezultat, tim je analizu proveo *slijepo*, skrivajući kozmološki ishod od samih sebe sve dok metode nisu bile zaključane. To je, s velikom razlikom, najpreciznije mjerenje BAO-a dosad.

DESI je postavljen na 4-metarski teleskop Nicholas U. Mayall na Kitt Peaku u Arizoni. Instrument dovodi svjetlost kroz tisuće optičkih vlakana do spektrografa, pretvarajući položaje na nebu u spektre i crvene pomake za milijune galaksija i kvazara.

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

Što je DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument je spektrograf na 4-metarskom teleskopu Nicholas U. Mayall na Kitt Peaku u Arizoni. On ne vidi tamnu energiju izravno — to ne može nijedan instrument jer tamna energija ne emitira svjetlost. Umjesto toga istodobno bilježi spektre oko 5,000 galaksija i kvazara, iz rastezanja njihove svjetlosti zbog širenja svemira očitava crveni pomak svakog objekta i gradi trodimenzionalnu kartu milijuna takvih objekata. Tamna energija zatim se zaključuje iz toga kako ta karta pokazuje promjenu kozmičkog širenja kroz vrijeme. Za cijeli lanac — od robotskih vlakana do akustičkog ravnala — pogledajte Kako DESI radi.

Naslov koji se najviše proširio bio je da tamna energija možda nije konstanta — da bi tajanstvena pojava koja ubrzava širenje svemira mogla s vremenom *slabjeti*, stvarajući pukotinu u standardnom kozmološkom modelu. Ta tvrdnja nije izmišljena, ali lako ju je protumačiti preširoko. Poštenija verzija je određenija, a time i zanimljivija: DESI-jevo vlastito ravnalo, samo za sebe, slaže se s uobičajenim standardnim modelom. Naznaka nečeg novog pojavljuje se tek kada se DESI spoji s drugim podacima — a jačina te naznake ovisi o tome koje druge podatke odaberete.

DESI-jevo barionsko-akustičko ravnalo samo za sebe u skladu je s konstantnom tamnom energijom (kozmološkom konstantom). Preferencija za tamnu energiju koja se *mijenja* pojavljuje se tek kada se DESI kombinira s kozmičkom mikrovalnom pozadinom i uzorkom supernova — a njezina se jačina mijenja ovisno o tome koji se uzorak supernova koristi.

Standardno ravnalo i dva načina na koja se tamna energija može mijenjati

BAO skala je *standardno ravnalo*: budući da iz fizike ranog svemira znamo njezinu stvarnu duljinu, usporedba te duljine s prividnom veličinom na određenoj udaljenosti govori nam koliko se svemir do tada proširio. Mjereno na mnogim udaljenostima, to ravnalo iscrtava cijelu povijest širenja — upravo ono na što tamna energija utječe.

U standardnom modelu, nazvanom ΛCDM, tamna energija je *kozmološka konstanta*: stalna gustoća energije praznog prostora koja se nikada ne mijenja. Fizičari njezino ponašanje opisuju parametrom "jednadžbe stanja", w, koji za pravu kozmološku konstantu svugdje i uvijek iznosi točno -1.

To se može testirati na dva načina popuštanjem te pretpostavke. Jednostavnije je dopustiti da w bude neka druga konstanta (ali i dalje nepromjenjiva u vremenu) — to je "wCDM". Bogatiji model dopušta da se w mijenja kako se svemir širi, a opisuje ga s dva broja: w_0, njegovom vrijednošću danas, i w_a, brzinom kojom se mijenja. Taj model "w_0w_aCDM" svodi se na ΛCDM u jednoj točki, $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Preferencija za w_0 veći od -1 uz negativan w_a ono je što ovdje znači "tamna energija koja se mijenja": tamna energija koja je u prošlosti snažnije djelovala odbojno, a sada popušta.

Što su autori učinili

- Izmjerili su BAO skalu iz DESI-jeve prve godine podataka — galaksija, kvazara i Lyman-alfa šume — na više od šest milijuna objekata u sedam intervala crvenog pomaka koji obuhvaćaju $0.1 < z < 4.2$.
- Analizu su proveli **slijepo**, skrivajući kozmološki rezultat sve dok metodologija nije bila zaključana, kako bi se zaštitili od pristranosti potvrđivanja.
- Prilagodili su standardni ravni ΛCDM model samo DESI-jevim BAO podacima, a zatim i kombinaciji s priorom iz nukleosinteze Velikog praska te kozmičkom mikrovalnom pozadinom (CMB) iz Plancka i ACT-a.
- Proširili su model na dva načina: konstantnim w za tamnu energiju (wCDM) i vremenski promjenjivim $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$CDM).
- Vremenski promjenjiv model testirali su kombinirajući DESI+CMB redom s tri različite zbirke supernova tipa Ia — Pantheon+, Union3 i DES-SN5YR — umjesto da odaberu samo jednu.
- Postavili su granice na zbroj masa neutrina i provjerili kako se te granice mijenjaju ako se pozadini tamne energije dopusti odstupanje.

Što su otkrili

- **DESI BAO sam za sebe u skladu je sa standardnim modelom.** Daje gustoću tvari $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, a kada se tamnoj energiji dopusti konstantan w, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — praktički točno na vrijednosti -1 kozmološke konstante.
- U kombinaciji s CMB-om i njegovim gravitacijskim lećenjem DESI daje $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ i Hubbleovu konstantu $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 kada se umjesto toga kombinira s nukleosintezom i akustičkom skalom CMB-a).
- **U vremenski promjenjivom modelu kombinacije preferiraju tamnu energiju koja se mijenja** — $w_0 > -1$ i $w_a < 0$. Preferencija je 2.6σ za DESI+CMB, a kada se doda uzorak supernova postaje 2.5σ, 3.5σ ili 3.9σ za Pantheon+, Union3 odnosno DES-SN5YR (sigma mjeri koliko je rezultat udaljen od očekivanja standardnog modela; 5σ je uobičajeni prag za proglašenje otkrića i ne znači da je interpretacija nužno točna — vodič).
- Kada je zbroj masa neutrina slobodan parametar, granica je vrlo stroga — ispod 0.072 eV (95% pouzdanosti) za DESI+CMB — ali rad izričito navodi da se ta granica znatno opušta ako se pozadini tamne energije dopusti odstupanje od ΛCDM-a.

Što ovo ne dokazuje

- Ovo **ne** pokazuje da se tamna energija mijenja. DESI-jevo vlastito ravnalo u skladu je s kozmološkom konstantom; naznaka evolucije pojavljuje se samo u *kombiniranim* prilagodbama i samo u bogatijem modelu s dva parametra.
- Ovo **ne** znači "ΛCDM je mrtav" ili "Einstein je pogriješio". Najveća vrijednost, 3.9σ, ispod je kon-

vencije od 5σ koju fizičari traže prije nego što nešto nazovu otkrićem — a standardni model i dalje dobro opisuje DESI sam za sebe.

- Rezultat **nije** neovisan o uzorku. Zamjena zbirke supernova pomiče značajnost s 2.5σ na 3.9σ — više od cijele jedne sigme. Signal čija veličina toliko ovisi o tome koji mu se vanjski skup podataka pridruži naznaka je koju treba dalje istraživati, a ne mjerenje na koje se već može računati.
- DESI-jeva *samostalna* sklonost prema $w_0 > -1$ **djelomično je potaknuta jednom anomalnom točkom** — intervalom galaksija na crvenom pomaku 0.51, koji leži malo iznad predviđanja ΛCDM-a. No upravo ovdje rad radi potrebnu provjeru: tu točku tretira kao statističku fluktuaciju i pokazuje da zamjena *svih* DESI-jevih mjerenja pri niskom crvenom pomaku ($z < 0.6$) starijim SDSS mjerenjima ostavlja rezultat za tamnu energiju nepromijenjenim. Neobična točka povlači DESI kada ga promatramo samog; ona **ne** podupire kombiniranu naznaku. (Neovisne skupine kasnije su detaljnije ispitale njezinu ulogu.) Zato ova ograda zapravo djeluje suprotno načinu na koji se ponekad prepričava: rezultat je testiran upravo protiv svojeg najanomalnijeg podatka i izdržao je.
- Granica mase neutrina **nije** zaključak neovisan o modelu. Stroga je samo ako je pozadinsko širenje fiksirano na ΛCDM; kada se ta pretpostavka olabavi, olabavi se i granica.

Koliko su dokazi jaki

- **Vrlo jaki kao mjerenje udaljenosti.** BAO ravnalo jedan je od najčišćih alata u kozmologiji, DESI-jevo je dosad najpreciznije, a slijepa analiza upravo je zaštita kakvu želimo protiv čitanja priželjkivanog odgovora iz podataka.
- **Doista intrigantni, ali ne i odlučujući, kao tvrdnja o tamnoj energiji.** Preferencija od 2.6σ za DESI+CMB, koja raste do 3.9σ s najrestriktivnijim skupom supernova, vrsta je rezultata koja opravdava više vremena na teleskopu — ne rušenje modela. Pravi razlog za oprez jest raspon između uzoraka supernova; autorima u prilog ide i to što su provjerili da njihov najanomalniji BAO podatak ne pokreće rezultat — upravo ona provjera koju ovakva tvrdnja zahtijeva.
- Rad je oprezan prema vlastitim rezultatima: značajnost navodi na tri načina umjesto da citira samo najveću, a jasno označuje i ovisnost rezultata o masi neutrina o modelu. Pretjerivanje, gdje ga ima, pojavljuje se u prepričavanju, ne u samom radu.

Zašto je važno

Već četvrt stoljeća izrazi "tamna energija" i "kozmološka konstanta" upotrebljavaju se gotovo kao sinonimi, jer je svako mjerenje bilo u skladu s w točno jednakim -1. DESI je prvi skup podataka dovoljno precizan da, u kombinaciji s drugima, uopće može *pitati* mijenja li se ta -1 — i dobiti odgovor koji nije jednostavno "ne". To je stvarna promjena u onome što podaci mogu učiniti i zato rezultat zaslužuje pozornost. Ali ista preciznost omogućuje nam vidjeti koliko je naznaka uvjetna: prisutna u nekim kombinacijama podataka, tiha u drugima i prije svega osjetljiva na to koji se katalog supernova upari s DESI-jem. Ispravan stav nije ni odbacivanje ni prerano proglašena revolucija. Treba promatrati sljedeće, veće DESI-jevo izdanje — DR2, već objavljeno 2025. — i neovisne uzorke supernova te

vidjeti hoće li se pomak učvrstiti ili nestati. Ovako izgleda pravi “možda” u kozmologiji i vrijedi ga izvijestiti upravo kao “možda”.

Sažetak bez prenaglašavanja

DESI je izmjerio povijest širenja svemira najboljim barionsko-akustičkim ravnalom dosad, koristeći šest milijuna objekata. Samo za sebe, to ravnalo slaže se sa standardnim modelom u kojem je tamna energija konstanta. Kombinirate li ga s kozmičkom mikrovalnom pozadinom i uzorkom supernova, pojavljuje se preferencija za tamnu energiju koja se mijenja kroz vrijeme — na razini od 2.6σ do 3.9σ, ovisno o tome koje se supernove dodaju. To je stvarna i zanimljiva naznaka, ne otkriće: ostaje ispod praga koji fizičari traže, a mijenja se s podacima o supernovama s kojima se upari. Tamna energija možda se mijenja. DESI je to pretvorio u pitanje koje vrijedi precizno postaviti — ali još ne u pitanje na koje je odgovorio.

Izvori

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