



The CLEAN PAPER

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

DESI की अब तक की सबसे सटीक ब्रह्मंडीय मापनी— और बदलती डार्क एनर्जी का सघन संकेत

DESI ने छह मिलियन वस्तुओं से बैरियन ध्वनिक दोलनों की अब तक की सबसे सटीक “मापनी” बनाकर ब्रह्मंड के विस्तार का इतिहास मापा। DESI के आँकड़े अकेले उस मापक मॉडल से मेल खाते हैं जिसमें डार्क एनर्जी स्थिर है। बदलती डार्क एनर्जी की वरियता अभी उभरती है जब DESI को कॉस्मिक मइक्रोवेव पृष्ठभूमि और सुपरनोवा नमूनों से जोड़ा जाता है — इस्तेमाल किए गए सुपरनोवा डेटासेट के अनुसार 2.6σ से 3.9σ तक। यह खोज की समग्र सीमा से नीचे है और चुने गए बहरी डेटा के प्रति संवेदनशील है। यही एक वास्तविक प्रश्न अब अधिक सटीक हुआ है; उसका उत्तर अभी नहीं मिला।

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

ध्वनि से बनी ब्रह्मंडीय मपनी

ब्रह्मंड के शुरुआती दौर में, तारों के बनने से पहले, समस्त पदार्थ और प्रकाश का गरम प्लाज्मा समोच्चता था। दबन्न तरंगों उसमें प्रकाश की गति के आधे से भी अधिक वेग से दौड़ती थी। फिर ब्रह्मंड इतना ठंडा हुआ कि परमाणु बनने लगे और यह गूँज थम गई — लेकिन पदार्थ के वितरण में एक हल्की सी पसंदीदा दूरी की छाप छोड़ गई। इस दूरी को *sound horizon* कहते हैं। आज इसका पैमाना लगभग 150 megaparsecs (करीब 490 मिलियन light-years) है और यह हर दशात अलग-अलग ब्रह्मंडीय युगों में उस दूरी से अलग आकाशगंगा युगों की थोड़ी अधिक संख्या के रूप में दिखाई देता है। Cosmologists इसे baryon acoustic oscillation, या BAO, कहते हैं और इसे एक standard ruler की तरह इस्तेमाल करते हैं: अलग-अलग दूरियों पर इस जमे हुए पैमाने का दिखाई देने वाला आकार मापकर ब्रह्मंड के विस्तार का इतिहास निकाला जा सकता है।

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) इसी मपनी को पहले से कहीं बेहतर मपने के लिए बनाया गया है। इसके पहले data release में आकाशगंगाओं, quasars और दूरस्थ गैस बलों के Lyman-alpha जंगल में BAO पैमाना मापा गया — छह मिलियन से अधिक वस्तुएँ, redshift 0.1 से 4.2 तक सप्त bins में। मन्वीय अपेक्षाएँ परिणाम को प्रभावित न करें, इसलिए टीम ने विश्लेषण *blind* रखा पद्धति तय हो जाने तक शोधकर्तृओं ने cosmological परिणाम खुद से छुपिए रखे। क्लीबड़े अंतर से यह अब तक का सबसे सटीक BAO मपन है।



DESI Arizona के Kitt Peak पर Nicholas U. Mayall 4-metre Telescope पर लगा है। इसके हजारों optical fibres प्रकाश को spectrographs तक पहुँचते हैं, जिससे लाखों आकाशगंगाओं और quasars के spectra तथा redshifts मापे जा सकते हैं।

DESI क्या है

Dark Energy Spectroscopic Instrument Arizona के Kitt Peak पर Nicholas U. Mayall 4-metre telescope पर लगाए गए spectrograph है। यह dark energy को सीधे नहीं देखता— वास्तव में ऐसा कोई उपकरण नहीं कर सकता, क्योंकि dark energy प्रकाश उत्सर्जित नहीं करती। इसके बजाय DESI एक साथ लगभग 5,000 आकाशगंगाओं और quasars के spectra दर्ज करता है, ब्रह्ममंड के विस्तार से उनके प्रकाश में आए खिसि से redshift मापता है और लाखों वस्तुओं का ट्रैकिंग-आयामीनक्षेत्र बनाता है। फिर उस नक्शे से देखा जाता है कि समय के साथ ब्रह्ममंड का विस्तार कैसे बदला dark energy का प्रभाव उसी से निकाला जाता है। Robotic fibres से acoustic ruler तक पूरी प्रक्रिया के लिए How DESI works देखें।

इस परिणाम से जो सुखी सबसे ज्यादा चली वह यह थी कि dark energy शांत स्थिर नहीं है — ब्रह्ममंड के विस्तार को तेज करने वाला यह रहस्यमय घटक समय के साथ कमजोर पड़ रहा हो सकता है, जिससे मानक cosmological model पर सवाल उठता है। दमपनीतरह गढ़ा हुआ नहीं है, लेकिन उसे बढ़ाचढ़कर पढ़ना आसान है। अधिक सटीक और अधिक दिलचस्प बात यह है: DESI का अपना BAO मान, अपने आप में, मानक मॉडल से मेल खाता है। नए भौतिकी का संकेत अभी उभरता है जब DESI को दूसरे datasets के साथ जोड़ा जाता है — और संकेत की तुलना इस पर निर्भर करती है कि कौन-सा बहरी dataset चुना गया।

DESI का baryon-acoustic ruler अकेले उस मॉडल से संगत है जिसमें dark energy स्थिर, यानी cosmological constant है। समय के साथ बदलती dark energy की ओर झुकना अभी दिखाई देता है जब DESI को cosmic microwave background और supernovae के नमूने के साथ जोड़ा जाए — और अलग supernova नमूने इस्तेमाल करने पर झुकाने की संख्या कितनी बढ़ती है।

Standard ruler और dark energy के बदलने के दो तरीके

BAO पैमाना एक *standard ruler* है: शुरुआती ब्रह्ममंड की भौतिकी से इसकी वास्तविक लंबाई ज्ञात है। किसी दूरी पर इसकी वास्तविक लंबाई की तुलना उसके दिखाई देने वाले आकार से करके पता लगाया जा सकता है कि तब तक ब्रह्ममंड कितना फैल चुका था। कई दूरियों पर यही माप देहरे से से विस्तार का इतिहास बनाता है — और dark energy उसी इतिहास को प्रभावित करती है।

मानक मॉडल Λ CDM में dark energy एक *cosmological constant* है: खली अंतरिक्ष की स्थिर ऊर्जा घनता जो समय के साथ नहीं बदलती। Physicists इसके व्यवहार को “equation of state” पैरामीटर w से व्यक्त करते हैं। वास्तविक cosmological constant के लिए w हर जगह और हर समय ठीक -1 होता है।

इसे जानने के लिए इस धारणा को दो तरह से देखा जा सकता है। सरल रूप में w को -1 से अलग, लेकिन समय के साथ स्थिर मान दे दिया जाता है — इसे w CDM कहते हैं। अधिक लचीले मॉडल में w ब्रह्ममंड के फैलने के साथ बदल सकता है और उसे दो संख्याओं से वर्णित किया जाता है: w_0 , आज का मान, और w_a , समय के साथ परिवर्तन की दर। यह $w_0 w_a$ CDM मॉडल $w_0 = -1$, $w_a = 0$ पर फिर Λ CDM बन जाता है। यहाँ $w_0 > -1$ और $w_a < 0$ की प्रणमकता को “evolving dark energy” कहा जा रहा है — यानी ऐसी dark energy जो अतीत में अधिक repulsive थी और अब उसका प्रभाव कुछ कम हो रहा है।

शोधकर्तों ने क्या किया

- DESI के पहले वर्ष के डेटा — आकाशगंगाएँ, quasars और Lyman-alpha forest — से BAO पैमाना मात्र छह मिलियन से अधिक वस्तुएँ, सत्त redshift bins, $0.1 < z < 4.2$ ।

- विश्लेषण **blind** रखा और methodology तय हमें तक cosmological परणिस छपिए, तर्क confirmation bias का खतरा कम हो।
- पहले standard flat Λ CDM model को केवल DESI BAO पर fit किया फिर big-bang nucleosynthesis prior और Planck/ACT के cosmic microwave background (CMB) डेटा के साथ।
- Model को दो तरह से बढ़ाया स्थिर dark-energy w वाला w CDM और समय के साथ बदलने वाला w_0w_a model।
- DESI+CMB को तीसरे अलग type Ia supernova compilations — Pantheon+, Union3 और DES-SN5YR — के साथ अलग-अलग जोड़कर time-varying model जैसा केवल एक नमूना चुनकर नहीं।
- Neutrinos के कुल mass पर सीमाएँ नकली और देखा कि dark-energy background को Λ CDM से अलग हमें की अनुमति देने पर वे सीमाएँ कतिनी बदलती हैं।

क्या मिला

- DESI BAO अकेले मजबूत मॉडल से संगत है। पदार्थ घनता $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ मिला और स्थिर w को स्वतंत्र छोड़ने पर $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — cosmological constant के -1 के बेहद करीब।
- CMB और उसकी lensing जानकारी के साथ DESI $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ और Hubble constant $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ देता है (68.52 ± 0.62 जब nucleosynthesis और CMB acoustic scale के साथ जोड़ा जाए)।
- समय के साथ बदलने वाले model में संयुक्त datasets evolving dark energy को प्रगति देते हैं — $w_0 > -1$ और $w_a < 0$ । DESI+CMB के लिए यह झुक 2.6 σ है। Supernova sample जोड़ने पर Pantheon+, Union3 और DES-SN5YR के लिए यह क्रमशः 2.5 σ , 3.5 σ और 3.9 σ हो जाता है। Sigma बताता है कि परणिस standard-model expectation से कतिनी दूर है; discovery का समान्य मजबूत 5 σ है, और इतना sigma होना भीव्यख्या के सही होने की गारंटी नहीं देता — माहदरशिका।
- Neutrinos का कुल mass स्वतंत्र रखने पर सीमा का कीमती मिला है — DESI+CMB के लिए 95% confidence पर 0.072 eV से कम — लेकिन शोधपत्र स्पष्ट करता है कि यदि dark-energy background को Λ CDM से अलग हमें दिया जाए तो यह सीमा का कीमती हो जाती है।

यह क्या सक्षति नहीं करता

- यह नहीं दिखाता कि dark energy सचमुच समय के साथ बदल रही है। DESI का अपना ruler cosmological constant से संगत है; बदलता का संकेत केवल संयुक्त fits और अधिक लचीले दो पैरामीटर model में आता है।
- इसका अर्थ “ Λ CDM खत्म होगया” या “Einstein गलत थे” नहीं है। सबसे मजबूत संख्या 3.9 σ है, जो physicists की 5 σ discovery convention से नीचे है — और केवल DESI को देखें तो standard model अच्छा fit देता है।
- परणिस sample-independent नहीं है। Supernova compilation बदलने से significance 2.5 σ से 3.9 σ तक चली जाती है — एक पूरे sigma से भी अधिक अंतर। जिस संकेत का आकार बहरी dataset के चुनने पर इतना निर्भर हो उसे गंभीरता से आगे जाँचना चाहिए, लेकिन उसे पक्का मानना नहीं मना चाहिए।
- केवल DESI में $w_0 > -1$ की ओर झुक आंशिक रूप से एक असमन्य data point से आता है — redshift 0.51 वाला galaxy bin, जो Λ CDM की अपेक्षा से थोड़ा ऊपर बैठता है। लेकिन शोधपत्र ने इस बिंदु की जाँच की इसे संभवतः statistical fluctuation मानकर दिखाया कि DESI के सभी low-redshift ($z < 0.6$) मापों को पुराने SDSS मापों से बदल देने पर dark-energy निष्कर्ष नहीं बदलता। यानी यह असमन्य बिंदु DESI-alone fit को थोड़ा खींचता है, लेकिन संयुक्त संकेत को सहज नहीं देता। बह में स्वतंत्र समूहों ने भी इसकी भूमिका और विस्तार से जाँची है। इसलिए यह caveat कभीकभी बतई जसे वाली कभीके उलट काम करता है: सबसे असमन्य data point हटकर भी संकेत बना रहता है।
- Neutrino-mass सीमा model-independent निष्कर्ष नहीं है। यह अभी बहुत कड़ी है जब background expansion को

Λ CDM पर बँधाजाए; उस धारणाकोढीलाकरें तोसीमाभीढीलीपड़तीहै।

परमाण कतिनामजबूत है

- **दूरीमानन के रूप में बहुत मजबूत।** BAO cosmology के सबसे सफ़ उपकरणोंमें से एक है, DESI कामगमन अब तक का सबसे सटीक है, और blind analysis वहीसुरक्षादेताहै जोकिसीअपेक्षति उत्तर कोअनजमे में डेटामें पढ़ लेने से बचती है।
- **Dark-energy दमने के रूप में सचमुच दलिचस्प, लेकिन नरिणयक नहीं।** DESI+CMB में 2.6σ और सबसे constraining supernova set के सग्न 3.9σ तक काझुकम आगे और telescope समय तथास्वतंत्र जँघ काहकदर है; यह model पलट देने वलापरणिस नहीं। सग्नधमीकामुख्य कारण अलग supernova samples के बीच बड़ाफैलम है। सग्न हीलेखकोने यह भी जँघाकि सबसे असमम्य BAO point परणिस कोचलातोनहीरहा— ऐसाstress test इस तरह के दमने के लिए जरूरीहै।
- **शोधपत्र अपनीसीमओं कोलेकर सग्नधम है:** वह केवल सबसे बड़ीsignificance नहींचुनता तीम अलग supernova combinations के परणिस देताहै और neutrino सीमाकीmodel-dependence भीस्पष्ट करताहै। बड़ाचदम मुख्यतःबम कीretelling में आताहै, शोधपत्र में नहीं।

यह क्योमहत्वपूर्ण है

लगभग पच्चीस वर्षोंसे “dark energy” और “cosmological constant” कोअक्सर लगभग एक हीअर्थ में इस्तेमाल किया गया,क्योकिहर मानन $w = -1$ से संगत था। DESI इतनासटीक dataset है किदूसरे डेटाके सग्न मलिकर वह सचमुच पूछ सकताहै कि क्यायह -1 समय के सग्न बदलताहै — और पहलीबार उत्तर पूरीतरह सपष्ट “नहीं” नहींहै। डेटाकीक्षमतामें यह वस्तविक बदलम है, इसलिए परणिस ध्यम देने योग्य है।

लेकिन यहीसटीकतायह भीदखितीहै कि संकेत कतिनाशरतोपर नरिभर है: कुछ dataset combinations में दखिई देताहै, कुछ में शंत पड़ जाताहै, और खस तौर पर यह इस बत के प्रतिसंवेदनशील है कि DESI के सग्न कैम-सा supernova catalogue जोड़ा गया। इसलिए सहीप्रतिक्रियान तोइसे खरजि करनाहै, न समय से पहले क्प्रति घोषति करना। अगलीबड़ी DESI release — DR2, जो 2025 में आ चुकीहै — और स्वतंत्र supernova samples से देखनाहोगा कि यह drift मजबूत होतीहै या गयब। Cosmology में वस्तविक “शयद” कुछ ऐसाहीदखिताहै, और इसे “शयद” कीतरह हीरपिष्ट करनाचहिए।

संक्षिप्त सार

DESI ने छह मिलियन वस्तुओं की मदद से अब तक के सबसे सटीक baryon-acoustic ruler का उपयोग करके ब्रह्ममंड के वस्तिर काइतिहास ममाहै। अकेले DESI कायह ruler उस standard model से मेल खताहै जिसमें dark energy स्थिर है। लेकिन जब इसे cosmic microwave background और supernova sample के सग्न जोड़ा जाताहै, तोसमय के सग्न बदलती dark energy कीओर 2.6σ से 3.9σ तक झुकम दखिताहै — यह इस पर नरिभर करताहै कि कैम-सा supernova dataset जोड़ा गया। यह वस्तविक और दलिचस्प संकेत है, discovery नहीं। physicists के ममक threshold से नीचे है और supernova sample बदलने पर इसकीतकत बदलतीहै। Dark energy शयद evolve कर रहीहो। DESI ने इस सवाल कोसटीक रूप से पूछने लगक बनादियाहै — अभीउसकाउत्तर तय नहींकियाहै।

सूत्रे

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>