The Clean Paper

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

DESI precīzākais kosmiskais lineāls un piesardzīgs "varbūt" par tumšo enerģiju

DESI izmērīja Visuma izplešanās vēsturi ar līdz šim precīzāko barionu akustisko lineālu, izmantojot sešus miljonus objektu. Viens pats šis lineāls saskan ar standarta modeli, kur tumšā enerģija ir konstanta. Tikai apvienojot DESI ar kosmisko mikroviļņu fonu un supernovu paraugu, parādās priekšroka mainīgai tumšajai enerģijai — no 2.6σ līdz 3.9σ atkarībā no pievienotās supernovu datu kopas, zem fizikā ierastās atklājuma robežas un jutīga pret izmantotajiem ārējiem datiem. Precīzi formulēts īsts jautājums, nevis atbilde.

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

Lineāls, kas radies no skaņas

Agrīnajā Visumā, vēl pirms zvaigznēm, parastās matērijas un gaismas karstā plazma „skanēja". Spiediena viļņi tajā izplatījās ar vairāk nekā pusi gaismas ātruma, līdz Visums atdzisa pietiekami, lai veidotos atomi un svārstības apstātos — matērijas sadalījumā iesaldējot vāju raksturīgu attālumu. Šis attālums, **skaņas horizonts**, mūsdienās ir ap 150 megaparsekiem (aptuveni 490 miljoniem gaismas gadu), un tas parādās kā neliels galaktiku pāru pārpalikums, kuru atstatums ir tieši tāds, visos virzienos un dažādos laikmetos. Kosmologi šo pazīmi sauc par barionu akustiskajām svārstībām jeb **BAO** un izmanto kā standarta lineālu: izmērot, cik liels šis iesaldētais mērogs izskatās debesīs dažādos attālumos, var izsekot Visuma izplešanās ātrumam tā vēsturē.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (**DESI**) tika uzbūvēts, lai šo lineālu izmērītu precīzāk nekā jebkad. Pirmajā datu izlaidumā BAO mērogs tiek kartēts galaktikās, kvazāros un tālu gāzu mākoņu Laimana-alfa mežā — vairāk nekā sešos miljonos objektu septiņos sarkanās nobīdes intervālos no $z = 0.1$ līdz 4.2. Lai cilvēku gaidas neietekmētu rezultātu, komanda analīzi veica **akli**: kosmoloģiskais rezultāts tika paslēpts no pašiem pētniekiem, līdz analīzes metodes bija fiksētas. Ar lielu atrāvienu tas ir precīzākais līdz šim veiktais BAO mērījums.

DESI ir uzstādīts uz Nicholas U. Mayall 4 metru teleskopa Kitt Peak observatorijā Arizonā. Instruments novada tūkstošiem optisko šķiedru uz spektrográfiem, pārvēršot objektu pozīcijas debesīs spektros un sarkanajās nobīdēs miljoniem galaktiku un kvazāru.

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

Kas ir DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument ir spektrogrāfs uz Nicholas U. Mayall 4 metru teleskopa Kitt Peak observatorijā Arizonā. Tas tumšo enerģiju neredz tieši — to nespēj neviens instruments, jo tumšā enerģija neizstaro gaismu. Tā vietā DESI vienlaikus ieraksta aptuveni 5000 galaktiku un kvazāru spektrus, nosaka katra objekta sarkano nobīdi no tā, cik stipri Visuma izplešanās izstiepusi tā gaismu, un izveido trīsdimensiju karti ar miljoniem objektu. Tumšās enerģijas ietekmi pēc tam secina no tā, kā šī karte atklāj kosmiskās izplešanās maiņu laikā. Pilnai ķēdei — no robotizētajām šķiedrām līdz akustiskajam lineālam — skatiet Kā darbojas DESI.

Plaši izplatītais virsraksts bija, ka tumšā enerģija varētu nebūt konstanta — ka noslēpumainais komponents, kas paātrina Visuma izplešanos, laika gaitā varētu **vājināties**, radot plaisu standarta kosmoloģiskajā modelī. Šis apgalvojums nav izdomāts, taču to ir viegli pārinterpretēt. Godīgā versija ir specifiskāka un interesantāka: **DESI lineāls pats par sevi saskan ar parasto modeli**. Mājiens uz ko jaunu parādās tikai tad, kad DESI apvieno ar citiem datiem, un mājiena stiprums mainās atkarībā no izvēlētās ārējās datu kopas.

DESI BAO mērījumi vieni paši saskan ar nemainīgu tumšo enerģiju — kosmoloģisko konstanti. Priekšroka **mainīgai** tumšajai enerģijai parādās tikai tad, kad DESI apvieno ar kosmisko mikroviļņu fonu un supernovu datu kopu, un tās stiprums ir atkarīgs no izmantotā supernovu kataloga.

Standarta lineāls un divi veidi, kā tumšā enerģija var mainīties

BAO mērogs ir **standarta lineāls**: tā īsto garumu zinām no agrīnā Visuma fizikas, tāpēc, salīdzinot šo garumu ar šķietamo izmēru noteiktā attālumā, var secināt, cik ļoti Visums līdz tam laikam bija izpleties. Mērot lineālu daudzos attālumos, iegūst visu izplešanās vēsturi — tieši to, ko ietekmē tumšā enerģija.
Standarta modelī ΛCDM tumšā enerģija ir **kosmoloģiskā konstante** — nemainīgs tukšās telpas enerģijas blīvums. Tās uzvedību fizikā apraksta ar stāvokļa vienādojuma parametru w; īstai kosmoloģiskajai konstantei $w = -1$ vienmēr un visur.
To var atbrīvot divos veidos. Vienkāršākajā modelī w drīkst būt cita, bet joprojām laikā nemainīga konstante — tas ir wCDM. Plašākajā modelī w mainās līdz ar Visuma izplešanos un tiek aprakstīts ar diviem skaitļiem: w_0, tā vērtību šodien, un w_a, kas nosaka izmaiņas ātrumu. Šis w_0w_aCDM modelis sakrīt ar ΛCDM punktā $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Priekšroka $w_0 > -1$ kopā ar $w_a < 0$ šeit nozīmē „mainīgu tumšo enerģiju": pagātnē tā būtu bijusi izteiktāk atgrūdoša un tagad kļūtu vājāka.

Ko autori darīja

- Izmērīja BAO mērogu DESI pirmā gada datos — galaktikās, kvazāros un Laimana-alfa mežā — vairāk nekā sešiem miljoniem objektu septiņos sarkanās nobīdes intervālos ar $0.1 < z < 4.2$.

- Analīzi veica **akli**, paslēpjot kosmoloģisko rezultātu līdz metodoloģijas fiksēšanai, lai mazinātu apstiprinājuma aizspriedumu.
- Pielāgoja plakano standarta ΛCDM modeli DESI BAO datiem atsevišķi un pēc tam kombinācijā ar Lielā sprādziena nukleosintēzes prioru un Planck un ACT kosmiskā mikroviļņu fona (CMB) datiem.
- Paplašināja modeli divos veidos: ar konstantu tumšās enerģijas w (wCDM) un ar laikā mainīgu $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$CDM).
- Laikā mainīgo modeli pārbaudīja, DESI+CMB pēc kārtas kombinējot ar trim dažādām Ia tipa supernovu datu kopām — Pantheon+, Union3 un DES-SN5YR —, nevis izvēloties tikai vienu.
- Noteica ierobežojumus neitrīno masu summai un pārbaudīja, kā tie mainās, ja tumšās enerģijas fons drīkst novirzīties no ΛCDM.

Ko viņi atklāja

- **DESI BAO vieni paši saskan ar standarta modeli.** Tie dod matērijas blīvumu $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, bet modelī ar konstantu brīvu w — $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$, tieši pie kosmoloģiskās konstantes vērtības -1.
- Kombinācijā ar CMB un tā lēcošanu DESI dod $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ un Habla konstanti $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62, kombinējot ar nukleosintēzi un CMB akustisko mērogu).
- **Laikā mainīgajā modelī kombinētie dati dod priekšroku mainīgai tumšajai enerģijai** — $w_0 > -1$ un $w_a < 0$. DESI+CMB gadījumā priekšroka ir 2.6σ, bet, pievienojot supernovu datus, tā kļūst par 2.5σ, 3.5σ vai 3.9σ attiecīgi Pantheon+, Union3 un DES-SN5YR gadījumā. Sigma rāda attālumu no standarta modeļa prognozes; fizikā par atklājumu parasti runā ap 5σ, un pat tas pats par sevi nenosaka interpretācijas pareizību (ceļvedis).
- Ja neitrīno masu summa ir brīva, DESI+CMB dod stingru augšējo robežu — mazāk par 0.072 eV ar 95% ticamību. Taču raksts skaidri norāda, ka šī robeža būtiski vājinās, ja tumšās enerģijas fons drīkst atšķirties no ΛCDM.

Ko tas nepierāda

- Tas **neparāda**, ka tumšā enerģija mainās. DESI paša lineāls saskan ar kosmoloģisko konstanti; mājiens uz evolūciju parādās tikai **kombinētajos** pielāgojumos un tikai bagātākajā divu parametru modelī.
- Tas **nenozīmē**, ka „ΛCDM ir miris" vai „Einšteins kļūdījās". Stiprākais skaitlis, 3.9σ, ir zem 5σ robežas, ko fiziķi parasti prasa atklājuma apgalvojumam, un standarta modelis joprojām labi apraksta DESI vienu pašu.
- Rezultāts **nav neatkarīgs no supernovu parauga**. Nomainot supernovu datu kopu, nozīmīgums mainās no 2.5σ līdz 3.9σ — vairāk nekā par pilnu sigma. Signāls, kura stiprums tik ļoti atkarīgs no pievienotās ārējās datu kopas, ir mājiens turpmākam darbam, nevis rezultāts, ko jau var uzskatīt par nostiprinātu.
- DESI paša nelielā novirze uz $w_0 > -1$ ir **daļēji saistīta ar vienu neparastu punktu** — galaktiku

intervālu pie sarkanās nobīdes 0.51, kas atrodas nedaudz augstāk par ΛCDM prognozi. Taču raksts šo vietu pārbauda: punktu traktē kā statistisku svārstību un parāda, ka visu DESI zemo sarkano nobīžu ($z < 0.6$) mērījumu aizstāšana ar vecākiem SDSS mērījumiem tumšās enerģijas rezultātu nemaina. Neparastais punkts ietekmē DESI vienu pašu, bet **neuztur kombinēto mājienu**.
- Neitrīno masas robeža **nav neatkarīga no modeļa**. Tā ir stingra tikai tad, ja fona izplešanās ir fiksēta ΛCDM formā; atbrīvojot šo pieņēmumu, atbrīvojas arī masas robeža.

Cik pārliecinoši ir pierādījumi?

- **Ļoti stipri kā attāluma mērījums.** BAO ir viens no tīrākajiem kosmoloģijas instrumentiem, DESI mērījums ir līdz šim precīzākais, un aklā analīze ir tieši tāda aizsardzība, ko gribas redzēt pret vēlmes ieraudzīt gaidītu rezultātu.
- **Patiesi intriģējoši, bet ne izšķiroši kā apgalvojums par tumšo enerģiju.** 2.6σ priekšroka DESI+CMB, kas ar visstingrāko supernovu kopu pieaug līdz 3.9σ, ir rezultāts, kas pelna vairāk datu — ne tāds, kas jau apgāž modeli. Galvenais piesardzības iemesls ir atšķirība starp supernovu kopām; par labu autoriem runā arī tas, ka viņi pārbaudīja, vai rezultātu nenosaka visneparastākais BAO punkts.
- Pats raksts ir piesardzīgs: tas ziņo nozīmīgumu trīs supernovu kombinācijās, nevis izvēlas lielāko skaitli, un skaidri norāda neitrīno rezultāta atkarību no modeļa. Pārspīlējums, ja tāds rodas, pārsvarā parādās pārstāstos, nevis pašā darbā.

Kāpēc tas ir svarīgi

Ceturtdaļgadsimtu „tumšā enerģija” un „kosmoloģiskā konstante” gandrīz tika lietoti kā sinonīmi, jo visi mērījumi bija saderīgi ar $w = -1$. DESI ir pirmais datu kopums ar tādu precizitāti, ka kopā ar citiem datiem tas var nopietni uzdot jautājumu, vai šis -1 ar laiku mainās — un saņemt atbildi, kas nav vienkārši „nē”. Tā ir reāla maiņa tajā, ko dati spēj pārbaudīt, un tieši tāpēc rezultāts ir uzmanības vērts.

Taču tā pati precizitāte parāda arī, cik nosacīts ir mājiens: tas ir dzīvs dažās datu kombinācijās, kluss citās un īpaši jutīgs pret to, kuru supernovu katalogu pievieno DESI. Pareizā attieksme nav ne noraidīt rezultātu, ne priekšlaikus pasludināt revolūciju. Jāskatās uz lielākajiem nākamajiem DESI izlaidumiem — DR2 jau tika publicēts 2025. gadā — un neatkarīgām supernovu datu kopām, lai redzētu, vai novirze nostiprinās vai izzūd. Tā kosmoloģijā izskatās īsts „varbūt”, un to ir vērts tieši tā arī saukt.

Īss kopsavilkums

DESI ar līdz šim precīzāko barionu akustisko „lineālu” ir izmērījis Visuma izplešanās vēsturi, izmantojot vairāk nekā sešus miljonus objektu. Viens pats šis lineāls saskan ar standarta modeli, kurā tumšā

enerģija ir konstanta. Apvienojot DESI ar kosmisko mikroviļņu fonu un supernovu datiem, parādās priekšroka laikā mainīgai tumšajai enerģijai — no 2.6σ līdz 3.9σ atkarībā no pievienotās supernovu kopas. Tas ir īsts un interesants mājiens, nevis atklājums: tas paliek zem fizikā ierastā sliekšņa un mainās līdz ar ārējiem datiem. Tumšā enerģija *varētu* mainīties. DESI ir padarījis šo jautājumu precīzi uzdodamu — vēl ne atbildētu.

Avoti

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