



The CLEAN PAPER

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

DESI kõige teravam kosmiline joonlaud ja ettevaatlik „võib-olla“ tumeenergia kohta

DESI mõõtis kuue miljoni objekti abil universumi paisumisajalugu seni kõige täpsema bariion-akustilise joonlauaga. Üksi nõustub see joonlaud standardmudeliga, milles tumeenergia on konstantne. Eelistus muutuvale tumeenergiale ilmub alles siis, kui DESI kombineeritakse kosmilise mikrolaine-taustkiirguse ja supernoovavalimiga — $2,6\sigma$ kuni $3,9\sigma$ sõltuvalt lisatud supernoovadest, alla füüsikute avastusläve ja tundlik kasutatud andmekombinatsiooni suhtes. Täpselt sõnastatud päris küsimus, mitte veel vastus.

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

Helist tehtud joonlaud

Universumi varases eas, enne tähtede teket, võnkus tavalisest ainest ja valgusest koosnev kuum plasma. Rõhulained liikusid selles rohkem kui poole valguse kiirusega, kuni universum jahtus piisavalt, et aatomid saaksid moodustuda ja võnkumine lakkas — jättes aine jaotusse nõrga eelistatud kaugusskaala. See kaugus, *helihorizont*, on tänapäeval umbes 150 megaparsekit (ligikaudu 490 miljonit valgusaastat) ning avaldub väikese ülehulgana galaktikapaarides, mida eraldab just selline vahemaa, igas suunas ja eri kosmilistel ajastutel. Kosmoloogid nimetavad seda barüon-akustiliseks võnkumiseks ehk BAO-ks ning kasutavad seda standardjoonlauana: mõõtes, kui suur see külmunud skaala eri kaugustel taevas paistab, saab kaardistada universumi paisumiskiiruse muutumist läbi ajaloo.

Dark Energy Spectroscopic Instrument ehk DESI ehitati selle joonlaua mõõtmiseks täpsemalt kui ükski varasem instrument. Selle esimese aasta andmestik kaardistab BAO-skaala galaktikates, kvasarites ja kaugete gaasipilvede Lymani alfa metsas — üle kuue miljoni objekti seitsmes punanihke-vahemikus väärtustest 0,1 kuni 4,2. Et inimeste ootused tulemust ei mõjutaks, tegi meeskond analüüsi *pimesi*: kosmoloogiline vastus peideti uurijate endi eest, kuni meetoodika oli lõplikult paigas. Tegemist on suure edumaaga kõige täpsema BAO-mõõtmisega seni.



DESI on paigaldatud Arizonas Kitt Peakil asuvale Nicholas U. Mayalli 4-meetrisele teleskoobile. Instrument juhib tuhandeid optilised kiud spektrograafidesse ning muudab taevaobjektide asukohad miljonite galaktikate ja kvasarite spektriteks ja punaniheteks.

Mis on DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument on spektrograaf Arizonas Kitt Peakil asuval Nicholas U. Mayalli 4-meetrise teleskoobil. Tumeenergiat ta otseselt ei näe — seda ei saa ükski instrument teha, sest tumeenergia ei kiirga valgust. Selle asemel salvestab DESI korraga umbes 5000 galaktika ja kvasari spektrid, loeb iga objekti punanihke sellest, kui palju paisuv universum on selle valgust venitanud, ning koostab miljonitest objektidest kolmemõõtmelise kaardi. Tumeenergia mõju järeldatakse seejärel sellest, kuidas kaart näitab kosmilise paisumise muutumist ajas. Kogu ahela — robotkiududest akustilise joonlauani — kohta vaata Kuidas DESI töötab.

Sellest levis pealkiri, et tumeenergia ei pruugi olla konstant — et universumi paisumist kiirendav salapärase nähtus võib aja jooksul *nõrgeneda* ja standardse kosmoloogilise mudeli mõranema panna. Väide ei ole välja mõeldud, kuid seda on lihtne üle lugeda. Aus versioon on täpsem ja huvitavam: DESI enda joonlaud üksi sobib täiesti tavalise standardmudeliga. Vihje millelegi uuele ilmub alles siis, kui DESI kombineeritakse teiste andmetega — ja vihje tugevus sõltub sellest, millised teised andmed valida.

DESI barüon-akustiline joonlaud üksi on kooskõlas konstantse tumeenergiaga ehk kosmoloogilise konstandiga. *Ajas muutuva* tumeenergia eelistus tekib alles siis, kui DESI ühendatakse kosmilise mikrolaine-taustkiirguse ja supernoovade valimiga — ning selle tugevus muutub sõltuvalt kasutatud supernoovavalimist.

Standardjoonlaud ja kaks viisi, kuidas tumeenergia võib muutuda

BAO-skaala on *standardjoonlaud*: kuna varase universumi füüsikast on selle tegelik pikkus teada, näitab tegeliku pikkuse võrdlemine selle näiva suurusega kindlal kaugusel, kui palju oli universum selleks ajaks paisunud. Paljudel kaugustel mõõdetuna jälgib see joonlaud kogu paisumisajalugu — just seda, mida tumeenergia mõjutab.

Standardmudelis, mida nimetatakse Λ CDM-iks, on tumeenergia *kosmoloogiline konstant*: tühja ruumi fikseeritud energiatihedus, mis kunagi ei muutu. Füüsikud kirjeldavad selle käitumist „olekuvõrrandi“ parameetriga w , mille väärtus tõelise kosmoloogilise konstandi puhul on täpselt -1 , kõikjal ja alati.

Selle kontrollimiseks saab eeldust lõdvendada kahel viisil. Lihtsam variant lubab w -l olla mõni muu konstantne väärtus (endiselt ajas muutumatu) — see on „wCDM“. Rikkamas mudelis lubatakse w -l universumi paisudes muutuda ning seda kirjeldavad kaks arvu: w_0 , selle väärtus täna, ja w_a , mis näitab muutumise kiirust. See „ w_0w_a CDM“ taandub Λ CDM-ile ainsas punktis $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Eelistus, kus w_0 on suurem kui -1 ja w_a negatiivne, tähendabki siin „muutuvat tumeenergiat“: tumeenergiat, mis oli minevikus tugevamalt tõukav ja mille mõju nüüd leeveneb.

Mida autorid tegid

- Mõõtsid DESI esimese aasta andmetest — galaktikatest, kvasaritest ja Lymani alfa metsast — BAO-skaala enam kui kuue miljoni objekti põhjal seitsmes punanihkevahemikus $0.1 < z < 4.2$.
- Tegid analüüsi **pimesi**, varjates kosmoloogilist tulemust kuni metoodika lõpliku kinnitamiseni, et vähendada kinnituskalduvuse ohtu.
- Sobitasid DESI BAO andmetele esmalt standardse lameda Λ CDM-mudeli ning seejärel kombineerisid need Suure Paugu nukleosünteesi prioriga ja Plancki ning ACT kosmilise mikrolainetaustkiirguse (CMB) andmetega.
- Laiendasid mudelit kahel viisil: konstantse tumeenergia w -ga (w CDM) ja ajas muutuva w_0w_a -ga (w_0w_a CDM).
- Testisid ajas muutuvat mudelit, kombineerides DESI+CMB kordamööda kolme eri Ia tüüpi supernoovakogumiga — Pantheon+, Union3 ja DES-SN5YR — selle asemel et valida neist ainult üks.
- Seadsid piirid neutriinode kogumassile ja kontrollisid, kuidas need piirid muutuvad, kui tumeenergia taustal lubatakse varieeruda.

Mida nad leidsid

- **DESI BAO üksi on standardmudeliga kooskõlas.** Ainetiheduseks saadakse $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ ning juhul, kui tumeenergiale lubatakse konstantne w , $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — sisuliselt otse kosmoloogilise konstandi väärtuse -1 peal.
- Koos CMB ja selle gravitatsiooniläätse signaaliga annab DESI $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ning Hubble'i konstandiks $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (68.52 ± 0.62 , kui see kombineeritakse selle asemel nukleosünteesi ja CMB akustilise skaalaga).
- **Ajas muutuva mudeli korral eelistavad kombineeritud andmed muutuvat tumeenergiat** — $w_0 > -1$ ja $w_a < 0$. DESI+CMB korral on eelistus 2.6σ ning supernoovavalimi lisamisel muutub see vastavalt 2.5σ , 3.5σ või 3.9σ Pantheon+, Union3 või DES-SN5YR puhul (sigma näitab, kui kaugel asub tulemus standardmudeli ootusest; 5σ on tavapärane lävi avastuse väljakuulutamiseks, kuid see ei tähenda, et tõlgendus oleks kindlasti õige — juhend).
- Kui neutriinode kogumass jäetakse vabaks, saadakse sellele range piir — DESI+CMB puhul alla $0,072 \text{ eV}$ (95% usaldusnivoo) — kuid artikkel ütleb selgelt, et piir muutub märksa lõdvemaks, kui tumeenergia taustal lubatakse Λ CDM-ist kõrvale kalduda.

Mida see ei tõesta

- See **ei näita**, et tumeenergia muutub ajas. DESI enda joonlaud on kooskõlas kosmoloogilise konstandiga; evolutsiooni vihje ilmub ainult *kombineeritud* sobitustes ja ainult rikkamas kaheparameetrilises mudelis.
- See **ei tähenda**, et „ Λ CDM on surnud“ või „Einstein eksis“. Kõige tugevam arv, 3.9σ , jääb alla 5σ kokkuleppelise piiri, mida füüsikud tavaliselt enne avastuse väljakuulutamist nõuavad — ja

standardmudel sobib DESI andmetega üksi endiselt hästi.

- Tulemus **ei ole valimist sõltumatu**. Supernoovakogumi vahetamine nihutab statistilist olulisust 2.5σ -lt 3.9σ -ni — rohkem kui terve sigma võrra. Signaal, mille tugevus sõltub nii palju sellest, milline väline andmestik külge lisatakse, on uurimist väärt vihje, mitte tulemus, mille võib juba lukku panna.
- DESI üksinda näiv kalduvus $w_0 > -1$ poole tuleneb **osaliselt ühest anomaalsest punktist** — galaktikate punanihke 0,51 vahemikust, mis asub Λ CDM-i suhtes veidi kõrgel. Kuid siin teeb artikkel vajaliku kontrolltöö ära: seda punkti käsitletakse statistilise fluktuatsioonina ning näidatakse, et *kõigi* DESI väikese punanihkega ($z < 0.6$) mõõtmiste asendamine vanemate SDSS-i mõõtmistega jätab tumeenergia tulemuse sisuliselt muutmata. Ebatavaline punkt sikutab DESI-t üksi; see **ei hoiu üleval** kombineeritud vihjet. (Sõltumatud rühmad on hiljem selle rolli põhjalikumalt uurinud.) Seega töötab see ettevaatusmärkus vastupidiselt sellele, kuidas lugu vahel esitatakse: tulemust koormustestiti kõige anomaalsema andmepunkti suhtes ja see pidas vastu.
- Neutriinomassi piir **ei ole mudelist sõltumatu otsus**. See on range ainult siis, kui taustpaisumine hoitakse Λ CDM-i küljes; eeldust lõdvendades lõdveneb ka piir.

Kui tugev on tõendusmaterjal

- **Kauguse mõõtmisena väga tugev**. BAO-joonlaud on üks kosmoloogia puhtamaid tööriistu, DESI oma on seni täpsem ning pimeanalüüs on täpselt see kaitse, mida on vaja, et oodatud vastust andmetesse mitte sisse lugeda.
- **Tumeenergia väitena tõeliselt intrigeeriv, kuid mitte otsustav**. DESI+CMB 2.6σ eelistus, mis kõige piiravama supernoovavalimiga tõuseb 3.9σ -ni, on selline tulemus, mis väärrib rohkem teleskoobiaega — mitte selline, mis mudeli ümber lükkaks. Aus ettevaatuse põhjus on erinevus supernoovavalimite vahel; autorite kiituseks kontrollisid nad ka, et nende kõige anomaalsem üksik BAO-punkt tulemust ei juhiks — täpselt selline kodutöö on sellise väite puhul vajalik.
- Artikkel on enda suhtes ettevaatlik: see esitab statistilise olulisuse kolmel viisil, mitte ainult suurima arvu, ning märgib ära neutriinotulemuse mudelisõltuvuse. Liialdus, kui seda kusagil esineb, tekib ümberjutustuses, mitte artiklis.

Miks see oluline on

Veerand sajandit on „tumeenergiat“ ja „kosmoloogilist konstanti“ kasutatud peaaegu sünonüümidena, sest kõik mõõtmised on olnud kooskõlas täpselt -1 väärtusega w -ga. DESI on esimene piisavalt täpne andmestik, mis koos teistega saab üldse *küsida*, kas see -1 ajas nihkub — ja saada vastuseks midagi muud kui selge ei. See on päris muutus selles, mida andmed võimaldavad, ning põhjus, miks tulemus väärrib tähelepanu. Ent sama täpsus näitab ka, kui tingimuslik vihje on: mõnes andmekombinatsioonis elus, teises vaikne ning eriti tundlik selle suhtes, milline supernoovakataloog DESI-ga paaritatakse. Õige hoiak ei ole ei mahategemine ega liiga vara välja kuulutatud revolutsioon. Tuleb jälgida järgmist, suuremat DESI andmeväljalaset — DR2, mis ilmus juba 2025. aastal — ja sõltumatuid supernoovavalimeid ning vaadata, kas nihe tugevneb või hajub. Selline näeb kosmoloogias välja päris

„võib-olla“, ja seda tasubki kajastada kui „võib-olla“.

Lühidalt

DESI on kuue miljoni objekti abil mõõtnud universumi paisumisajalugu seni parima barüon-akustilise standardjoonlauaga. Üksi on see joonlaud kooskõlas standardmudeliga, kus tumeenergia on konstantne. Kui lisada kosmilise mikrolaine-taustkiirguse ja supernoovade andmed, tekib eelistus ajas muutuvale tumeenergiale — 2.6σ kuni 3.9σ , sõltuvalt sellest, milline supernoovavalim lisatakse. See on päris ja huvitav vihje, mitte avastus: tulemus jääb alla füüsikute nõutava läve ning muutub koos valitud supernoovaandmestikuga. Tumeenergia võib ajas muutuda. DESI on muutnud selle küsimuseks, mida saab täpselt esitada — mitte veel küsimuseks, millele ta on vastanud.

Allikad

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>