



The CLEAN PAPER

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

Rula kali zaidi ya DESI ya ulimwengu, na 'labda' ya tahadhari kuhusu dark energy

DESI imepima historia ya upanuzi wa ulimwengu kwa baryon-acoustic ruler sahihi zaidi hadi sasa, kutoka objects milioni sita. Peke yake, rula hiyo inakubaliana na standard model ambapo dark energy ni constant. Ni DESI inapounganishwa na cosmic microwave background na sample ya supernova ndipo upendeleo wa dark energy inayobadilika huonekana — 2.6σ hadi 3.9σ kutegemea supernovae zinazoongezwa, chini ya threshold ya discovery na nyeti kwa data inayounganishwa nayo. Swali halisi lililofanywa kuwa sahihi, si jibu.

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

Rula iliyotengenezwa kwa sauti

Mapema katika ulimwengu, kabla ya nyota kuwepo, plasma moto ya matter ya kawaida na mwanga ilikuwa kama kengele inayolia. Mawimbi ya pressure yalisafiri ndani yake kwa zaidi ya nusu ya kasi ya mwanga, mpaka ulimwengu ulipopoa vya kutosha atomi kuunda na “mlio” huo ukasimama — ukiacha umbali mmoja unaopendelewa kwa kiasi kidogo katika usambazaji wa matter. Umbali huo, *sound horizon*, leo ni takribani megaparsec 150 (karibu miaka milioni 490 ya mwanga), na unaonekana kama ziada ndogo ya galaksi zilizotenganishwa kwa umbali huo, katika kila mwelekeo na kila enzi. Cosmologists huiita *baryon acoustic oscillation*, au BAO, na huitumia kama standard ruler: pima kipimo hicho kilichoganda kinaonekana kikubwa kiasi gani angani katika umbali tofauti, na unaweza kuchora jinsi ulimwengu ulivyopanuka katika historia yake.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) ilijengwa kupima rula hiyo vizuri kuliko chombo chochote kilichotangulia. Data release yake ya kwanza inachora BAO katika galaksi, quasars na Lyman-alpha forest ya mawingu ya gesi yaliyo mbali — zaidi ya objects milioni sita, katika redshift bins saba kutoka redshift 0.1 hadi 4.2. Ili matarajio ya binadamu yasiathiri matokeo, timu ilifanya uchanganuzi *blind*, ikijificha jibu la cosmology mpaka mbinu zilipofungwa. Kwa tofauti kubwa, hiki ndicho kipimo sahihi zaidi cha BAO kilichofanywa.



DESI imewekwa kwenye Nicholas U. Mayall 4-metre Telescope huko Kitt Peak, Arizona. Chombo hulisha maelfu ya optical fibres kwenye spectrographs, kikibadilisha positions angani kuwa spectra na redshifts kwa mamilioni ya galaksi na quasars.

DESI ni nini

Dark Energy Spectroscopic Instrument ni spectrograph kwenye Nicholas U. Mayall 4-metre telescope huko Kitt Peak, Arizona. Haioni dark energy moja kwa moja — hakuna anayeweza, kwa sababu dark energy haitoi mwanga. Badala yake hurekodi spectra za takribani galaksi na quasars 5,000 kwa wakati mmoja, husoma redshift ya kila object kutokana na jinsi upanuzi wa ulimwengu ulivyonyosha mwanga wake, na kujenga ramani ya vipimo vitatu ya mamilioni yao. Dark energy kisha huhitimishwa kutokana na jinsi ramani hiyo inavyoonyesha upanuzi wa ulimwengu ukibadilika kwa muda. Kwa mlolongo mzima — kutoka robotic fibres hadi acoustic ruler — tazama Jinsi DESI inavyofanya kazi.

kichwa cha habari iliyosafiri kutoka kwenye matokeo haya ilikuwa kwamba dark energy huenda si constant — kwamba kitu hiki kisichoeleweka kinachoharakisha upanuzi wa ulimwengu huenda *kinadhoofika* kwa muda, na hivyo kuipasua standard cosmological modeli. Dai hilo halijabuniwa, lakini ni rahisi kulisoma kupita kiasi. Toleo la uaminifu ni maalum zaidi, na linavutia zaidi: rula ya DESI yenyewe, peke yake, inakubaliana na modeli ya kawaida. Dalili ya kitu kipya inaonekana tu ukiunganisha DESI na data nyingine — na nguvu ya dalili hubadilika kulingana na data ipi nyingine unachagua.

BAO ruler ya DESI peke yake inaendana na dark energy constant (cosmological constant). Upendeleo wa dark energy *inayobadilika kwa muda* unaibuka tu DESI inapounganishwa na cosmic microwave background na sample ya supernova — na nguvu yake hubadilika kulingana na sample ya supernova inayotumiwa.

Standard ruler, na njia mbili dark energy inaweza kubadilika

BAO scale ni *standard ruler*: kwa sababu tunajua urefu wake halisi kutokana na physics ya ulimwengu wa mapema, kulinganisha urefu huo na ukubwa wake unaoonekana katika umbali fulani hutuambia ulimwengu ulikuwa umepanuka kiasi gani kufikia wakati huo. Ukipimwa katika umbali mwingi, rula hufuatilia historia nzima ya upanuzi — ambayo dark energy inaathiri.

Katika standard modeli, inayoitwa Λ CDM, dark energy ni *cosmological constant*: energy density isiyobadilika ya nafasi tupu. Physicists huweka tabia yake kwa parameter ya “equation of state,” w , ambayo kwa cosmological constant halisi ni -1 hasa, kila mahali na kila wakati.

Ili kuijaribu, unaweza kuilegeza kwa njia mbili. Rahisi zaidi ni kuruhusu w iwe constant nyingine (bado haibadiliki kwa muda) — hii ni “ w CDM.” Tajiri zaidi ni kuruhusu w ibadilike kadiri ulimwengu unavyopanuka, ikielezwa kwa namba mbili: w_0 , thamani yake leo, na w_a , kasi ya drift yake. Modeli hii “ w_0w_a CDM” inarudi kuwa Λ CDM katika point moja $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Upendeleo wa w_0 kubwa kuliko -1 pamoja na w_a hasi ndiyo maana ya “evolving dark energy” hapa: dark energy ambayo ilikuwa repulsive zaidi zamani na sasa inaonekana kupunguza nguvu hiyo.

Waandishi walifanya nini

- Walipima BAO scale kutoka mwaka wa kwanza wa data za DESI — galaksi, quasars na Lyman-alpha forest — zaidi ya objects milioni sita katika redshift bins saba zinazofunika $0.1 < z < 4.2$.
- Walifanya uchanganuzi **blind**, wakificha matokeo ya cosmology mpaka methodology ilipofungwa, ili kujilinda dhidi ya confirmation bias.
- Walifiti standard flat Λ CDM modeli kwa DESI BAO pekee, kisha kwa kuunganisha na prior ya big-bang nucleosynthesis na cosmic microwave background (CMB) kutoka Planck na ACT.
- Walipanua modeli kwa njia mbili: dark-energy w constant (w CDM), na $w_0 w_a$ inayobadilika kwa muda ($w_0 w_a$ CDM).
- Walijaribu modeli ya time-varying kwa kuunganisha DESI+CMB kwa zamu na compilations tatu tofauti za type Ia supernova — Pantheon+, Union3 na DES-SN5YR — badala ya kuchagua moja.
- Waliweka mipaka juu ya jumla ya masses za neutrino, na kukagua jinsi mipaka hiyo inavyobadilika dark-energy background ikiruhusiwa kuondoka Λ CDM.

Walichokuta

- **DESI BAO peke yake inaendana na standard modeli.** Inatoa matter density $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, na dark energy ikiruhusiwa kuwa na w constant, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — karibu kabisa na thamani -1 ya cosmological constant.
- Ikiunganishwa na CMB na lensing yake, DESI inatoa $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ na Hubble constant $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (68.52 ± 0.62 ikiunganishwa badala yake na nucleosynthesis na acoustic scale ya CMB).
- **Katika time-varying modeli, combinations zinapendelea evolving dark energy** — $w_0 > -1$ na $w_a < 0$. Upendeleo ni 2.6σ kwa DESI+CMB, na sample ya supernova ikiongezwa unakuwa 2.5σ , 3.5σ , au 3.9σ kwa Pantheon+, Union3 au DES-SN5YR mtawalia (sigma hupima umbali wa matokeo kutoka matarajio ya standard modeli; 5σ ndiyo threshold ya kawaida ya discovery, na si kauli kwamba tafsiri ndiyo sahihi — mwongozo).
- Jumla ya neutrino mass ikiachwa huru inawekewa bound kali — chini ya 0.072 eV (95% confidence) kwa DESI+CMB — lakini makala inaweka wazi kwamba bound hii hulegea sana dark-energy background ikiruhusiwa kuondoka Λ CDM.

Kile ambacho utafiti huu hauthibitishi

- **Haionyeshi** kwamba dark energy inabadilika. Rula ya DESI yenyewe inaendana na cosmological constant; dalili ya evolution inaonekana tu katika *combined* fits, na katika modeli tajiri zaidi yenye parameters mbili.
- **Haimaanishi** “ Λ CDM imekufa” au “Einstein alikuwa na makosa.” Namba yenye nguvu zaidi, 3.9σ , iko chini ya convention ya 5σ ambayo physicists hutaka kabla ya kuita kitu discovery — na standard modeli bado inafiti vizuri DESI peke yake.

- Matokeo **hayako huru na sample**. Kubadilisha compilation ya supernova husogeza significance kutoka 2.5σ hadi 3.9σ — zaidi ya sigma moja nzima. Ishara ambayo ukubwa wake unategemea kiasi hicho hifadhidata ya nje unayoiunganisha nayo ni dalili ya kufuatiliwa, si kipimo cha kuweka benki.
- Mwelekeo wa DESI-alone kuelekea $w_0 > -1$ unasukumwa **kwa sehemu na point moja isiyo ya kawaida** — bin ya galaksi ya redshift 0.51, iliyo juu kidogo ya Λ CDM. Lakini hapa makala imefanya homework: inachukulia point hiyo kama statistical fluctuation, na inaonyesha kwamba ukibadilisha *vipimo vyote* vya DESI vya low-redshift ($z < 0.6$) na vya zamani vya SDSS, matokeo ya dark energy hayabadiliki. Point isiyo ya kawaida inavuta DESI peke yake; **haiibebi** combined hint. Kwa hiyo tahadhari hii inaenda kinyume na jinsi wakati mwingine inavyosimuliwa: matokeo yalifanyiwa stress test dhidi ya data yake isiyo ya kawaida zaidi, na yakasimama.
- Neutrino-mass limit **si verdict huru ya modeli**. Ni kali tu expansion background ikishikiliwa kuwa Λ CDM; ukiilegeza, bound nayo hulegea.

Ushahidi una nguvu kiasi gani

- **Ni mkubwa sana kama kipimo cha umbali**. BAO ruler ni mojawapo ya zana safi zaidi katika cosmology, ya DESI ndiyo sahihi zaidi hadi sasa, na blind uchanganuzi ndiyo safeguard unayotaka dhidi ya kusoma jibu unalolitamani ndani ya data.
- **Inavutia kwa kweli, lakini si decisive, kama dai la dark energy**. Upendeleo wa 2.6σ kutoka DESI+CMB, unaopanda hadi 3.9σ ukiwa na sample kali zaidi ya supernova, ni aina ya matokeo inayostahili telescope time zaidi — si inayopindua modeli. Sababu ya uaminifu ya tahadhari ni tofauti kati ya samples za supernova; kwa sifa yao, waandishi pia walikagua kwamba point yao moja ya BAO isiyo ya kawaida zaidi haisukumi matokeo — homework inayotakiwa kwa dai kama hili.
- makala ni makini na yenyewe: inaripoti significance kwa njia tatu badala ya kunukuu kubwa zaidi pekee, na inaweka wazi modeli-dependence ya matokeo ya neutrino. Overreach, pale ilipo, iko katika kusimuliwa tena, si ndani ya makala.

Kwa nini ni muhimu

Kwa robo karne, “dark energy” na “cosmological constant” zimetumika karibu kama kitu kimoja, kwa sababu kila kipimo kilikuwa kikiendana na w ya -1 hasa. DESI ni hifadhidata ya kwanza yenye precision ya kutosha kwamba, ikiunganishwa na nyingine, inaweza hata *kuuliza* kama hiyo -1 inadrift — na kupata jibu ambalo si “hapana” tambarare. Hilo ni badiliko halisi katika kile data inaweza kufanya, na ndiyo sababu matokeo yanastahili umakini. Lakini precision hiyo hiyo ndiyo inayotuonyesha dalili hiyo ina masharti kiasi gani: hai katika baadhi ya combinations za data, tulivu katika nyingine, na nyeti zaidi ya yote kwa katalogi ipi ya supernova inaunganishwa na DESI. Msimamo sahihi si kuipuuza wala kutangaza mapinduzi mapema. Ni kutazama release inayofuata, kubwa zaidi ya DESI — DR2, ambayo tayari ilitoka 2025 — pamoja na huru supernova samples, na kuona kama drift inakuwa imara au inafifia. Hivi ndivyo “labda” halisi inavyoonekana katika cosmology, na inastahili kuripotiwa kama

labda.

Muhtasari safi

DESI imepima historia ya upanuzi wa ulimwengu kwa baryon-acoustic ruler bora zaidi iliyotengenezwa hadi sasa, kutoka objects milioni sita. Peke yake, rula hiyo inakubaliana na standard modeli ambapo dark energy ni constant. Ukiunganisha DESI na cosmic microwave background na sample ya supernova, upendeleo unaonekana kwa dark energy inayobadilika kwa muda — kutoka 2.6σ hadi 3.9σ kutegemea supernovae unazoongeza. Hiyo ni dalili halisi na ya kuvutia, si discovery: bado iko chini ya threshold inayodaiwa na physicists, na inabadilika kulingana na data ya supernova inayoambatanishwa nayo. Dark energy huenda inabadilika. DESI imefanya hilo kuwa swali linaloweza kuulizwa kwa usahihi — bado haijalijibu.

Vyanzo

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>