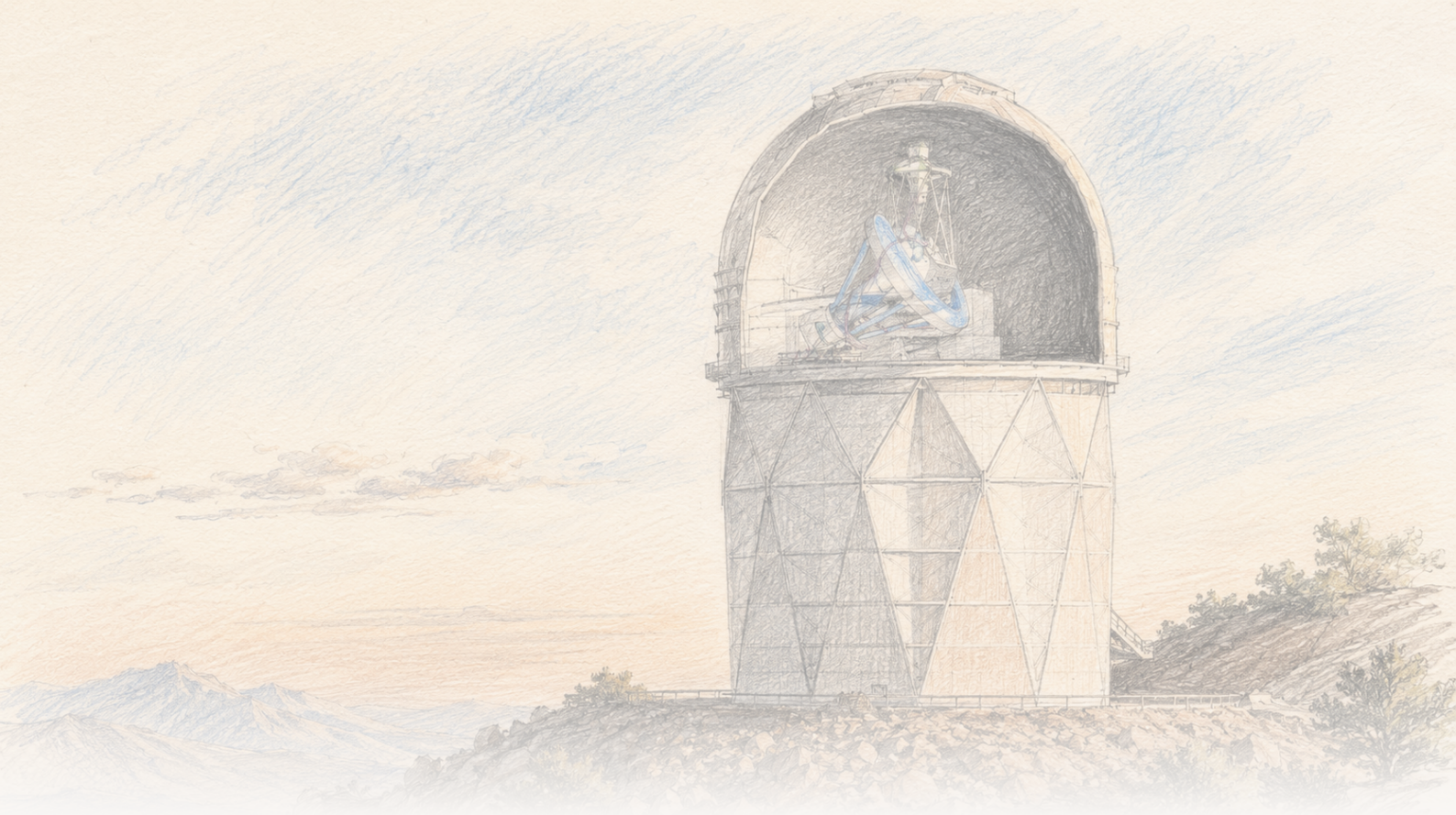

The Clean Paper

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

DESI:n tarkin kosminen mittatikku — ja varovainen ehkä pimeästä energiasta

DESI mittasi maailmankaikkeuden laajenemishistorian tähän asti tarkimmalla baryoniakustisella mittatikulla kuudesta miljoonasta kohteesta. Yksinään mittatikku sopii standardimalliin, jossa pimeä energia on vakio. Vasta kun DESI yhdistetään kosmiseen mikroaaltotaustaan ja supernova-aineistoon, ilmestyy suosinta ajan mukana muuttuvaa pimeää energiaa kohtaan — 2.6σ–3.9σ sen mukaan, mikä supernovaotos lisätään. Se jää fyysikoiden löytökynnyksen alle ja riippuu yhdistettävästä datasta. Todellinen kysymys on nyt mitattu tarkasti, ei vastattu.

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

Äänestä tehty mittatikku

Varhaisessa maailmankaikkeudessa, ennen tähtiä, tavallisen aineen ja valon kuuma plasma soi. Paineaallot kulkivat siinä yli puolella valonnopeudesta, kunnes maailmankaikkeus jäähtyi niin paljon, että atomit pystyivät muodostumaan ja soiminen loppui. Aineen jakaumaan jäi heikko etuoikeutettu etäisyys. Tätä etäisyyttä, *äänihorisonttia*, vastaa nykyään noin 150 megaparsekia eli suunnilleen 490 miljoonaa valovuotta. Se näkyy pienenä ylimääränä galaksipareja, joiden välimatka on tämä, joka suunnassa ja eri aikakausina. Kosmologit kutsuvat ilmiötä baryoniakustiseksi oskillaatioksi eli BAO:ksi ja käyttävät sitä standardimittatikkuna: kun tiedetään jäätyneen mittakaavan todellinen pituus ja mitataan, kuinka suurena se näkyy taivaalla eri etäisyyksillä, voidaan piirtää maailmankaikkeuden laajenemishistoria.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) rakennettiin mittaamaan tämä mittatikku paremmin kuin koskaan ennen. Ensimmäinen datajulkaisu kartoittaa BAO-asteikon galakseissa, kvasaareissa ja kaukaisten kaasupilvien Lyman-alpha-metsässä — yli kuudessa miljoonassa kohteessa seitsemässä punasiirtymävälissä välillä 0.1–4.2. Jotta tutkijoiden odotukset eivät vaikuttaisi tulokseen, analyysi tehtiin *sokkona*: kosmologinen vastaus piilotettiin tutkijoilta, kunnes menetelmät oli lukittu. BAO-mittaus on ylivoimaisesti tarkin tähän asti.

DESI on asennettu Nicholas U. Mayallin 4-metriseen teleskooppiin Kitt Peakilla Arizonassa. Instrumentti syöttää tuhansien optisten kuitujen valon spektrografeihin ja muuttaa taivaan sijainnit miljoonien galaksien ja kvasaarien spektreiksi ja punasiirtymiksi.

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

Mikä DESI on

Dark Energy Spectroscopic Instrument on spektrografi Nicholas U. Mayallin 4-metrisessä teleskoopissa Kitt Peakilla Arizonassa. Se ei näe pimeää energiaa suoraan — mikään ei näe, sillä pimeä energia ei säteile valoa. Sen sijaan DESI tallentaa noin 5,000 galaksin ja kvasaarin spektrin yhtä aikaa, lukee kunkin kohteen punasiirtymän siitä kuinka laajeneva maailmankaikkeus on venyttänyt valoa ja rakentaa miljoonista kohteista kolmiulotteisen kartan. Pimeä energia päätellään siitä, miten kartta näyttää kosmisen laajenemisen muuttuneen ajan mukana. Koko ketjusta robottikuiduista akustiseen mittatikkuun voi lukea oppaasta How DESI works.

Tutkimuksesta levinnyt otsikko oli, ettei pimeä energia ehkä olekaan vakio — että maailmankaikkeuden laajenemista kiihdyttävä salaperäinen tekijä voisi *heikentyä* ajan myötä ja murtaa kosmologian standardimallia. Väite ei ole keksitty, mutta se on helppo lukea liian vahvaksi. Rehellinen versio on täsmällisempi ja kiinnostavampi: DESI:n oma mittatikku sopii yksinään tavalliseen standardimalliin. Vihje uudesta ilmestyy vasta, kun DESI yhdistetään muuhun dataan — ja vihjeen voimakkuus riippuu siitä, mihin dataan se yhdistetään.

DESI:n baryoniakustinen mittatikku yksinään sopii vakioon pimeään energiaan eli kosmologiseen vakioon. Suosinta *muuttuvaa* pimeää energiaa kohtaan syntyy vasta, kun DESI yhdistetään kosmiseen mikroaaltotaustaan ja supernova-aineistoon, ja voimakkuus muuttuu sen mukaan, mitä supernovaotosta käytetään.

Standardimittatikku ja kaksi tapaa antaa pimeän energian muuttua

BAO-asteikko on *standardimittatikku*: koska sen todellinen pituus tunnetaan varhaisen maailmankaikkeuden fysiikasta, todellisen pituuden vertaaminen näennäiseen kokoon tietyllä etäisyydellä kertoo, kuinka paljon maailmankaikkeus oli siihen mennessä laajentunut. Kun mittaus tehdään monilla etäisyyksillä, saadaan koko laajenemishistoria — ja juuri sitä pimeä energia säätelee.
Standardimallissa, jota kutsutaan ΛCDM:ksi, pimeä energia on *kosmologinen vakio*: tyhjän avaruuden vakio energiatiheys, joka ei muutu. Fyysikot kuvaavat sen käyttäytymistä ”tilanyhtälöparametrilla” w, joka aidolle kosmologiselle vakiolle on täsmälleen -1 kaikkialla ja aina. Tätä voi testata höllentämällä oletusta kahdella tavalla. Yksinkertaisempi on antaa w:n olla jokin muu vakio, joka silti pysyy ajassa muuttumattomana — tämä on ”wCDM”. Rikkaammassa mallissa w saa muuttua maailmankaikkeuden laajetessa, ja sitä kuvataan kahdella luvulla: w_0, sen arvo nykyään, ja w_a, muutosnopeus. Tämä ”w_0w_aCDM”-malli palautuu ΛCDM:ksi yhdessä pisteessä $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Suosinta yhdistelmälle w_0 suurempi kuin -1 ja w_a negatiivinen on tässä se, mitä ”muuttuva pimeä energia” tarkoittaa: pimeä energia oli menneisyydessä repulsiivisempaa ja heikkenee nyt.

Mitä tutkijat tekivät

- Mittasivat BAO-asteikon DESI:n ensimmäisen vuoden datasta — galakseista, kvasaareista ja Lyman-alpha-metsästä — yli kuudesta miljoonasta kohteesta seitsemässä punasiirtymävälissä, jotka kattavat $0.1 < z < 4.2$.
- Tekivät analyysin **sokkona**, piilottaen kosmologisen tuloksen siihen asti, että menetelmä oli lukittu, jotta vahvistusharha ei ohjaisi analyysia.
- Sovittivat tasaisen ΛCDM-standardimallin ensin pelkkään DESI BAO -dataan ja sitten yhdessä alkuräjähdyksen nukleosynteesin priorin sekä Planckin ja ACT:n kosmisen mikroaaltotaustan (CMB) kanssa.
- Laajensivat mallia kahdella tavalla: vakio pimeän energian w (wCDM) sekä ajassa muuttuva $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$CDM).
- Testasivat ajassa muuttuvaa mallia yhdistämällä DESI+CMB:n vuorotellen kolmeen eri tyypin Ia supernova-aineistoon — Pantheon+, Union3 ja DES-SN5YR — yhden valitsemisen sijasta.
- Asettivat rajoja neutriinojen yhteenlasketulle massalle ja tarkistivat, miten rajat muuttuvat jos pimeän energian taustakehityksen annetaan poiketa ΛCDM:stä.

Mitä he löysivät

- **DESI BAO yksinään sopii standardimalliin.** Se antaa aineen tiheydeksi $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, ja kun pimeälle energialle sallitaan vakio w, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — käytännössä kosmologisen vakion arvon -1 kohdalla.
- Yhdessä CMB:n ja sen linssiefektin kanssa DESI antaa $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ja Hubblen vakioksi $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 kun se yhdistetään nukleosynteesiin ja CMB:n akustiseen asteikkoon).
- **Ajassa muuttuvassa mallissa yhdistelmäaineistot suosivat kehittyvää pimeää energiaa** — $w_0 > -1$ ja $w_a < 0$. Suosinta on 2.6σ DESI+CMB:lle, ja supernova-aineiston lisäämisen jälkeen 2.5σ, 3.5σ tai 3.9σ Pantheon+-, Union3- tai DES-SN5YR-aineistolla. Sigma kertoo, kuinka kaukana tulos on standardimallin odotuksesta; 5σ on tavallinen löytökynnys eikä väite siitä, että tulkinta olisi varmasti oikea — opas.
- Kun neutriinojen yhteenlaskettu massa jätetään vapaaksi, sille saadaan tiukka yläraja — alle 0.072 eV (95% confidence) DESI+CMB:llä — mutta artikkeli sanoo suoraan, että raja löystyy huomattavasti, jos pimeän energian taustan sallitaan poiketa ΛCDM:stä.

Mitä tämä ei todista

- Se **ei** osoita, että pimeä energia muuttuu. DESI:n oma mittatikku sopii kosmologiseen vakioon; kehityksen vihje ilmestyy vain *yhdistetyissä* sovituksissa ja vain rikkaammassa kahden parametrin mallissa.
- Se **ei** tarkoita ”ΛCDM on kuollut” tai ”Einstein oli väärässä”. Vahvin luku, 3.9σ, jää alle fyysikoiden

löytöön tavallisesti vaatimasta 5σ:sta, ja standardimalli sopii DESI:in yksinään hyvin.

- Tulos **ei ole otosriippumaton**. Supernova-aineiston vaihtaminen siirtää merkitsevyyden 2.5σ:sta 3.9σ:aan — yli yhden sigman. Signaali, jonka koko riippuu näin paljon siitä, minkä ulkoisen aineiston siihen liittää, on seurattava vihje eikä talteen pantava mittaustulos.
- DESI:n *yksinään* osoittama kallistus kohti $w_0 > -1$ johtuu **osittain yhdestä poikkeavasta datapisteestä** — punasiirtymän 0.51 galaksivälistä, joka on hieman ΛCDM:n yläpuolella. Tässä tutkimus tekee kuitenkin kotitehtävänsä: pistettä käsitellään tilastofluktuationa, ja tutkijat osoittavat, että *kaikkien* DESI:n matalan punasiirtymän ($z < 0.6$) mittausten korvaaminen vanhemmilla SDSS-mittauksilla jättää pimeän energian tuloksen ennalleen. Outo piste vetää DESI:n omaa tulosta, mutta **ei** kanna yhdistettyä vihjettä. Riippumattomat ryhmät ovat sittemmin tutkineet sen vaikutusta tarkemmin. Tämä varaus siis toimii päinvastoin kuin joskus kerrotaan: tulosta stressitestattiin juuri sen poikkeavinta datapistettä vastaan ja se säilyi.
- Neutriinomassan raja **ei** ole mallista riippumaton tuomio. Se on tiukka vain, jos taustalaajeneminen pidetään ΛCDM:n mukaisena; kun oletusta höllennetään, rajakin löystyy.

Kuinka vahvaa näyttö on

- **Erittäin vahvaa etäisyysmittauksena.** BAO-mittatikku kuuluu kosmologian puhtaimpiin työkaluihin, DESI:n mittaus on tarkin tähän asti ja sokkoanalyysi on juuri oikea suoja toivotun vastauksen lukemiselta dataan.
- **Aidosti kiinnostavaa mutta ei ratkaisevaa pimeän energian väitteenä.** 2.6σ:n suosinta DESI+CMB:llä, joka nousee 3.9σ:aan kaikkein rajoittavimmalla supernova-aineistolla, ansaitsee lisää teleskooppiaikaa mutta ei vielä mallin kaatamista. Rehellinen syy varovaisuuteen on supernovaotosten välinen vaihtelu. Tutkijoiden kunniaksi he tarkistivat myös, ettei poikkeavin BAO-piste aja tulosta — juuri se kotitehtävä, joka tällaiselle väitteelle kuuluu.
- Artikkeli on itsensä suhteen varovainen: se raportoi merkitsevyyden kolmella tavalla eikä vain suurinta lukua ja nostaa esiin neutriinotuloksen malliriippuvuuden. Ylitulkinta syntyy mahdollisesti jälleenkerronnassa, ei itse paperissa.

Miksi tällä on merkitystä

Neljännesvuosisadan ajan ”pimeä energia” ja ”kosmologinen vakio” ovat olleet lähes synonyymejä, koska kaikki mittaukset sopivat täsmälleen -1:n w:hen. DESI on ensimmäinen aineisto, joka on niin tarkka, että yhdistettynä muihin se voi edes *kysyä*, muuttuuko -1 ajan mukana — ja saada vastauksen, joka ei ole yksiselitteinen ei. Se on todellinen muutos siinä, mitä data pystyy tekemään, ja siksi tulos ansaitsee huomion. Sama tarkkuus kuitenkin näyttää myös, kuinka ehdollinen vihje on: elossa joissakin datayhdistelmissä, hiljainen toisissa ja erityisen herkkä sille, mikä supernovaluettelo DESI:n pariksi valitaan. Oikea asenne ei ole vähättely eikä ennenaikaisesti julistettu vallankumous. On syytä seurata seuraavaa suurempaa DESI-julkaisua — DR2, joka julkaistiin jo vuonna 2025 — ja riippumattomia supernova-aineistoja ja katsoa, vahvistuuko vai häviääkö ajallinen muutos. Tältä aito ”ehkä” näyttää kosmologiassa, ja se kannattaa raportoida juuri ehkä-muodossa.

Lyhyesti

DESI on mitannut maailmankaikkeuden laajenemishistorian parhaalla koskaan rakennetulla baryoniakustisella mittatikulla kuudesta miljoonasta kohteesta. Yksinään mittatikku sopii standardimalliin, jossa pimeä energia on vakio. Kun se yhdistetään kosmiseen mikroaaltotaustaan ja supernova-aineistoon, syntyy suosinta ajan mukana muuttuvaa pimeää energiaa kohtaan — 2.6σ–3.9σ sen mukaan, mitä supernovia lisätään. Se on todellinen ja kiinnostava vihje, ei löytö: se jää fyysikoiden vaatiman kynnyksen alle ja muuttuu supernova-aineiston mukana. Pimeä energia saattaa kehittyä. DESI on tehnyt kysymyksestä riittävän tarkan esitettäväksi — mutta ei vielä vastannut siihen.

Lähteet

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