The Clean Paper

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

DESI-nin ən kəskin kosmik xətkeşi və qaranlıq enerji barədə ehtiyatlı bir "bəlkə"

DESI altı milyon obyektdən indiyədək qurulmuş ən dəqiq baryon-akustik xətkeşlə kainatın genişlənmə tarixini ölçdü. Təkbaşına bu xətkeş qaranlıq enerjinin sabit olduğu standart modellə razıdır. Yalnız DESI kosmik mikrodalğa fonu və supernova nümunəsi ilə birləşdiriləndə evolving dark energy-yə üstünlük yaranır — əlavə olunan supernovalardan asılı olaraq 2.6σ-3.9σ, fiziklərin kəşf üçün tələb etdiyi həddən aşağı və cütləşdirilən dataya həssas. Dəqiq qoyulmuş real sual, cavab deyil.

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

Səsdən hazırlanmış xətkeş

Kainatın erkən dövründə, hələ ulduzlar yaranmamışdan əvvəl, adi maddə və işığın isti plazması “səslənirdi”. Təzyiq dalğaları işıq sürətinin yarısından böyük sürətlə onun içindən keçirdi; kainat atomların yaranmasına imkan verəcək qədər soyuyanda bu titrəyiş dayandı və maddənin paylanmasına zəif, üstünlük verilən bir məsafə “donduruldu”. Bu məsafə, *sound horizon*, bu gün təxminən 150 meqaparsekdir (təxminən 490 milyon işıq ili) və hər istiqamətdə, hər epoxada həmin məsafə ilə ayrılmış qalaktikaların bir qədər artıq olmasında görünür. Kosmoloqlar buna baryon acoustic oscillation, BAO deyir və standart xətkeş kimi istifadə edirlər: bu donmuş miqyasın müxtəlif məsafələrdə göydə nə qədər böyük göründüyünü ölçün və kainatın tarixi boyunca nə qədər sürətlə genişləndiyini xəritələyin.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) bu xətkeşi hamıdan yaxşı ölçmək üçün qurulub. İlk data release qalaktikalar, kvazarlar və uzaq qaz buludlarının Lyman-alpha forestında BAO miqyasını xəritələyir — redshift 0.1-dən 4.2-yə qədər yeddi redshift intervalında altı milyondan çox obyekt. İnsan gözləntisini nəticədən uzaq saxlamaq üçün komanda analizi *blind* apardı, metodlar kilidlənənədək kosmoloji cavabı özlərindən gizlətdi. Bu, böyük fərqlə indiyədək edilən ən dəqiq BAO ölçməsidir.

DESI Arizona ştatındakı Kitt Peak-də Nicholas U. Mayall 4-metrlik Teleskopuna quraşdırılıb. Cihaz minlərlə optik lifi spektroqraflara ötürərək göydəki mövqeləri milyonlarla qalaktika və kvazar üçün spektr və redshift-ə çevirir.

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

DESI nədir

Dark Energy Spectroscopic Instrument Arizona, Kitt Peak-də Nicholas U. Mayall 4-metrlik teleskopunda spektroqrafdır. O, qaranlıq enerjini birbaşa görmür — heç nə görə bilməz, çünki qaranlıq enerji işıq yaymır. Əvəzində eyni anda təxminən 5,000 qalaktika və kvazarın spektrini qeydə alır, genişlənən kainatın işığı nə qədər uzatdığından hər obyektin redshift-ni oxuyur və milyonlarla obyektin üçölçülü xəritəsini qurur. Sonra qaranlıq enerji həmin xəritədə kosmik genişlənmənin zamanla necə dəyişməsindən infer edilir. Robot liflərdən akustik xətkeşə qədər bütün zəncir üçün DESI necə işləyir.

Bundan yayılan başlıq qaranlıq enerjinin sabit olmaya biləcəyi — kainatın genişlənməsini sürətləndirən sirli şeyin zamanla *zəifləyə* və standart kosmoloji modeli çatlada biləcəyi — idi. Bu iddia uydurma deyil, amma asanlıqla həddən artıq oxuna bilər. Dürüst versiya daha konkret və daha maraqlıdır: DESI-nin öz xətkeşi təkbaşına sadə standart modellə razıdır. Yeni nəyinsə işarəsi yalnız DESI-ni başqa məlumatlarla birləşdirəndə yaranır — və işarənin gücü hansı başqa məlumatı seçdiyinizdən asılıdır.

DESI-nin baryon-akustik xətkeşi təkbaşına sabit qaranlıq enerji (kosmoloji sabit) ilə uyğundur. *Evolving* qaranlıq enerjiyə üstünlük yalnız DESI kosmik mikrodalğa fonu və supernova nümunəsi ilə birləşdiriləndə ortaya çıxır — və gücü istifadə olunan supernova nümunəsinə görə dəyişir.

Standart xətkeş və qaranlıq enerjinin dəyişə biləcəyi iki yol

BAO miqyası *standart xətkeşdir*: erkən kainat fizikasından onun həqiqi uzunluğunu bildiyimiz üçün həqiqi uzunluğu müəyyən məsafədəki görünən ölçü ilə müqayisə etmək kainatın həmin vaxta qədər nə qədər genişləndiyini deyir. Bir çox məsafədə ölçüləndə xətkeş bütün genişlənmə tarixini izləyir — qaranlıq enerjinin idarə etdiyi şeyi.
ΛCDM adlanan standart modeldə qaranlıq enerji *kosmoloji sabitdir*: boş fəzanın heç vaxt dəyişməyən sabit enerji sıxlığı. Fiziklər onun davranışını “state equation” parametri w ilə göstərirlər; həqiqi kosmoloji sabit üçün bu, hər yerdə və hər zaman dəqiq -1-dir.
Bunu sınamaq üçün iki şəkildə yumşaltmaq olar. Daha sadə variant w-nu başqa sabit qiymətə qoymaqdır (yenə zamanla dəyişmir) — bu “wCDM”dir. Daha zəngin variant kainat genişləndikcə w-nun dəyişməsinə icazə verir; iki rəqəmlə təsvir olunur: w_0, bu günkü qiyməti və w_a, nə sürətlə drift etməsi. Bu “w_0w_aCDM” modeli tək $w_0 = -1,\ w_a = 0$ nöqtəsində ΛCDM-ə qayıdır. w_0-ın -1-dən böyük, w_a-nın mənfi olmasına üstünlük verilməsi burada “evolving dark energy” deməkdir: keçmişdə daha repulsiv olan və indi zəifləyən qaranlıq enerji.

Müəlliflər nə etdilər

- DESI-nin ilk il məlumatından — qalaktikalar, kvazarlar və Lyman-alpha forest — $0.1 < z < 4.2$ aralığında yeddi redshift intervalı üzrə altı milyondan çox obyektin BAO miqyasını

ölçdülər.
- Confirmation bias-a qarşı metodologiya sabitləşənədək kosmoloji nəticəni gizlədərək analizi **blind** apardılar.
- Standart düz ΛCDM modelini əvvəl DESI BAO-nun özünə, sonra big-bang nucleosynthesis prior-u və Planck/ACT-dən kosmik mikrodalğa fonu (CMB) ilə birlikdə fit etdilər.
- Modeli iki yolla genişləndirdilər: sabit qaranlıq-enerji w (wCDM) və zamanla dəyişən $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$CDM).
- Tək birini seçmək əvəzinə DESI+CMB-ni növbə ilə üç fərqli Type Ia supernova compilation-u — Pantheon+, Union3 və DES-SN5YR — ilə birləşdirərək zamanla dəyişən modeli sınadılar.
- Neytrinoların cəmi kütləsinə hədlər qoydular və qaranlıq-enerji fonunun ΛCDM-dən yayınmasına icazə verilində bu hədlərin necə dəyişdiyini yoxladılar.

Nə tapdılar

- **DESI BAO təkbaşına standart modellə uyğundur.** Maddə sıxlığı $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ verir və qaranlıq enerjiyə sabit w verildikdə $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — kosmoloji sabit −1-in düz üzərində.
- CMB və lensing-i ilə birlikdə DESI $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ və Hubble sabiti $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} verir (nucleosynthesis və CMB acoustic scale ilə cütləşdirilində 68.52 ± 0.62).
- **Zamanla dəyişən modeldə kombinasiyalar evolving dark energy-yə üstünlük verir** — $w_0 > -1$ və $w_a < 0$. Üstünlük DESI+CMB üçün 2.6σ-dır; supernova nümunəsi əlavə olunanda Pantheon+, Union3 və DES-SN5YR üçün müvafiq olaraq 2.5σ, 3.5σ və 3.9σ olur (sigma nəticənin standart-model gözləntisindən nə qədər uzaqda olduğunu ölçür; 5σ iddia olunan kəşf üçün adi həddir və şərhin doğru olduğunu bildirmir — bələdçi).
- Neytrino cəmi kütləsi sərbəst buraxıldıqda sıx hədd alınır — DESI+CMB üçün 0.072 eV-dən aşağı (95% etibar) — amma məqalə açıq deyir ki, qaranlıq-enerji fonunun ΛCDM-dən yayınmasına icazə verilsə bu hədd xeyli boşalır.

Bu nəyi sübut etmir

- Qaranlıq enerjinin evolving olduğunu **göstərmir**. DESI-nin öz xətkeşi kosmoloji sabitlə uyğundur; təkamül işarəsi yalnız *birləşdirilmiş* fit-lərdə və daha zəngin iki-parametrli modeldə görünür.
- "ΛCDM öldü" və ya "Einstein səhv idi" demək **deyil**. Ən güclü rəqəm 3.9σ fiziklərin kəşf deməzdən əvvəl tələb etdiyi 5σ konvensiyasından aşağıdır və standart model DESI təkbaşına üçün yaxşı fit olaraq qalır.
- Nəticə **sample-independent deyil**. Supernova compilation-u dəyişdirəndə əhəmiyyət 2.5σ-dan 3.9σ-a — bir sigma-dan çox — dəyişir. Ölçüsü hansı xarici dataset-i əlavə etdiyinizdən bu qədər asılı olan siqnal araşdırılmalı işarədir, bank ediləcək ölçmə yox.
- DESI-*tək* $w_0 > -1$ meyli **qismən tək anomal nöqtədən** — ΛCDM-ə qarşı bir qədər yüksək olan redshift-0.51 qalaktika intervalından — gəlir. Amma məqalə burada ev tapşırığını

edir: nöqtəni statistik fluktuasiya kimi qəbul edir və DESI-nin bütün aşağı-redshift ($z < 0.6$) ölçmələrini köhnə SDSS ölçmələri ilə əvəz etməyin qaranlıq-enerji nəticəsini dəyişmədiyini göstərir. Qəribə nöqtə DESI-ni təkbaşına dartır; birləşdirilmiş işarəni **ayaqda saxlamır**. (Müstəqil qruplar sonradan onun rolunu daha dərindən araşdırıblar.) Ona görə bu caveat bəzən danışıldığı kimi əks istiqamətdə deyil: nəticə ən anomal məlumatına qarşı stress-test edilib və qalıb.
- Neytrino kütləsi həddi **modeldən müstəqil hökm deyil**. Yalnız fon genişlənməsi ΛCDM-də saxlananda sıxdır; bunu yumşaldın, hədd də yumşalır.

Sübut nə qədər güclüdür

- **Məsafə ölçməsi kimi çox güclüdür.** BAO xətkeşi kosmologiyanın ən təmiz alətlərindən biridir, DESI ölçməsi indiyədək ən dəqiqdir və blind analysis ümid edilən cavabı datada "görməyə" qarşı istənən məhz düzgün qoruyucudur.
- **Qaranlıq-enerji iddiası kimi həqiqətən maraqlıdır, amma həlledici deyil.** DESI+CMB-dən 2.6σ, ən məhdudlaşdırıcı supernova dəsti ilə 3.9σ-a yüksələn üstünlük daha çox teleskop vaxtına haqq qazandıran nəticədir — modeli devirməyə yox. Ehtiyat üçün dürüst səbəb supernova nümunələri arasındakı yayılmadır; müəlliflərin xeyrinə, ən anomal BAO nöqtəsinin nəticəni sürmədiyini də yoxlayıblar — belə iddianın tələb etdiyi ev tapşırığı məhz budur.
- Məqalə özünə qarşı ehtiyatlıdır: ən böyük rəqəmi seçib vermək əvəzinə əhəmiyyəti üç şəkildə bildirir və neytrino nəticəsinin model asılılığını qeyd edir. Şişirtmə varsa, məqalədə yox, təkrar danışılmada var.

Niyə vacibdir

Dörddə bir əsr ərzində "qaranlıq enerji" ilə "kosmoloji sabit" demək olar sinonim işlədilib, çünki bütün ölçmələr w-nun dəqiq -1 olması ilə uyğun idi. DESI o qədər dəqiq ilk dataset-dir ki, başqaları ilə birləşdiriləndə həmin -1-in drift edib-etmədiyini hətta *soruşa* bilir — və cavab düz "xeyr" olmur. Bu, məlumatın edə bildiyində real dəyişiklikdir və nəticənin niyə diqqətə layiq olduğunu izah edir. Amma elə eyni dəqiqlik işarənin nə qədər şərti olduğunu göstərir: bəzi data kombinasiyalarında canlıdır, digərlərində sakitdir və hər şeydən çox DESI ilə hansı supernova kataloqunun cütləşdirildiyinə həssasdır. Doğru mövqe nə rədd etmək, nə də inqilabı tez elan etməkdir. Növbəti, daha böyük DESI release-i — DR2 artıq 2025-də çıxıb — və müstəqil supernova nümunələrini izləmək, drift-in möhkəmlənib-möhkəmlənmədiyini görməkdir. Kosmologiyada həqiqi "bəlkə" belə görünür və onu "bəlkə" kimi yazmaq dəyərlidir.

Təmiz xülasə

DESI altı milyon obyektdən indiyədək qurulmuş ən yaxşı baryon-akustik xətkeşlə kainatın genişlənmə tarixini ölçüb. Təkbaşına bu xətkeş qaranlıq enerjinin sabit olduğu standart modellə razıdır. Onu kosmik mikrodalğa fonu və supernova nümunəsi ilə birləşdirəndə zamanla dəyişən qaranlıq enerjiyə üstünlük yaranır — hansı supernova dəstini əlavə etdiyinizdən asılı olaraq 2.6σ-dan 3.9σ-a qədər. Bu real və maraqlı işarədir, kəşf deyil: fiziklərin tələb etdiyi həddən aşağı qalır və cütləşdirilən supernova məlumatına görə dəyişir. Qaranlıq enerji evolving ola bilər. DESI bunu dəqiq soruşmağa dəyər suala çevirib — hələ cavablandırmayıb.

Mənbələr

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