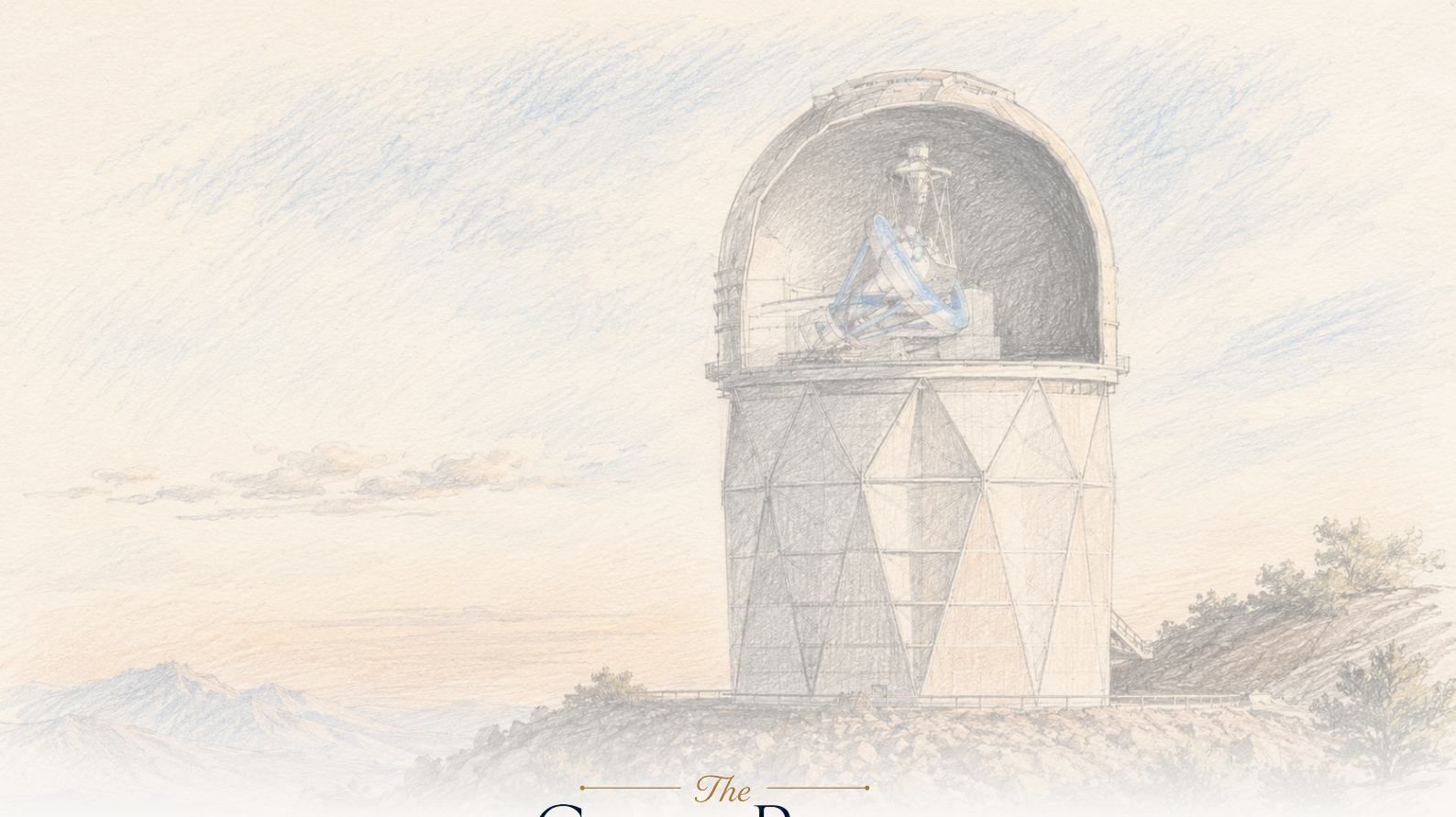

The Clean Paper

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

DESI-ի ամենասուր cosmic ruler-ը և dark energy-ի մասին զգուշավոր «գուցե»-ն

DESI-ն վեց միլիոն օբյեկտից չափել է Տիեզերքի expansion history-ն՝ մինչ այժմ կառուցված ամենաճշգրիտ baryon-acoustic ruler-ով: Ինքնուրույն այդ ruler-ը համաձայն է ստանդարտ մոդելի հետ, որտեղ dark energy-ն հաստատուն է: Միայն DESI-ն cosmic microwave background-ի և supernova sample-ի հետ համադրելիս է հայտնվում evolving dark energy-ի նախընտրություն՝ 2.6σ-ից մինչև 3.9σ, կախված ավելացված supernova sample-ից, discovery threshold-ից ցածր և զգայուն տվյալների համադրության նկատմամբ: Իրական հարց, որը հիմա կարելի է ճշգրիտ տալ, ոչ արդեն ստացված պատասխան:

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

Ձայնից պատրաստված քանոն

Վաղ Տիեզերքում, դեռ աստղերի առաջացումից առաջ, սովորական նյութից և լույսից կազմված տաք պլազման «զնգում» էր: Ճնշման ալիքները դրա միջով անցնում էին լույսի արագության կեսից ավելի արագությամբ, մինչև Տիեզերքը բավական սառեց, որ ատոմներ ձևավորվեն, իսկ այդ զնգոցը դադարեց՝ նյութի բաշխման մեջ սառեցնելով մի թույլ նախընտրելի հեռավորություն: Այսօր այդ հեռավորությունը՝ *sound horizon*-ը, մոտ 150 megaparsec է՝ մոտ 490 միլիոն լուսատարի, և երևում է որպես այդ հեռավորությամբ իրարից բաժանված գալակտիկաների փոքր ավելցուկ՝ բոլոր ուղղություններով և տարբեր epoch-ներում: Կոսմոլոգները դա անվանում են baryon ակուստիկ oscillation կամ BAO և օգտագործում որպես ստանդարտ չափաքանոն. տարբեր հեռավորությունների վրա չափելով, թե այդ «սառեցված» սանդղակը երկնքում որքան մեծ է թվում, կարելի է քարտեզագրել Տիեզերքի ընդարձակման արագությունը նրա պատմության ընթացքում:

Dark Energy սպեկտրադիտական Instrument-ը՝ DESI-ն, կառուցվել է այդ քանոնը բոլորից ճշգրիտ չափելու համար: Առաջին տվյալներ թողարկումը BAO սանդղակը քարտեզագրում է գալակտիկաների, քվազարների և հեռավոր գազային ամպերի Lyman-alpha անտառ-ի միջոցով՝ ավելի քան վեց միլիոն օբյեկտ, յոթ կարմիր շեղում միջակայքում՝ 0.1-ից մինչև 4.2: Մարդկային սպասումը արդյունքից հեռու պահելու համար թիմը վերլուծությունը կատարել է *կույր*՝ տիեզերաբանական պատասխանը թաքցնելով նույնիսկ իրենցից, մինչև մեթոդները վերջնականապես ֆիքսվել են: Սա մեծ տարբերությամբ երբևէ արված ամենաճշգրիտ BAO չափումն է:

DESI-ն տեղադրված է Arizona-ի Kitt Peak-ում գտնվող Nicholas U. Mayall 4-metre աստղադիտակի վրա: Գործիքը հազարավոր optical fibre-ներ է ուղարկում spectrograph-ների մեջ՝ երկնքի դիրքերը վերածելով միլիոնավոր գալակտիկաների և քվազարների սպեկտրերի ու կարմիր շեղումների:

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

Ի՞նչ է DESI-ն

Dark Energy սպեկտրադիտական Instrument-ը spectrograph է Arizona-ի Kitt Peak-ում գտնվող Nicholas U. Mayall 4-metre աստղադիտակի վրա: Այն մութ էներգիան ուղղակիորեն չի «տեսնում». ոչ մի գործիք դա չի կարող, որովհետև մութ էներգիան լույս չի արձակում: Փոխարենը DESI-ն միաժամանակ գրանցում է մոտ 5,000 գալակտիկաների ու քվազարների սպեկտրերը, յուրաքանչյուր օբյեկտի կարմիր շեղումը կարդում է այն բանից, թե ընդարձակվող Տիեզերքը որքան է ձգել նրա լույսը, և կառուցում դրանցից միլիոնավորների եռաչափ քարտեզ: Dark էներգիան հետո եզրակացվում է այն բանից, թե քարտեզը ինչպես է ցույց տալիս տիեզերական expansion-ի փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում: Ռոբոտացված fibre-ներից մինչև ակուստիկ չափաքանոն ամբողջ շղթայի համար տես How DESI works:

Արդյունքից տարածված վերնագիրը այն էր, որ մութ էներգիան գուցե հաստատուն չէ՝ Տիեզերքի ընդարձակումը արագացնող խորհրդավոր բաղադրիչը ժամանակի ընթացքում կարող է *թուլանալ*՝ ճաքեցնելով ստանդարտ կոսմոլոգիական մոդելը: Այդ պնդումը հորինված չէ, բայց հեշտ է չափազանց կարդալ: Ազնիվ տարբերակը ավելի կոնկրետ է և ավելի հետաքրքիր. DESI-ի սեփական տիեզերական չափաքանոնը **միայնակ վերցրած** համաձայն է սովորական մոդելի հետ: Նոր ֆիզիկայի հուշումը հայտնվում է միայն DESI-ն այլ տվյալների հետ միացնելիս, և հուշման ուժը կախված է նրանից, թե հատկապես որ տվյալներն եք ավելացնում:

DESI-ի baryon-ակուստիկ չափաքանոնը ինքնուրույն համատեղելի է հաստատուն մութ էներգիայի՝ տիեզերաբանական հաստատունի հետ: *Փոփոխվող* մութ էներգիայի նախընտրությունը ի հայտ է գալիս միայն DESI-ն տիեզերական microwave ֆոնայինի և գերնոր աստղ նմուշի հետ համադրելու դեպքում, իսկ ուժգնությունը փոխվում է օգտագործվող գերնոր աստղ նմուշից կախված:

Standard ruler-ը և մութ էներգիայի փոփոխության երկու ձևը

BAO սանդղակը *ստանդարտ չափաքանոն* է. վաղ Տիեզերքի ֆիզիկայից գիտենք դրա իրական երկարությունը, ուստի տվյալ հեռավորության վրա դրա իրական երկարությունը apparent չափի հետ համեմատելը ասում է, թե մինչև այդ պահը Տիեզերքը որքան էր ընդարձակվել: Շատ հեռավորությունների վրա չափելով՝ նույն չափաքանոնը գծում է ընդարձակման ամբողջ պատմությունը՝ հենց այն, ինչի վրա մութ էներգիան ազդում է:
Ստանդարտ ΛCDM մոդելում մութ էներգիան *տիեզերաբանական*

> *հաստատուն* է՝ դատարկ տարածության հաստատուն էներգիա density, որը ժամանակի ընթացքում չի փոխվում: Նրա վարքը նկարագրվում է w «վիճակի հավասարում» պարամետրով, որն իսկական տիեզերաբանական հաստատունի համար ամենուր և միշտ ճիշտ -1 է:
> Սա ստուգելու համար կարելի է սահմանափակումը երկու ձևով թուլացնել: Ավելի պարզ տարբերակում w-ին թույլ են տալիս լինել ուրիշ հաստատուն արժեք՝ դեռ անփոփոխ ժամանակի ընթացքում: Սա wCDM-ն է: Ավելի հարուստ տարբերակում w-ն փոխվում է Տիեզերքի ընդարձակման հետ և նկարագրվում երկու թվով՝ w_0՝ այսօրվա արժեքը, և w_a՝ փոփոխության արագությունը: Այս $\mathrm{w_0w_aCDM}$ մոդելը վերածվում է ΛCDM-ի միայն $w_0 = -1,\ w_a = 0$ կետում: Այստեղ «evolving մութ էներգիա» ասելով նկատի ունեն $w_0 > -1$ և $w_a < 0$ նախընտրությունը՝ մութ էներգիա, որը անցյալում ավելի repulsive է եղել և այժմ թուլանում է:

Ինչ արեցին հեղինակները

- Չափեցին BAO սանդղակը DESI-ի առաջին տարվա տվյալներով՝ գալակտիկաներ, քվազարներ և Lyman-alpha անտառ, ավելի քան վեց միլիոն օբյեկտ՝ $0.1 < z < 4.2$ ընդգրկող յոթ կարմիր շեղում միջակայքում:
- Վերլուծությունը կատարել են **կույր**՝ տիեզերաբանական պատասխանը թաքցնելով մինչև մեթոդաբանությունը ֆիքսվելը, confirmation bias-ի վտանգը նվազեցնելու համար:
- DESI BAO տվյալներին առանձին համապատասխանեցվել է ստանդարտ հարթ ΛCDM մոդելը, ապա դրանք համադրվել են Մեծ պայթյունի նուկլեոսինթեզի նախնական սահմանափակման և Planck ու ACT տիեզերական միկրոալիքային ֆոնի (CMB) տվյալների հետ:
- Մոդելը ընդլայնել են երկու ձևով՝ հաստատուն մութէներգիա w (wCDM) և ժամանակով փոփոխվող $w_0 w_a$ ($\mathrm{w_0w_aCDM}$):
- Ժամանակի հետ փոփոխվող մոդելը փորձարկվել է՝ DESI+CMB-ը հերթով համադրելով Ia տիպի գերնորերի երեք տարբեր հավաքածուների՝ Pantheon+, Union3 և DES-SN5YR-ի հետ, ոչ թե ընտրելով միայն մեկը:
- Սահմանափակումներ են դրել neutrino-ների ընդհանուր զանգվածի վրա և ստուգել, թե այդ սահմանները ինչպես են փոխվում, երբ մութէներգիա ֆոնայինին թույլ է տրվում շեղվել ΛCDM-ից:

Ինչ գտան

- **DESI BAO-ն ինքնուրույն համատեղելի է ստանդարտ մոդելի հետ**: Այն տալիս է matter density $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, իսկ մութ էներգիային հաստատուն w թույլ տալու դեպքում՝ $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$, գրեթե հենց տիեզերաբանականհաստատուն-

ի -1 արժեքի վրա:

- CMB-ի և դրա գրավիտացիոն ոսպնյակավորման հետ համադրելով՝ DESI-ն տալիս է $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ և Հաբլի հաստատուն $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62, երբ համադրվում է նուկլեոսինթեզի և CMB-ի ակուստիկ սանդղակի հետ):
- **Time-varying մոդելում համակցված տվյալները նախընտրում են evolving մութ էներգիա**՝ $w_0 > -1$ և $w_a < 0$: Նախընտրությունը DESI+CMB-ի համար 2.6σ է, իսկ գերնոր աստղ նմուշ ավելացնելիս դառնում է համապատասխանաբար 2.5σ, 3.5σ կամ 3.9σ՝ Pantheon+, Union3 կամ DES-SN5YR-ի համար (սիգման չափում է, թե արդյունքը ստանդարտ մոդելի սպասումից որքան հեռու է. 5σ-ն սովորական հայտնաբերում շեմն է, և նույնիսկ դա չի նշանակում, թե մեկնաբանությունն ինքնաբերաբար ճիշտ է՝ ուղեցույց):
- Եթե neutrino-ների ընդհանուր զանգվածը ազատ պարամետր է, ստացվում է խիստ սահման՝ DESI+CMB-ի համար 0.072 eV-ից ցածր (95% վստահություն), բայց հոդվածը բացահայտ նշում է, որ եթե մութէներգիա ֆոնայինին թույլ տրվի շեղվել ΛCDM-ից, այդ սահմանը զգալիորեն թուլանում է:

Ինչ սա չի ապացուցում

- Սա **չի ցույց տալիս, որ մութ էներգիան հաստատ փոփոխվում է**: DESI-ի սեփական չափաքանոնը համատեղելի է տիեզերաբանական հաստատունի հետ. փոփոխության հուշումը հայտնվում է միայն *համակցված* համապատասխանեցումներում և միայն ավելի հարուստ երկպարամետրանոց մոդելում:
- Սա **չի նշանակում «ΛCDM-ը մեռավ» կամ «Էյնշտեյնը սխալ էր»**: Ամենաուժեղ 3.9σ թիվը ցածր է 5σ convention-ից, որը ֆիզիկոսները սովորաբար պահանջում են հայտնաբերում կոչելուց առաջ, իսկ DESI-ն ինքնուրույն լավ համապատասխանեցում է ստանում ստանդարտ մոդելով:
- Արդյունքը **նմուշանկախ չէ**: գերնոր աստղ compilation-ը փոխելիս նշանակալիությունը շարժվում է 2.5σ-ից մինչև 3.9σ՝ մեկ ամբողջ սիգմայից ավելի: Ազդանշանը, որի չափը այսքան կախված է արտաքին տվյալների հավաքածուի ընտրությունից, հետապնդելու արժանի հուշում է, ոչ «բանկ դնելու» չափում:
- DESI-*alone* $w_0 > -1$ թեքումը **մասամբ կապված է մեկ anomalous կետի հետ**՝ կարմիր շեղում-0.51 գալակտիկա միջակայքը ΛCDM-ի նկատմամբ մի քիչ բարձր է: Բայց այստեղ հոդվածը հենց այն ստուգումն է անում, որ պետք է. այն կետը վերաբերվում է որպես վիճակագրական fluctuation և ցույց է տալիս, որ DESI-ի բոլոր ցածրկարմիր շեղում ($z < 0.6$) չափումները ավելի հին SDSS չափումներով փոխարինելու դեպքում մութէներգիա արդյունքը չի փոխվում: Տարօրինակ կետը DESI alone համապատասխանեցումը մի քիչ քաշում է, բայց միավորված հուշումը **չի պահում իր վրա**: Այս վերապահումը հակառակ ուղղությամբ է աշխատում, քան երբեմն ներկայացվում է. արդյունքը stress-թեստ է անցել իր ամենաանոմալ կետի նկատմամբ և պահպանվել է:
- Neutrino mass սահմանը **մոդելանկախ verdict չէ**: Այն խիստ է միայն այն ժամանակ, երբ ֆոնային expansion-ը պահվում է ΛCDM-ում. այդ սահմանափակումը թուլացնելիս neutrino mass սահմանն էլ է թուլանում:

Որքանո՞վ է ուժեղ ապացույցը

- **Շատ ուժեղ՝ որպես հեռավորություն չափում**: BAO չափաքանոնը կոսմոլոգիայի ամենամաքուր գործիքներից է, DESI-ի չափումը ամենաճշգրիտն է մինչ այժմ, իսկ կույր վերլուծությունը ճիշտ պաշտպանությունն է՝ տվյալների մեջ սպասված պատասխանը «տեսնելու» վտանգից:
- **Իրապես հետաքրքիր, բայց ոչ վճռական՝ որպես մութէներգիա պնդում**: DESI+CMB-ից 2.6σ, իսկ ամենասեղմ գերնոր աստղ set-ի հետ մինչև 3.9σ նախընտրությունը այն արդյունքն է, որի համար արժե ավելի շատ աստղադիտակ ժամանակ ծախսել, ոչ մոդել տապալել: Զգուշության ազնիվ պատճառը գերնոր աստղ նմուշների միջև տարբերությունն է: Հեղինակների օգտին պետք է նշել նաև, որ նրանք ստուգել են՝ իրենց ամենաանոմալ BAO կետը արդյունքը չի առաջացնում՝ ճիշտ այն homework-ը, որը նման պնդումը պահանջում է:
- Հոդվածն ինքն իր նկատմամբ զգույշ է. նշանակալիությունը հայտնում է երեք տարբեր նմուշով, ոչ միայն ամենամեծ թիվը, և նշում neutrino արդյունքի մոդել dependence-ը: Եթե ինչոր տեղ չափազանցված պնդման կա, հիմնականում retelling-ում է, ոչ հոդվածում:

Ինչու է սա կարևոր

Քառորդ դար շարունակ «մութ էներգիա» և «տիեզերաբանական հաստատուն» արտահայտությունները գրեթե փոխարինել են մեկը մյուսին, որովհետև բոլոր չափումները համատեղելի էին ճիշտ w արժեքի հետ: DESI-ն առաջին տվյալների հավաքածուն է, որն այնքան ճշգրիտ է, որ ուրիշ տվյալների հետ համադրվելիս կարող է նույնիսկ *հարցնել՝* արդյոք այդ -1-ը ժամանակի հետ շարժվո՞ւմ է, և ստանալ «ոչ»-ից ավելի հետաքրքիր պատասխան: Սա իրական փոփոխություն է տվյալների կարողության մեջ, ու հենց դրա համար արդյունքը կարևոր է: Բայց նույն ճշգրտությունը նաև ցույց է տալիս, թե հուշումը որքան պայմանական է՝ կենդանի որոշ տվյալների հավաքածու combination-ներում, հանգիստ ուրիշներում և հատկապես զգայուն այն բանի նկատմամբ, թե որ գերնոր աստղ catalogue-ն է միացված DESI-ին: Ճիշտ դիրքորոշումը ոչ անտեսումն է, ոչ շուտ հայտարարված հեղափոխությունը: Պետք է նայել DESI-ի հաջորդ՝ ավելի մեծ թողարկմանն՝ **DR2-ին, որը արդեն հրապարակվել է 2025-ին**, և անկախ գերնոր աստղ նմուշներին ու տեսնել՝ drift-ը ամրանո՞ւմ է, թե մարում: Կոսմոլոգիայում իրական «գուցե»-ն հենց այսպես է տեսք ունենում, և արժե այն որպես «գուցե» հաղորդել:

Կարճ ամփոփում

DESI-ն վեց միլիոն օբյեկտից չափել է Տիեզերքի expansion պատմությունն՝ մինչ այժմ կառուցված ամենաճշգրիտ baryon-ակուստիկ չափաքանոնով: Ինքնուրույն

այդ չափաքանոնը համաձայն է ստանդարտ մոդելի հետ, որտեղ մութ էներգիան հաստատուն է: Երբ DESI-ն համադրվում է տիեզերական microwave ֆոնայինի և գերնոր աստղ նմուշի հետ, հայտնվում է ժամանակով փոփոխվող մութ էներգիայի նախընտրություն՝ 2.6σ-ից մինչև 3.9σ, կախված նրանից, թե որ գերնոր աստղներն են ավելացվում: Սա իրական և հետաքրքիր հուշում է, ոչ հայտնաբերում. այն ցածր է ֆիզիկոսների պահանջած շեմից և զգայուն է տվյալների հավաքածուի ընտրության նկատմամբ: Dark էներգիան գուցե զարգանում է ժամանակի հետ: DESI-ն այդ հարցը դարձրել է ճշգրիտ տալու արժանի՝ դեռ ոչ պատասխանված:

Աղբյուրներ

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