The Clean Paper

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

Самая дакладная касмічная лінейка DESI — і асцярожнае «магчыма» пра цёмную энергію

DESI вымераў гісторыю пашырэння Сусвету з дапамогай самай дакладнай барыённа-акустычнай лінейкі з калі-небудзь створаных, выкарыстоўваючы шэсць мільёнаў аб'ектаў. Сама па сабе гэтая лінейка ўзгадняецца са стандартнай мадэллю, у якой цёмная энергія пастаянная. Толькі калі DESI аб'ядноўваюць з касмічным мікрахвалевым фонам і выбаркай звышновых, з'яўляецца перавага на карысць эвалюцыі цёмнай энергіі — ад 2.6σ да 3.9σ у залежнасці ад дададзенай выбаркі звышновых, ніжэй за парог адкрыцця і з прыкметнай залежнасцю ад аб'яднаных даных. Дакладная пастаноўка сапраўднага пытання, а не гатовы адказ.

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

Лінейка, зробленая з гуку

На пачатку гісторыі Сусвету, яшчэ да з'яўлення зорак, гарачая плазма са звычайнай матэрыі і святла літаральна «звінела». Хвалі ціску распаўсюджваліся праз яе са хуткасцю больш за палову хуткасці святла, пакуль Сусвет не астыў настолькі, што змаглі ўтварыцца атамы і гэты звон спыніўся — пакінуўшы ў размеркаванні матэрыі слаба выражаную пераважную адлегласць. Сёння гэтая адлегласць, *гукавы гарызонт*, складае каля 150 мегапарсекаў (прыкладна 490 мільёнаў светлавых гадоў) і праяўляецца як невялікі лішак пар галактык, падзеленых менавіта такой адлегласцю, ва ўсіх напрамках і ва ўсе эпохі. Касмолагі называюць гэта барыённымі акустычнымі асцыляцыямі, або BAO, і выкарыстоўваюць іх як стандартную лінейку: вымяраючы, як выглядае гэты «замарожаны» маштаб на небе на розных адлегласцях, можна аднавіць, як хутка пашыраўся Сусвет на працягу сваёй гісторыі.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) стварылі, каб вымераць гэтую лінейку лепш за ўсіх папярэднікаў. Першы выпуск даных DESI картографуе маштаб BAO ў галактыках, квазарах і лесе Лайман-альфа далёкіх газавых аблокаў — больш за шэсць мільёнаў аб'ектаў у сямі інтэрвалах чырвонага зрушэння ад 0.1 да 4.2. Каб чалавечыя чаканні не паўплывалі на вынік, каманда праводзіла аналіз *усляпую*, хаваючы ад сябе касмалагічны адказ, пакуль методыка не была зафіксаваная. З вялікім адрывам гэта самае дакладнае вымярэнне BAO з усіх выкананых.

DESI усталяваны на 4-метровым тэлескопе Nicholas U. Mayall на Кіт-Пік у Арызоне. Інструмент накіроўвае

святло праз тысячы аптычных валокнаў у спектрографы, ператвараючы становішчы на небе ў спектры і чырвоныя зрушэнні для мільёнаў галактык і квазараў.

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

Што такое DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument — спектрограф на 4-метровым тэлескопе Nicholas U. Mayall на Кіт-Пік у Арызоне. Ён не бачыць цёмную энергію непасрэдна — гэтага не можа зрабіць ніякі прыбор, бо цёмная энергія не выпраменьвае святла. Замест гэтага DESI адначасова запісвае спектры прыкладна 5 000 галактык і квазараў, вызначае чырвонае зрушэнне кожнага аб'екта па тым, як пашырэнне Сусвету расцягнула яго святло, і будуе трохмерную карту мільёнаў такіх аб'ектаў. Цёмную энергію затым выводзяць з таго, як гэтая карта паказвае змяненне касмічнага пашырэння з часам. Увесь ланцуг — ад рабатызаваных валокнаў да акустычнай лінейкі — апісаны ў матэрыяле Як працуе DESI.

Гучная выснова, што разышлася па свеце, гучала так: цёмная энергія, магчыма, не пастаянная — загадкавая прычына паскоранага пашырэння Сусвету можа *слабець* з часам, расхіставючы стандартную касмалагічную мадэль. Гэтае сцвярджэнне не выдуманае, але яго лёгка прачытаць занадта шырока. Сумленная версія больш канкрэтная і цікавейшая: уласная лінейка DESI, узятая асобна, узгадняецца са звычайнай стандартнай мадэллю. Намёк на нешта новае з'яўляецца толькі тады, калі DESI аб'ядноўваюць з іншымі данымі, — і сіла гэтага намёку залежыць ад таго, якія менавіта іншыя даныя выбраць.

Барыённа-акустычная лінейка DESI сама па сабе сумяшчальная з пастаяннай цёмнай энергіяй (касмалагічнай пастаяннай). Перавага на карысць *эвалюцыі* цёмнай энергіі ўзнікае толькі тады, калі DESI аб'ядноўваюць з касмічным мікрахвалевым фонам і выбаркай звышновых, прычым яе сіла змяняецца ў залежнасці ад выбаркі звышновых.

Стандартная лінейка і два спосабы, якімі цёмная энергія можа змяняцца

Маштаб BAO — гэта *стандартная лінейка*: паколькі з фізікі ранняга Сусвету нам вядомая яе сапраўдная даўжыня, параўнанне гэтай даўжыні з яе бачным памерам на пэўнай адлегласці паказвае, наколькі Сусвет ужо пашырыўся да таго моманту. Вымяраючы лінейку на многіх адлегласцях, можна прасачыць усю гісторыю пашырэння — менавіта ёю кіруе цёмная энергія.

У стандартнай мадэлі, якая называецца ΛCDM, цёмная энергія з'яўляецца *касмалагічнай пастаяннай*: нязменнай шчыльнасцю энергіі пустой прасторы. Фізікі апісваюць яе паводзіны параметрам «раўнання стану» w; для сапраўднай касмалагічнай пастаяннай ён роўны дакладна -1 паўсюль і заўсёды.

Каб праверыць гэтае дапушчэнне, яго можна аслабіць двума спосабамі. Прасцейшы — дазволіць w быць іншай пастаяннай велічынёй (але ўсё яшчэ нязменнай у часе): гэта мадэль «wCDM». Больш багатая мадэль дазваляе w

> змяняцца па меры пашырэння Сусвету і апісвае гэта двума лікамі: w_0, значэннем сёння, і w_a, хуткасцю яго змянення. Гэтая мадэль «w_0w_aCDM» зводзіцца да ΛCDM у адзінай кропцы $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Перавага значэння w_0 больш за -1 разам з адмоўным w_a — менавіта тое, што тут маецца на ўвазе пад «эвалюцыяй цёмнай энергіі»: у мінулым яе адштурхоўвальнае дзеянне было мацнейшым, а цяпер слабее.

Што зрабілі аўтары

- Вымералі маштаб BAO паводле першага года даных DESI — у галактыках, квазарах і лесе Лайман-альфа — для больш чым шасці мільёнаў аб'ектаў у сямі інтэрвалах чырвонага зрушэння, якія ахопліваюць $0.1 < z < 4.2$.
- Правялі аналіз **усляпую**, хаваючы касмалагічны вынік да канчатковай фіксацыі методыкі, каб абараніцца ад пацвярджальнага зрушэння.
- Падагналі стандартную плоскую мадэль ΛCDM спачатку толькі да BAO DESI, а затым у спалучэнні з апрыёрнай інфармацыяй ад нуклеасінтэзу Вялікага выбуху і касмічнага мікрахвалевага фону (CMB) паводле даных Planck і ACT.
- Пашырылі мадэль двума спосабамі: пастаяннай велічынёй w цёмнай энергіі (wCDM) і зменлівай у часе w_0w_a (w_0w_aCDM).
- Праверылі мадэль са зменлівым у часе w, па чарзе аб'ядноўваючы DESI+CMB з трыма рознымі каталогамі звышновых тыпу Ia — Pantheon+, Union3 і DES-SN5YR — замест таго, каб выбраць адзін.
- Усталявалі межы на сумарную масу нейтрына і праверылі, як гэтыя межы змяняюцца, калі дазволіць фонавай эвалюцыі цёмнай энергіі адхіляцца ад ΛCDM.

Што яны выявілі

- **BAO DESI самі па сабе ўзгадняюцца са стандартнай мадэллю.** Яны даюць шчыльнасць матэрыі $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, а калі дазволіць цёмнай энергіі мець пастаянны w, атрымліваем $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — практычна дакладна значэнне -1 для касмалагічнай пастаяннай.
- У спалучэнні з CMB і яго гравітацыйным лінзаваннем DESI дае $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ і пастаянную Хабла $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ (68.52 ± 0.62 у спалучэнні з нуклеасінтэзам і акустычным маштабам CMB).
- **У мадэлі са зменлівым у часе w камбінацыі даных аддаюць перавагу эвалюцыі цёмнай энергіі** — $w_0 > -1$ і $w_a < 0$. Для DESI+CMB перавага складае 2.6σ, а пасля дадання выбаркі звышновых — 2.5σ, 3.5σ або 3.9σ для Pantheon+, Union3 або DES-SN5YR адпаведна (сігма паказвае, наколькі далёка вынік знаходзіцца ад чакання стандартнай мадэлі; 5σ — звычайны парог для заявы пра адкрыццё, і сам па сабе ён не азначае, што інтэрпрэтацыя правільная — тлумачэнне).

- Калі сумарную масу нейтрына пакінуць свабодным параметрам, на яе накладаецца жорсткая мяжа — менш за 0.072 эВ (95%-ы даверны ўзровень) для DESI+CMB, — але артыкул наўпрост адзначае, што гэтая мяжа істотна слабее, калі дазволіць фону цёмнай энергіі адхіляцца ад ΛCDM.

Чаго гэта не даказвае

- Гэта **не паказвае**, што цёмная энергія эвалюцыянуе. Уласная лінейка DESI узгадняецца з касмалагічнай пастаяннай; намёк на эвалюцыю з'яўляецца толькі ў *камбінаваных* падгонках і толькі ў больш багатай двухпараметрычнай мадэлі.
- Гэта **не азначае**, што «ΛCDM мёртвая» або што «Эйнштэйн памыляўся». Самы моцны паказчык, 3.9σ, ніжэй за прыняты фізікамі парог 5σ для заявы пра адкрыццё, а стандартная мадэль застаецца добрым апісаннем DESI самога па сабе.
- Вынік **залежыць ад выбаркі**. Замена каталога звышновых змяняе значнасць ад 2.5σ да 3.9σ — больш чым на цэлую сігму. Сігнал, сіла якога настолькі залежыць ад дададзенага знешняга набору даных, — гэта намёк, які трэба правяраць, а не вынік, які ўжо можна лічыць усталяваным.
- Схільнасць даных *толькі DESI* да $w_0 > -1$ **часткова абумоўленая адной анамальнай кропкай** — галактычным інтэрвалам пры чырвоным зрушэнні 0.51, які ляжыць крыху вышэй за прагноз ΛCDM. Але менавіта тут аўтары робяць неабходную праверку: яны трактуюць гэтую кропку як статыстычную флуктуацыю і паказваюць, што замена *ўсіх* нізкачырвоназрушаных ($z < 0.6$) вымярэнняў DESI на старэйшыя даныя SDSS не змяняе вынік адносна цёмнай энергіі. Дзіўная кропка цягне за сабой DESI, узяты асобна, але **не** падтрымлівае камбінаваны намёк. (Незалежныя групы пазней падрабязней даследавалі яе ролю.) Таму гэтая агаворка працуе супрацьлегла таму, як яе часам пераказваюць: вынік праверылі на ўстойлівасць менавіта да самай анамальнай кропкі, і ён вытрымаў.
- Мяжа на масу нейтрына **не з'яўляецца мадэльна-незалежным вердыктам**. Яна вельмі жорсткая толькі пры ўмове, што фонавае пашырэнне фіксуюць як ΛCDM; калі гэтае дапушчэнне аслабіць, мяжа таксама слабее.

Наколькі моцныя доказы

- **Вельмі моцныя як вымярэнні адлегласцей.** BAO — адзін з самых чыстых інструментаў касмалогіі, вымярэнне DESI з'яўляецца самым дакладным на сёння, а сляпы аналіз — менавіта той засцерагальнік, які патрэбны, каб не «ўбачыць» у даных жаданы адказ.
- **Сапраўды інтрыгуюць, але не з'яўляюцца вырашальнымі як сцвярджэнне пра цёмную энергію.** Перавага 2.6σ для DESI+CMB, якая вырастае да 3.9σ з найбольш абмежавальнай выбаркай звышновых, — гэта вынік, варты дадатковага тэлескопнага часу, а не вынік, які адмяняе мадэль. Галоўная сумленная прычына для асцярожнасці

— роскід паміж выбаркамі звышновых; адначасова аўтары праверылі, што самая анамальная кропка BAO не вызначае вынік — менавіта такая праверка і патрэбная для сцвярджэння такога ўзроўню.
- Артыкул асцярожны ва ўласных фармулёўках: значнасць прыведзеная трыма спосабамі, а не толькі максімальным лікам, і наўпрост пазначаная мадэльная залежнасць выніку па нейтрына. Калі дзе і з'яўляецца перабольшанне, то пераважна ў пераказах, а не ў самой працы.

Чаму гэта важна

На працягу чвэрці стагоддзя «цёмная энергія» і «касмалагічная пастаянная» ўжываліся амаль як сінонімы, бо ўсе вымярэнні былі сумяшчальныя з w, роўным дакладна -1. DESI — першы набор даных настолькі дакладны, што ў спалучэнні з іншымі ён увогуле можа *спытаць*, ці дрэйфуе гэта -1, і атрымаць адказ, які не з'яўляецца адназначным «не». Гэта сапраўдная змена таго, што здольныя рабіць даныя, і таму вынік заслугоўвае ўвагі. Але тая ж дакладнасць дазваляе ўбачыць і тое, наколькі ўмоўны намёк: ён жыве ў адных камбінацыях даных, ціхі ў іншых і перадусім адчувальны да таго, які каталог звышновых аб'ядноўваюць з DESI. Правільная рэакцыя — ні адмахнуцца, ні загадзя абвясціць рэвалюцыю. Варта глядзець на наступны, большы выпуск DESI — DR2, ужо выпушчаны ў 2025 годзе, — і на незалежныя выбаркі звышновых і правяраць, ці ўзмоцніцца дрэйф або знікне. Менавіта так у касмалогіі выглядае сапраўднае «магчыма», і менавіта так яго варта падаваць.

Коратка

DESI вымераў гісторыю пашырэння Сусвету з дапамогай самай дакладнай барыённа-акустычнай лінейкі з калі-небудзь створаных, выкарыстоўваючы шэсць мільёнаў аб'ектаў. Сама па сабе гэтая лінейка ўзгадняецца са стандартнай мадэллю, у якой цёмная энергія пастаянная. Калі аб'яднаць DESI з касмічным мікрахвалевым фонам і выбаркай звышновых, з'яўляецца перавага на карысць цёмнай энергіі, якая змяняецца з часам, — ад 2.6σ да 3.9σ у залежнасці ад таго, якія звышновыя дадаць. Гэта сапраўдны і цікавы намёк, а не адкрыццё: ён застаецца ніжэй за парог, якога патрабуюць фізікі, і змяняецца ў залежнасці ад даных пра звышновыя, з якімі аб'ядноўваюць DESI. Цёмная энергія *можа* эвалюцыянаваць. DESI зрабіў гэтае пытанне дастаткова дакладным, каб яго варта было задаваць, — але яшчэ не даў на яго адказу.

Крыніцы

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