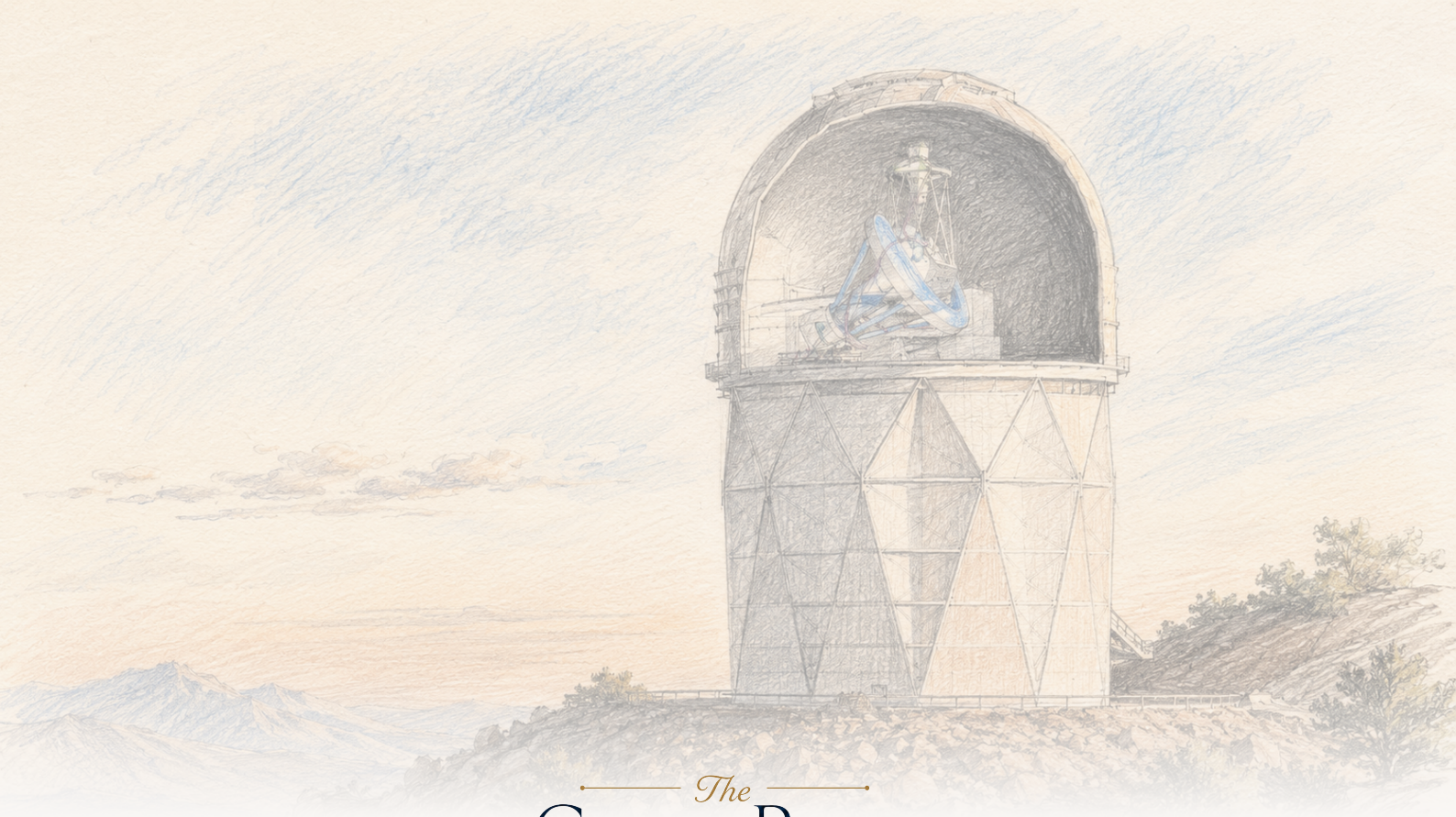

The Clean Paper

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

DESI-ს ყველაზე ზუსტი კოსმოსური სახაზავი — და ფრთხილი „შესაძლოა“ ბნელ ენერგიაზე

DESI-მ ექვსი მილიონი ობიექტით სამყაროს გაფართოების ისტორია აქამდე ყველაზე ზუსტი ბარიონულ-აკუსტიკური სახაზავით გაზომა. ცალკე აღებული ეს სახაზავი ეთანხმება სტანდარტულ მოდელს, სადაც ბნელი ენერგია მუდმივაა. მხოლოდ DESI-ს კოსმოსურ მიკროტალღურ ფონსა და ზეახალი ვარსკვლავების ნიმუშთან გაერთიანებისას ჩნდება ევოლუცირებადი ბნელი ენერგიის უპირატესობა — 2.6σ-დან 3.9σ-მდე იმის მიხედვით, რომელი ზეახალი ვარსკვლავები ემატება; ეს აღმოჩენის ზღვარს ქვემოთაა და მონაცემთა კომბინაციაზე მგრძნობიარე. ზუსტად დასმული რეალური კითხვა — ჯერ არა პასუხი.

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

ბგერით შექმნილი სახაზავი

ადრეულ სამყაროში, ვარსკვლავების გაჩენამდე, ჩვეულებრივი მატერიისა და სინათლის ცხელი პლაზმა „ჟღერდა“. წნევის ტალღები მასში სინათლის სიჩქარის ნახევარზე მეტი სიჩქარით ვრცელდებოდა, სანამ სამყარო საკმარისად არ გაცივდა ატომების წარმოსაქმნელად და ეს რხევა არ შეწყდა — მატერიის განაწილებაში სუსტად გამორჩეული სასურველი მანძილი „გაყინა“. ეს მანძილი, *ბგერის ჰორიზონტი*, დღეს დაახლოებით 150 მეგაპარსეკია (დაახლოებით 490 მილიონი სინათლის წელი) და ჩანს როგორც ასეთი დაშორებით მყოფი გალაქტიკების მცირე სიჭარბე — ყველა მიმართულებასა და სხვადასხვა ეპოქაში. კოსმოლოგები მას ბარიონულ აკუსტიკურ რხევას, ანუ BAO-ს უწოდებენ და სტანდარტულ სახაზავად იყენებენ: თუ სხვადასხვა მანძილზე ამ გაყინული მასშტაბის ხილულ ზომას გაზომავთ, შეგიძლიათ სამყაროს გაფართოების სიჩქარე მის მთელ ისტორიაში აღადგინოთ.

Dark ენერგია Spectroscopic Instrument (DESI) სწორედ ამ სახაზავის უპრეცედენტო სიზუსტით გასაზომად შეიქმნა. მისი პირველი მონაცემთა გამოშვება BAO მასშტაბს გალაქტიკებში, კვაზარებსა და შორეული გაზის ღრუბლების Lyman-alpha forest-ში ზომავს — ექვს მილიონზე მეტ ობიექტში, რომელიც redshift 0.1-დან 4.2-მდე შვიდ ბინადაა გაყოფილი. ადამიანური მოლოდინის შედეგზე გავლენის შესამცირებლად გუნდმა ანალიზი *ბრმად* ჩაატარა: კოსმოლოგიური პასუხი საკუთარი თავისგან დამალა, სანამ მეთოდები საბოლოოდ არ დააფიქსირა. დიდი სხვაობით, ეს BAO-ს ყველაზე ზუსტი გაზომვაა აქამდე.

DESI დამონტაჟებულია არიზონაში, Kitt Peak-ზე მდებარე Nicholas U. Mayall-ის 4-მეტრიან ტელესკოპზე. ინსტრუმენტი ათასობით ოპტიკურ ბოჭკოს სპექტროგრაფებში გზავნის და ცაზე ობიექტების მდებარეობას მილიონობით გალაქტიკისა და კვაზარის სპექტრებად და წითელ წანაცვლებად გარდაქმნის.

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

რა არის DESI

Dark ენერგია Spectroscopic Instrument არის სპექტროგრაფი Nicholas U. Mayall-ის 4-მეტრიან ტელესკოპზე, Kitt Peak-ზე, არიზონაში. ის ბნელ ენერგიას პირდაპირ არ ხედავს — ამას ვერაფერი შეძლებს, რადგან ბნელი ენერგია სინათლეს არ ასხივებს. სამაგიეროდ, ერთდროულად დაახლოებით 5,000 გალაქტიკისა და კვაზარის სპექტრს იწერს, თითოეული ობიექტის redshift-ს განსაზღვრავს იმით, რამდენად გაწელა მისი სინათლე სამყაროს გაფართოებამ, და მილიონობით ობიექტის სამგანზომილებიან რუკას ქმნის. ბნელი ენერგია შემდეგ იმით გამოითვლება, როგორ აჩვენებს ეს რუკა კოსმოსური გაფართოების დროში ცვლილებას. სრული ჯაჭვისთვის — რობოტული ბოჭკოებიდან აკუსტიკურ სახაზავამდე — იხილეთ როგორ მუშაობს DESI.

ყველაზე მეტად გავრცელებული სათაური იყო, რომ ბნელი ენერგია შესაძლოა მუდმივი არ იყოს — სამყაროს აჩქარებულ გაფართოებაზე პასუხისმგებელი იდუმალი რამ დროთა განმავლობაში შეიძლება *სუსტდებოდეს* და სტანდარტულ კოსმოლოგიურ მოდელს ბზარს უჩენდეს. ეს მტკიცება გამოგონილი არ არის, მაგრამ მისი ზედმეტად ფართოდ წაკითხვა მარტივია. ზუსტი ვერსია უფრო კონკრეტული და უფრო საინტერესოა: DESI-ს საკუთარი სახაზავი, **ცალკე აღებული**, ჩვეულებრივ სტანდარტულ მოდელს ეთანხმება. ახალი ფიზიკის მინიშნება მხოლოდ მაშინ ჩნდება, როცა DESI სხვა მონაცემებს უერთდება — და მინიშნების სიძლიერე დამოკიდებულია იმაზე, **რომელ** სხვა მონაცემებს აირჩევთ.

DESI-ს ბარიონულ-აკუსტიკური სახაზავი თავისთავად თავსებადია მუდმივ ბნელ ენერგიასთან (კოსმოლოგიურ მუდმივასთან). *ევოლუცირებადი* ბნელი ენერგიის უპირატესობა მხოლოდ მაშინ ჩნდება, როცა DESI კოსმოსურ მიკროტალღურ ფონსა და ზეახალი ვარსკვლავების ნიმუშს ერწყმის — და სიძლიერე იცვლება იმის მიხედვით, რომელი ზეახალი ვარსკვლავების ნაკრებია გამოყენებული.

სტანდარტული სახაზავი და ორი გზა, რომლითაც ბნელი ენერგია შეიძლება იცვლებოდეს

BAO მასშტაბი *სტანდარტული სახაზავია*: რადგან ადრეული სამყაროს ფიზიკიდან მისი ნამდვილი სიგრძე ვიცით, ამ სიგრძის მოცემულ მანძილზე ხილულ ზომასთან შედარება გვიჩვენებს, იმ დროისთვის რამდენად იყო სამყარო გაფართოებული. მრავალი მანძილის გაზომვით სახაზავი მთლიან გაფართოების ისტორიას აღადგენს — სწორედ იმას, რასაც ბნელი ენერგია მართავს.
სტანდარტულ მოდელში, რომელსაც ΛCDM ეწოდება, ბნელი ენერგია

კოსმოლოგიური მუდმივაა: ცარიელი სივრცის მუდმივი ენერგეტიკული სიმკვრივე, რომელიც დროში არ იცვლება. ფიზიკოსები მის ქცევას „მდგომარეობის განტოლების“ პარამეტრით, w-თი აღწერენ; ნამდვილი კოსმოლოგიური მუდმივისთვის w ზუსტად -1-ია — ყველგან და ყოველთვის. ამის შესამოწმებლად შეზღუდვა ორი გზით შეიძლება მოვხსნათ. მარტივ მოდელში w შეიძლება იყოს სხვა, მაგრამ მაინც მუდმივი მნიშვნელობა — ესაა „wCDM“. უფრო მდიდარ მოდელში w სამყაროს გაფართოებასთან ერთად იცვლება და ორი რიცხვით აღიწერება: w_0, მისი დღევანდელი მნიშვნელობა, და w_a, ცვლილების სიჩქარე. ეს „$\mathrm{w_0w_aCDM}$“ მოდელი ΛCDM-მდე დადის ერთ კონკრეტულ წერტილში: $w_0 = -1,\ w_a = 0$. w_0-ის -1-ზე მეტი და w_a-ის უარყოფითი მნიშვნელობების უპირატესობა აქ „ევოლუცირებად ბნელ ენერგიას“ ნიშნავს: ბნელი ენერგია წარსულში უფრო ძლიერად აჩქარებდა გაფართოებას და დღეს შედარებით სუსტდება.

რა გააკეთეს ავტორებმა

- DESI-ს პირველი წლის მონაცემებიდან გაზომეს BAO მასშტაბი — გალაქტიკებით, კვაზარებითა და Lyman-alpha forest-ით — ექვს მილიონზე მეტ ობიექტში, redshift-ის შვიდ ბინში, $0.1 < z < 4.2$ დიაპაზონში.
- ანალიზი **ბრმად** ჩაატარეს: კოსმოლოგიური შედეგი დამალული იყო, სანამ მეთოდოლოგია არ დაფიქსირდა, რათა confirmation მიკერძოება შემცირებულიყო.
- DESI BAO-ს ცალკე მოარგეს სტანდარტული ბრტყელი ΛCDM მოდელი, შემდეგ კი ის big-bang nucleosynthesis-ის prior-სა და Planck/ACT-ის კოსმოსურ მიკროტალღურ ფონს (CMB) შეუთავსეს.
- მოდელი ორი გზით გააფართოვეს: მუდმივი ბნელი ენერგიის w (wCDM) და დროში ცვალებადი $w_0 w_a$ ($\mathrm{w_0w_aCDM}$).
- დროში ცვალებადი მოდელი DESI+CMB-ის სამ სხვადასხვა Type Ia ზეახალი ვარსკვლავების კომპილაციასთან — Pantheon+, Union3 და DES-SN5YR — ცალ-ცალკე შერწყმით გამოსცადეს, ნაცვლად იმისა, რომ ერთი აერჩიათ.
- დააწესეს ზღვარი ნეიტრინოების ჯამურ მასაზე და შეამოწმეს, როგორ იცვლება ეს ზღვარი, თუ ბნელი ენერგიის ფონურ გაფართოებას ΛCDM-დან გადახრის უფლება მიეცემა.

რა აღმოაჩინეს

- **DESI BAO ცალკე აღებული სტანდარტულ მოდელს ეთანხმება.** მიღებულია მატერიის სიმკვრივე $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ და, როცა ბნელ ენერგიას მუდმივი w-ის თავისუფლება ეძლევა, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — თითქმის ზუსტად კოსმოლოგიური მუდმივის -1 მნიშვნელობაზე.

- CMB-სა და მის ლინზირებასთან ერთად DESI იძლევა $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ და Hubble-ის მუდმივას $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (ან 68.52 ± 0.62, როცა ნუკლეოსინთეზსა და CMB-ის აკუსტიკურ მასშტაბთანაა გაერთიანებული).
- **დროში ცვალებად მოდელში მონაცემთა კომბინაციები ევოლუცირებად ბნელ ენერგიას ანიჭებს უპირატესობას** — $w_0 > -1$ და $w_a < 0$. DESI+CMB-ისთვის უპირატესობა 2.6σ-აა; ზეახალი ვარსკვლავების ნიმუშის დამატებისას კი Pantheon+, Union3 ან DES-SN5YR-ისთვის შესაბამისად 2.5σ, 3.5σ ან 3.9σ ხდება (sigma აჩვენებს, რამდენად შორსაა შედეგი სტანდარტული მოდელის მოლოდინიდან; აღმოჩენის ჩვეულებრივი ზღვარია 5σ, და ის თავისთავად არ ნიშნავს, რომ ინტერპრეტაცია სწორია — გაიდი).
- თავისუფლად შეფასებისას ნეიტრინოების ჯამური მასის ზღვარი ძალიან მკაცრია — DESI+CMB-ისთვის 0.072 eV-ზე ნაკლები (95% სანდოობა) — მაგრამ ნაშრომი პირდაპირ ამბობს, რომ თუ ბნელი ენერგიის ფონს ΛCDM-დან გადახრის უფლება მიეცემა, ეს ზღვარი მნიშვნელოვნად სუსტდება.

რას არ ამტკიცებს ეს შედეგი

- ის **არ** აჩვენებს, რომ ბნელი ენერგია ნამდვილად ევოლუცირებს. DESI-ს საკუთარი სახაზავი კოსმოლოგიურ მუდმივასთან თავსებადია; ევოლუციის მინიშნება მხოლოდ *კომბინირებულ* მოდელებში და მხოლოდ უფრო მდიდარ ორპარამეტრიან მოდელში ჩნდება.
- ის **არ** ნიშნავს, რომ „ΛCDM მოკვდა“ ან „აინშტაინი შეცდა“. ყველაზე ძლიერი რიცხვი, 3.9σ, მაინც 5σ-იან კონვენციურ აღმოჩენის ზღვარს ქვემოთაა — და DESI ცალკე აღებული სტანდარტულ მოდელს კარგად ერგება.
- შედეგი **ნიმუშისგან დამოუკიდებელი არ არის**. ზეახალი ვარსკვლავების კომპილაციის შეცვლა მნიშვნელოვნებას 2.5σ-დან 3.9σ-მდე ცვლის — ერთ sigma-ზე მეტად. სიგნალი, რომლის ზომაც ასე ძლიერადაა დამოკიდებული გარე მონაცემთა ნაკრებზე, მოსაძიებელი მინიშნებაა და არა უკვე „დაბანკებული“ გაზომვა.
- DESI-*საკუთარი* $w_0 > -1$ მიმართულების მცირე გადახრა **ნაწილობრივ ერთი ანომალიური წერტილითაა გამოწვეული** — redshift-0.51 გალაქტიკის ბინით, რომელიც ΛCDM-ის მოლოდინზე ოდნავ მაღლა ზის. მაგრამ სწორედ აქ აკეთებს ნაშრომი საჭირო შემოწმებას: ამ წერტილს სტატისტიკურ რყევად განიხილავს და აჩვენებს, რომ DESI-ს *ყველა* დაბალი redshift-ის ($z < 0.6$) გაზომვის ძველი SDSS მონაცემებით ჩანაცვლება ბნელი ენერგიის კომბინირებულ შედეგს არ ცვლის. უცნაური წერტილი DESI-ს ცალკე მიმართულებას ექაჩება; კომბინირებულ მინიშნებას **არ** „იჭერს“. ამიტომ ეს caveat საპირისპიროდ მუშაობს იმასთან შედარებით, როგორც ზოგჯერ ყვებიან: შედეგი ყველაზე ანომალიურ მონაცემზე stress-test-ს გაუძლო.
- ნეიტრინოების მასის ზღვარი **მოდელისგან დამოუკიდებელი განაჩენი არ არის**. ის მკაცრია მხოლოდ მაშინ, როცა ფონური გაფართოება ΛCDM-ზე ფიქსირდება; ამ შეზღუდვის მოხსნისას ზღვარიც სუსტდება.

რამდენად ძლიერია მტკიცებულება

- **ძალიან ძლიერი, როგორც მანძილის გაზომვა.** BAO სახაზავი კოსმოლოგიის ერთ-ერთი ყველაზე სუფთა ინსტრუმენტია, DESI-ს გაზომვა კი აქამდე ყველაზე ზუსტია; ბრმა ანალიზი ზუსტად ის დამცავი მექანიზმია, რომელიც სასურველი პასუხის მონაცემებში „დანახვას“ უნდა აფერხებდეს.
- **ნამდვილად საინტერესო, მაგრამ არა გადამწყვეტი, როგორც ბნელი ენერგიის მტკიცება.** DESI+CMB-ის 2.6σ უპირატესობა, რომელიც ყველაზე შემზღუდავ ზეახალი ვარსკვლავების ნაკრებთან 3.9σ-მდე იზრდება, ისეთი შედეგია, რომელიც მეტი ტელესკოპის დროის ღირსია — არა ისეთი, რომელიც მოდელს აუქმებს. სიფრთხილის მთავარი მიზეზი ზეახალი ვარსკვლავების ნიმუშებს შორის განსხვავებაა; ავტორების სასარგებლოდ, მათ ასევე შეამოწმეს, რომ ყველაზე ანომალიური BAO წერტილი შედეგს არ მართავს.
- ნაშრომი საკუთარ თავს ფრთხილად ეკიდება: მნიშვნელოვნებას სამივე გზით აჩვენებს და არა მხოლოდ უდიდეს რიცხვს, და ნეიტრინოს შედეგის მოდელზე დამოკიდებულებასაც ხაზს უსვამს. გადაჭარბება, სადაც ის ჩნდება, უფრო ხშირად გადმოცემაშია და არა ნაშრომში.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი

მეოთხედი საუკუნეა „ბნელი ენერგია“ და „კოსმოლოგიური მუდმივა“ თითქმის სინონიმებად გამოიყენება, რადგან ყველა გაზომვა ზუსტად -1-ის ტოლ w-თან თავსებადია. DESI პირველი მონაცემთა ნაკრებია ისეთი სიზუსტით, რომ სხვებთან კომბინაციაში საერთოდ შეუძლია მკაფიოდ დასვას კითხვა, იცვლება თუ არა ეს -1 — და პასუხად სრულიად ბრტყელი „არა“ აღარ მიიღოს. ეს რეალური ცვლილებაა მონაცემთა შესაძლებლობაში და ამიტომ ღირს შედეგი ყურადღებად. მაგრამ იგივე სიზუსტე გვაჩვენებს, რამდენად პირობითია მინიშნება: ზოგ კომბინაციაში ცოცხალია, სხვაში სუსტი, და განსაკუთრებით დამოკიდებულია იმაზე, DESI-ს რომელ ზეახალი ვარსკვლავების კატალოგს ვუწყვილებთ. სწორი პოზიცია არც უარყოფაა და არც ნაადრევად გამოცხადებული რევოლუცია. საჭიროა შემდეგ, უფრო დიდ DESI გამოშვებებსა და დამოუკიდებელ ზეახალი ვარსკვლავების ნიმუშებს დავაკვირდეთ და ვნახოთ, მყარდება თუ ქრება ეს გადახრა. კოსმოლოგიაში ნამდვილი „შესაძლოა“ სწორედ ასე გამოიყურება — და „შესაძლოა“-დ ღირს მისი გაშუქება.

სუფთა შეჯამება

DESI-მ ექვსი მილიონი ობიექტით სამყაროს გაფართოების ისტორია აქამდე ყველაზე ზუსტი ბარიონულ-აკუსტიკური სახაზავით გაზომა. ცალკე აღებული ეს სახაზავი ეთანხმება სტანდარტულ მოდელს, სადაც ბნელი ენერგია მუდმივაა. DESI-ს კოსმოსურ მიკროტალღურ ფონსა და ზეახალი ვარსკვლავების ნიმუშთან გაერთიანებისას კი

ჩნდება დროში ცვალებადი ბნელი ენერგიის უპირატესობა — 2.6σ-დან 3.9σ-მდე, იმის მიხედვით, რომელი ზეახალი ვარსკვლავების მონაცემები ემატება. ეს რეალური და საინტერესო მინიშნებაა, არა აღმოჩენა: ის ფიზიკოსების მოთხოვნილ ზღვარს ქვემოთ რჩება და მონაცემთა კომბინაციაზე იცვლება. ბნელი ენერგია **შეიძლება** ევოლუცირებდეს. DESI-მ ეს კითხვა საკმარისად ზუსტი გახადა იმისთვის, რომ სერიოზულად დავსვათ — ჯერ არა იმისთვის, რომ პასუხი მოგვცა.

წყაროები

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