The Clean Paper

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

Tiksliausia DESI kosminė liniuotė ir atsargus „galbūt“ apie tamsiąją energiją

DESI iš šešių milijonų objektų išmatavo Visatos plėtimosi istoriją tiksliausia iki šiol barioninių akustinių osciliacijų liniuote. Vien DESI matavimas dera su standartiniu modeliu, kuriame tamsioji energija yra konstanta. Pirmenybė kintančiai tamsiajai energijai atsiranda tik DESI sujungus su kosminiu mikrobangų fonu ir supernovų rinkiniu – nuo 2,6σ iki 3,9σ priklausomai nuo supernovų katalogo. Tai žemiau fizikoje įprastos atradimo ribos ir jautru duomenų kombinacijai. Tikras tiksliai suformuluotas klausimas, dar ne atsakymas.

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

Iš garso pagaminta liniuotė

Ankstyvojoje Visatoje, dar prieš atsirandant žvaigždėms, karšta įprastos medžiagos ir šviesos plazma „skambėjo“. Slėgio bangos ja sklido daugiau kaip puse šviesos greičio, kol Visata pakankamai atvėso atomams susidaryti ir svyravimai sustojo – medžiagos pasiskirstyme palikdami silpnai išreikštą būdingą atstumą. Šiandien tas atstumas, vadinamas *garso horizontu*, yra apie 150 megaparsekų (maždaug 490 mln. šviesmečių). Jis pasireiškia kaip nedidelis galaktikų porų, atskirtų tokiu tarpu, perteklius visomis kryptimis ir įvairiais kosminiais laikais. Kosmologai tai vadina barioninėmis akustinėmis osciliacijomis, arba BAO, ir naudoja kaip standartinę liniuotę: išmatavus, kokio dydžio šis žinomo tikro ilgio mastelis atrodo skirtingais atstumais, galima atkurti Visatos plėtimosi istoriją.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) buvo sukurtas šią liniuotę išmatuoti tiksliau nei bet kas anksčiau. Pirmajame duomenų rinkinyje BAO skalė išmatuota galaktikose, kvazaruose ir tolimų dujų debesų Lyman-alfa miške – daugiau kaip šešiuose milijonuose objektų, septyniuose raudonojo poslinkio intervaluose nuo 0.1 iki 4.2. Kad žmonių lūkesčiai nepaveiktų rezultato, analizė atlikta **aklai**: kosmologinis atsakymas nuo pačios komandos buvo paslėptas, kol metodai galutinai užfiksuoti. Tai dideliu skirtumu tiksliausias iki šiol atliktas BAO matavimas.

DESI sumontuotas ant Nicholas U. Mayall 4 metrų teleskopo Kitt Peak observatorijoje Arizonoje. Tūkstančiai optinių skaidulų perduoda šviesą į spektrografus, paversdami dangaus objektų padėtis milijonų galaktikų ir kvazarų spektrais bei raudonaisiais poslinkiais.

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

Kas yra DESI?

Dark Energy Spectroscopic Instrument yra spektrografas ant Nicholas U. Mayall 4 metrų teleskopo Kitt Peak observatorijoje. Jis tamsiosios energijos tiesiogiai nemato – ji neskleidžia šviesos. Vietoj to prietaisas vienu metu registruoja maždaug 5000 galaktikų ir kvazarų spektrus, iš ištemptos šviesos nustato jų raudonąjį poslinkį ir sudaro trimačius milijonų objektų žemėlapius. Tamsioji energija išvedama iš to, kaip šiuose žemėlapiuose matyti Visatos plėtimosi kitimas laike. Visą grandinę – nuo robotinių skaidulų iki akustinės liniuotės – rasite vadove Kaip veikia DESI.

Plačiausiai pasklidusi antraštė skelbė, kad tamsioji energija galbūt nėra konstanta – kad nežinomas Visatos plėtimąsi greitinantis komponentas laikui bėgant gali *silpnėti*, taip įskeldamas standartinį kosmologinį modelį. Šis teiginys nėra išgalvotas, bet jį lengva perskaityti per stipriai. Tikslesnė ir įdomesnė versija tokia: pati DESI liniuotė, vertinama viena, sutampa su paprasčiausiu standartiniu modeliu. Užuomina į kažką naujo atsiranda tik sujungus DESI su kitais duomenimis, o jos stiprumas priklauso nuo to, kokius kitus duomenis pasirenkame.

Vien DESI BAO matavimai dera su pastovia tamsiąja energija – kosmologine konstanta. Pirmenybė *kintančiai* tamsiajai energijai atsiranda tik DESI sujungus su kosminiu mikrobangų fonu ir supernovų rinkiniu, o jos stiprumas kinta priklausomai nuo pasirinkto supernovų katalogo.

Standartinė liniuotė ir du būdai leisti tamsiajai energijai kisti

BAO skalė yra *standartinė liniuotė*: ankstyvosios Visatos fizika leidžia žinoti jos tikrąjį ilgį, todėl palyginus tikrą ilgį su regimuoju dydžiu tam tikru atstumu galima nustatyti, kiek iki to laiko Visata buvo išsiplėtusi. Matuojama įvairiais atstumais ši liniuotė atkuria visą plėtimosi istoriją – būtent ją veikia tamsioji energija.

Standartiniame ΛCDM modelyje tamsioji energija yra *kosmologinė konstanta*: nekintantis tuščios erdvės energijos tankis. Jos elgesį fizikai aprašo būsenos lygties parametru w; tikrai kosmologinei konstantai w visada ir visur lygus -1.

Šią prielaidą galima sušvelninti dviem būdais. Paprastesnis – leisti w būti kita, bet laike nekintančia konstanta: tai wCDM. Turtingesnis – leisti w keistis Visatai plečiantis ir aprašyti jį dviem skaičiais: w_0, dabartine verte, ir w_a, kitimo sparta. Šis w_0w_aCDM modelis tampa ΛCDM viename taške: $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Čia „kintanti tamsioji energija“ reiškia pirmenybę $w_0 > -1$ ir $w_a < 0$: praeityje tamsioji energija būtų veikusi stipriau atstumiančiai, o dabar jos poveikis silpnėtų.

Ką padarė autoriai

- Išmatavo BAO skalę pirmaisiais DESI metais – galaktikose, kvazaruose ir Lyman-alfa miške – naudodami daugiau kaip šešis milijonus objektų septyniuose intervaluose $0.1 < z < 4.2$.
- Analizę atliko **aklai**, slėpdami kosmologinį rezultatą, kol metodika buvo galutinai nustatyta, kad sumažintų patvirtinimo šališkumo riziką.

- Pirmiausia DESI BAO duomenims priderino plokščią standartinį ΛCDM modelį, vėliau sujungė juos su Didžiojo sprogimo nukleosintezės apribojimu bei Planck ir ACT kosminio mikrobangų fono (CMB) duomenimis.
- Modelį išplėtė dviem būdais: pastoviu, bet nebūtinai -1 tamsiosios energijos w (wCDM) ir laike kintančiu $w_0 w_a$ ($\mathrm{w_0 w_a}$CDM).
- Kintantį modelį tikrino DESI+CMB duomenis paeiliui jungdami su trimis skirtingais Ia tipo supernovų rinkiniais – Pantheon+, Union3 ir DES-SN5YR, o ne pasirinkdami tik vieną.
- Nustatė neutrino masių sumos ribas ir patikrino, kaip jos keičiasi, jei tamsiosios energijos fonui leidžiama nukrypti nuo ΛCDM.

Ką jie nustatė

- **Vien DESI BAO duomenys dera su standartiniu modeliu.** Jie duoda medžiagos tankį $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, o leidus tamsiajai energijai turėti pastovų w – $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$, praktiškai ties kosmologinės konstantos verte -1.
- Sujungus su CMB ir jo gravitaciniu lęšiavimu, DESI duoda $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ ir Hablo konstantą $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62, kai naudojama nukleosintezė ir CMB akustinė skalė).
- **Laike kintančiame modelyje duomenų kombinacijos teikia pirmenybę kintančiai tamsiajai energijai** – $w_0 > -1$ ir $w_a < 0$. DESI+CMB atveju nukrypimas yra 2.6σ; pridėjus supernovas – 2.5σ, 3.5σ arba 3.9σ atitinkamai Pantheon+, Union3 ir DES-SN5YR rinkiniams. Sigma čia nusako nuotolį nuo standartinio modelio lūkesčio; fizikoje atradimui paprastai reikalaujama 5σ, o net ir tai savaime neįrodo konkrečios interpretacijos (vadovas).
- Palikus neutrino masių sumą laisvą, DESI+CMB nustato griežtą viršutinę ribą – mažiau kaip 0.072 eV (95% pasikliautinasis lygis), tačiau straipsnyje aiškiai pabrėžiama, kad leidus tamsiosios energijos fonui nukrypti nuo ΛCDM ši riba gerokai susilpnėja.

Ko tai neįrodo

- Tai **nerodo, kad tamsioji energija tikrai kinta**. Pati DESI liniuotė dera su kosmologine konstanta; evoliucijos užuomina atsiranda tik *kombinuotuose* priderinimuose ir tik turtingesniame dviejų parametrų modelyje.
- Tai **nereiškia, kad „ΛCDM mirė“ ar „Einsteinas klydo“**. Didžiausias skaičius, 3.9σ, nesiekia 5σ ribos, kurią fizikai paprastai taiko atradimui; vien DESI standartinis modelis vis dar aprašo gerai.
- Rezultatas **priklauso nuo duomenų rinkinio**. Pakeitus supernovų katalogą reikšmingumas keičiasi nuo 2.5σ iki 3.9σ – daugiau nei visa sigma. Signalas, kurio dydis taip priklauso nuo prijungto išorinio duomenų rinkinio, yra verta tirti užuomina, ne rezultatas, kurį jau galima laikyti galutiniu.
- Vien DESI polinkį į $w_0 > -1$ **iš dalies lemia vienas anomalus taškas** – $z = 0.51$ galaktikų intervalas, kuris šiek tiek aukštesnis nei tikisi ΛCDM. Tačiau straipsnis šią vietą patikrino tinkamai: tašką traktuoja kaip statistinį svyravimą ir rodo, kad pakeitus *visus* DESI mažo raudonojo poslinkio

($z < 0.6$) matavimus senesniais SDSS duomenimis tamsiosios energijos rezultatas nesikeičia. Neįprastas taškas traukia vien DESI rezultatą, bet **nepalaiko visos kombinuotos užuominos**.
- Neutrino masės riba **nėra nuo modelio nepriklausoma išvada**. Ji labai griežta tik laikant foninį plėtimąsi ΛCDM; sušvelninus šią prielaidą sušvelnėja ir riba.

Kiek tvirti yra įrodymai

- **Kaip atstumų matavimas – labai stiprūs.** BAO liniuotė yra vienas švariausių kosmologijos įrankių, DESI matavimas tiksliausias iki šiol, o akla analizė yra būtent tokia apsauga, kurios norisi siekiant neįskaityti į duomenis laukiamo atsakymo.
- **Kaip teiginys apie tamsiąją energiją – tikrai įdomūs, bet ne lemiami.** 2.6σ pirmenybė iš DESI+CMB, kylanti iki 3.9σ su labiausiai ribojančiu supernovų rinkiniu, yra rezultatas, vertas daugiau stebėjimų, ne teorijos nuvertimo. Pagrindinė atsargumo priežastis – skirtumas tarp supernovų rinkinių. Autoriai taip pat patikrino, kad vienas anomalus BAO taškas nėra pagrindinis signalo šaltinis.
- Pats straipsnis atsargus: pateikia reikšmingumą su visais trimis supernovų rinkiniais, o ne tik didžiausią skaičių, ir pažymi neutrino rezultato priklausomybę nuo modelio. Perdėjimas dažniau atsiranda perpasakojant, ne pačiame darbe.

Kodėl tai svarbu

Ketvirtį amžiaus „tamsioji energija“ ir „kosmologinė konstanta“ beveik vartotos kaip sinonimai, nes visi matavimai derėjo su $w = -1$. DESI yra pirmasis pakankamai tikslus duomenų rinkinys, kuris kartu su kitais gali rimtai paklausti, ar ši -1 vertė laikui bėgant slenka, ir gauti atsakymą, kuris nėra paprastas „ne“. Tai tikras pokytis, ką duomenys apskritai leidžia tirti.

Tačiau tas pats tikslumas parodo ir užuominos sąlygiškumą: vienose duomenų kombinacijose ji matoma, kitose silpnesnė, o ypač priklauso nuo su DESI naudojamo supernovų katalogo. Tinkama laikysena nėra nei numojimas ranka, nei per anksti paskelbta revoliucija. Reikia žiūrėti į kitus, didesnius DESI duomenų leidimus – DR2 jau paskelbtas 2025 m. – bei nepriklausomas supernovų imtis ir tikrinti, ar tendencija stiprėja, ar išnyksta. Taip kosmologijoje atrodo tikras „galbūt“ – ir jį verta vadinti būtent taip.

Trumpa santrauka

DESI iš daugiau kaip šešių milijonų objektų išmatavo Visatos plėtimosi istoriją tiksliausia iki šiol barioninių akustinių osciliacijų liniuote. Vien šis matavimas dera su standartiniu modeliu, kuriame tamsioji energija yra konstanta. Sujungus DESI su kosminiu mikrobangų fonu ir supernovų rinkiniu atsiranda pirmenybė laike kintančiai tamsiajai energijai – nuo 2.6σ iki 3.9σ, priklausomai nuo nau-

dojamų supernovų. Tai reali ir įdomi užuomina, ne atradimas: ji nesiekia fizikoje įprastos atradimo ribos ir kinta su pasirinktu supernovų duomenų rinkiniu. Tamsioji energija gali kisti. DESI pavertė šį klausimą pakankamai tiksliu, kad jį būtų verta rimtai užduoti – bet dar neatsakė.

Šaltiniai

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