The Clean Paper

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

# DESI-jevo najnatančnejše kozmično ravnilo in previden 'morda' o temni energiji

*DESI je iz šestih milijonov objektov izmeril zgodovino širjenja vesolja z doslej najnatančnejšim barionsko-akustičnim ravnilom. Samo to ravnilo se ujema s standardnim modelom, v katerem je temna energija konstanta. Prednost modelu, v katerem se temna energija s časom spreminja, se pojavi šele, ko DESI združimo s kozmičnim mikrovalovnim ozadjem in vzorcem supernov — pri 2,6σ do 3,9σ, odvisno od uporabljenega vzorca supernov, pod pragom, ki ga fiziki zahtevajo za odkritje, in občutljivo na podatke, s katerimi ga združimo. Resnično vprašanje, natančneje zastavljeno — 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

# Ravnilo iz zvoka

V zgodnjem vesolju, še preden so obstajale zvezde, je vroča plazma običajne snovi in svetlobe dobesedno valovala. Tlačni valovi so potovali skoznjo z več kot polovico svetlobne hitrosti, dokler se vesolje ni dovolj ohladilo, da so nastali atomi in se je valovanje ustavilo — v porazdelitvi snovi pa je ostala rahla prednost določeni razdalji. Ta razdalja, *zvočni horizont*, danes meri približno 150 megaparsekov (okoli 490 milijonov svetlobnih let) in se kaže kot rahel presežek galaksij, med seboj oddaljenih za približno toliko, v vseh smereh in obdobjih. Kozmologi temu pravijo barionske akustične oscilacije oziroma BAO in ga uporabljajo kot standardno ravnilo: če izmerimo, kako velika se ta zamrznjena skala zdi na nebu pri različnih oddaljenostih, lahko izrišemo, kako hitro se je vesolje širilo skozi svojo zgodovino.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) je bil zgrajen, da to ravnilo izmeri bolje od kogarkoli pred njim. Njegova prva objava podatkov kartira skalo BAO v galaksijah, kvazarjih in Lymanovem alfa gozdu oddaljenih oblakov plina — v več kot šestih milijonih objektov, razdeljenih v sedem intervalov rdečega premika od 0,1 do 4,2. Da bi pričakovanja raziskovalcev čim manj vplivala na rezultat, je ekipa analizo izvedla *slepo*: kozmološki odgovor so skrili pred samimi seboj, dokler metodologija ni bila dokončno določena. To je daleč najnatančnejša meritev BAO doslej.

DESI je nameščen na 4-metrskem teleskopu Nicholas U. Mayall na Kitt Peaku v Arizoni. Instrument vodi svetlobo skozi tisoče optičnih vlaken v spektrografe ter položaje na nebu pretvarja v spektre in rdeče premike milijonov galaksij in kvazarjev.

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

### Kaj je DESI

**Dark Energy Spectroscopic Instrument** je spektrograf na 4-metrskem teleskopu Nicholas U. Mayall na Kitt Peaku v Arizoni. Temne energije ne vidi neposredno — tega ne more noben instrument, saj temna energija ne oddaja svetlobe. Namesto tega hkrati snema spektre približno 5.000 galaksij in kvazarjev, iz raztezanja njihove svetlobe zaradi širjenja vesolja določi rdeči premik in gradi tridimenzionalni zemljevid milijonov objektov. Temno energijo nato sklepamo iz tega, kako se je širjenje vesolja skozi čas spreminjalo. Za celotno verigo — od robotskih vlaken do akustičnega ravnila — glejte Kako deluje DESI.

Naslov, ki je potoval po medijih, je bil, da temna energija morda ni konstanta — da bi skrivnostni dejavnik, ki pospešuje širjenje vesolja, lahko s časom *slabel* in s tem načel standardni kozmološki model. Ta trditev ni izmišljena, vendar jo je lahko prebrati premočno. Poštena različica je bolj specifična in bolj zanimiva: DESI-jevo lastno ravnilo je samo zase skladno z običajnim modelom. Namig na nekaj novega se pojavi šele, ko DESI združimo z drugimi podatki — in moč namiga je odvisna od tega, katere podatke dodamo.

DESI-jevo barionsko-akustično ravnilo samo je skladno s konstantno temno energijo (kozmološko konstanto). Prednost *spreminjajoči se* temni energiji se pojavi le, ko DESI združimo s kozmičnim mikrovalovnim ozadjem in vzorcem supernov — moč pa se spremeni glede na izbrani vzorec supernov.

### Standardno ravnilo in dva načina spreminjanja temne energije

Skala BAO je *standardno ravnilo*: ker njeno pravo dolžino poznamo iz fizike zgodnjega vesolja, nam primerjava prave dolžine z navidezno velikostjo pri določeni oddaljenosti pove, koliko se je vesolje do takrat razširilo. Če ravnilo izmerimo na številnih razdaljah, dobimo celotno zgodovino širjenja — prav to, na kar vpliva temna energija.
V standardnem modelu, imenovanem ΛCDM, je temna energija *kozmološka konstanta*: fiksna gostota energije praznega prostora, ki se ne spreminja. Fiziki njeno vedenje opisujejo s parametrom »enačbe stanja« $w$, ki je za pravo kozmološko konstanto povsod in vedno natanko $-1$.
To predpostavko lahko sprostimo na dva načina. Preprosteje je dovoliti, da je $w$ neka druga konstanta, ki se še vedno ne spreminja s časom — to je »wCDM«. Bogatejši model dovoli, da se $w$ spreminja med širjenjem vesolja, in ga opiše z dvema številoma: $w_0$, današnjo vrednostjo, in $w_a$, hitrostjo spremembe. Model »$w_0w_a$CDM« se zmanjša na ΛCDM v eni sami točki $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Prednost $w_0$ večjemu od $-1$ in negativnemu $w_a$ tukaj pomeni »spreminjajočo se temno energijo«: temno energijo, ki je bila v preteklosti bolj odbojna in danes slabi.

# Kaj so naredili avtorji

- Izmerili so skalo BAO iz podatkov prvega leta DESI — galaksij, kvazarjev in Lymanovega alfa gozda — v več kot šestih milijonih objektov in sedmih intervalih rdečega premika $0,1 < z < 4,2$.

- Analizo so izvedli **slepo**, kozmološki rezultat pa skrili, dokler metodologija ni bila določena, da bi zmanjšali potrditveno pristranskost.
- Standardni ploski model ΛCDM so prilagodili najprej samo podatkom DESI BAO, nato pa tudi kombinacijam z omejitvami iz nukleosinteze velikega poka in kozmičnim mikrovalovnim ozadjem (CMB) iz Plancka in ACT.
- Model so razširili na dva načina: s konstantnim parametrom temne energije $w$ (wCDM) in s časovno spremenljivim $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$CDM).
- Časovno spremenljivi model so preverili tako, da so DESI+CMB zaporedoma združili s tremi različnimi zbirkami supernov tipa Ia — Pantheon+, Union3 in DES-SN5YR — namesto da bi izbrali le eno.
- Postavili so omejitve na vsoto mas nevtrinov in preverili, kako se te omejitve spremenijo, če dovolijo odstopanje ozadja temne energije od ΛCDM.

# Kaj so ugotovili

- **DESI BAO sami so skladni s standardnim modelom.** Dajo gostoto snovi $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$, pri konstantnem prostem $w$ pa $w = -0,99^{+0,15}_{-0,13}$ — neposredno na vrednosti $-1$ kozmološke konstante.
- V kombinaciji s CMB in njegovim gravitacijskim lečenjem DESI da $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ in Hubblovo konstanto $H_0 = 67,97 \pm 0,38$ km s$^{-1}$ Mpc$^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$, kadar ga združijo z nukleosintezo in akustično skalo CMB).
- **V časovno spremenljivem modelu kombinacije dajejo prednost spreminjajoči se temni energiji** — $w_0 > -1$ in $w_a < 0$. Prednost je $2,6\sigma$ za DESI+CMB, z dodanim vzorcem supernov pa $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ oziroma $3,9\sigma$ za Pantheon+, Union3 oziroma DES-SN5YR (sigma meri odmik rezultata od pričakovanja standardnega modela; $5\sigma$ je običajen prag za razglasitev odkritja in še ne pomeni, da je interpretacija nujno pravilna — vodnik).
- Če je vsota mas nevtrinov prosta, jo podatki močno omejijo — pod 0,072 eV (95-odstotno zaupanje) za DESI+CMB — vendar članek izrecno opozarja, da se omejitev občutno sprosti, če dovolimo, da se ozadje temne energije oddalji od ΛCDM.

# Česa to ne dokazuje

- **Ne** kaže, da se temna energija spreminja. DESI-jevo lastno ravnilo je skladno s kozmološko konstanto; namig spremembe se pojavi le v *kombiniranih* prilagoditvah in le v bogatejšem modelu z dvema parametroma.
- **Ne** pomeni, da je »ΛCDM mrtev« ali da se je »Einstein motil«. Najmočnejša številka, $3,9\sigma$, je pod konvencionalnim pragom $5\sigma$, ki ga fiziki zahtevajo pred razglasitvijo odkritja — standardni model pa se podatkom DESI samim še vedno dobro prilega.
- Rezultat **ni neodvisen od izbire vzorca**. Zamenjava zbirke supernov spremeni statistično značilnost z $2,5\sigma$ na $3,9\sigma$ — za več kot eno sigmo. Signal, ki je toliko odvisen od zunanjega nabora podatkov, je namig za nadaljnje raziskovanje, ne meritev, na katero bi že stavili.
- Nagnjenje DESI-*samih* proti $w_0 > -1$ deloma poganja **ena anomalna točka** — galaktični

interval pri rdečem premiku 0,51, ki leži nekoliko visoko glede na ΛCDM. Toda članek tu naredi pravo preverjanje: točko obravnava kot statistično fluktuacijo in pokaže, da zamenjava *vseh* nizkordečepremičnih meritev DESI ($z < 0,6$) s starejšimi meritvami SDSS rezultat za temno energijo pusti nespremenjen. Nenavadna točka vpliva na DESI same, **ne** podpira pa kombiniranega namiga. Ta zadržek zato deluje v nasprotni smeri od nekaterih pripovedi: avtorji so rezultat preizkusili prav proti njegovemu najbolj anomalnemu podatku in ostal je.
- Omejitev mase nevtrinov **ni** modelno neodvisna razsodba. Zelo tesna je le, če širjenje ozadja omejimo na ΛCDM; ko to predpostavko sprostimo, se sprosti tudi omejitev.

# Kako močni so dokazi

- **Zelo močni kot meritev razdalje.** Ravnilo BAO je eno najčistejših orodij kozmologije, DESI-jevo je doslej najnatančnejše, slepa analiza pa je prav varovalo, ki ga želimo proti temu, da bi v podatkih našli pričakovan odgovor.
- **Resnično zanimivi, vendar ne odločilni kot trditev o temni energiji.** Prednost $2,6\sigma$ pri DESI+CMB, ki z najbolj omejujočim vzorcem supernov naraste na $3,9\sigma$, je vrsta rezultata, ki upraviči več opazovalnega časa — ne pa prevrata modela. Pošten razlog za previdnost je razpon med vzorci supernov; avtorji pa so prav tako preverili, da njihovega najbolj anomalnega podatka BAO rezultat ne potrebuje.
- Članek je previden tudi do samega sebe: statistično značilnost poda na tri načine, namesto da bi izpostavil le največjo, in opozori na modelno odvisnost nevtrinskega rezultata. Pretiravanje je predvsem v povzetkih okoli članka, ne v članku.

# Zakaj je pomembno

Četrt stoletja sta se izraza »temna energija« in »kozmološka konstanta« skoraj uporabljala kot sopomenki, ker so bile vse meritve skladne z $w$ natanko $-1$. DESI je prvi nabor podatkov, dovolj natančen, da lahko v kombinaciji z drugimi sploh *vpraša*, ali ta $-1$ s časom drsi — in dobi odgovor, ki ni preprost »ne«. To je resnična sprememba tega, kar podatki omogočajo, zato rezultat zasluži pozornost. Toda ista natančnost pokaže, kako pogojen je namig: v nekaterih kombinacijah podatkov je izrazit, v drugih tih, predvsem pa je občutljiv na to, kateri katalog supernov združimo z DESI. Pravilna drža ni ne odmahniti z roko ne prezgodaj razglasiti revolucije. Smiselno je spremljati naslednjo večjo objavo DESI — DR2 je izšla že leta 2025 — in neodvisne vzorce supernov ter videti, ali se odmik okrepi ali zbledi. Tako v kozmologiji izgleda resničen »morda« in kot takega ga je vredno poročati.

# Kratek povzetek

DESI je iz šestih milijonov objektov izmeril zgodovino širjenja vesolja z doslej najboljšim barionsko-akustičnim ravnilom. Samo to ravnilo se ujema s standardnim modelom, v katerem je temna energija konstanta. Ko ga združimo s kozmičnim mikrovalovnim ozadjem in vzorcem supernov, se pojavi prednost temni energiji, ki se spreminja s časom — od $2,6\sigma$ do $3,9\sigma$, odvisno od dodanih supernov. To je resničen in zanimiv namig, ne odkritje: ostaja pod pragom, ki ga zahtevajo fiziki, in se spreminja glede na uporabljene podatke o supernovah. Temna energija se morda spreminja. DESI je to spremenil v vprašanje, ki ga lahko postavimo zelo natančno — še ne v vprašanje, na katero je že odgovoril.

## Viri

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