



The CLEAN PAPER

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

Najpresnejšie kozmické pravítko DESI a opatrné „možno“ o temnej energii

DESI zmeral históriu rozpínania vesmíru najpresnejším doterajším baryónovo-akustickým pravítkom vytvoreným zo šiestich miliónov objektov. Samotné pravítko súhlasí so štandardným modelom, v ktorom je temná energia konštantná. Preferencia pre vyvíjajúcu sa temnú energiu sa objaví až po spojení DESI s reliktným mikrovlnným žiarením a súborom supernov — na úrovni $2,6\sigma$ až $3,9\sigma$ podľa pridaného súboru, pod hranicou objavy a citlivá na spojené údaje. Skutočná otázka položená presne, nie odpoveď.

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

Pravítko vytvorené zo zvuku

V ranom vesmíre, ešte pred vznikom hviezd, znela horúca plazma obvyčajnej hmoty a svetla. Tlakové vlny sa ňou šírili rýchlosťou presahujúcou polovicu rýchlosti svetla, kým vesmír nevychladol natoľko, aby sa mohli vytvoriť atómy a vlnenie ustalo — v rozložení hmoty tak zamrzla slabo uprednostňovaná vzdialenosť. Táto vzdialenosť, *zvukový horizont*, dnes predstavuje asi 150 megaparsekov (približne 490 miliónov svetelných rokov) a prejavuje sa ako mierny nadbytok dvojíc galaxií oddelených práve týmto rozstupom, vo všetkých smeroch a obdobiach. Kozmológovia ju nazývajú baryónová akustická oscilácia alebo BAO a používajú ju ako štandardné pravítko: ak zmerajú, aká veľká sa táto zamrznutá mierka javí na oblohe v rôznych vzdialenostiach, zmapujú rýchlosť rozpínania vesmíru počas jeho dejín.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) bol postavený, aby toto pravítko zmeral lepšie než ktokoľvek predtým. Jeho prvé zverejnené údaje mapujú mierku BAO v galaxiách, kvazaroch a Lymanovom alfa lese vzdialených plynových oblakov — vo viac než šiestich miliónoch objektov rozdelených do siedmich intervalov červeného posunu od 0,1 do 4,2. Aby očakávania ľudí neovplyvnili výsledok, tím vykonal analýzu *naslepo* a kozmologickú odpoveď pred sebou skryl, kým sa metódy definitívne nestanovili. S veľkým náskokom ide o najpresnejšie doterajšie meranie BAO.



DESI je nainštalovaný na 4-metrovom ďalekohľade Nicholasa U. Mayalla na Kitt Peaku v Arizone. Prístroj vedie svetlo tisíckami optických vlákien do spektrografov a premieňa polohy na oblohe na spektrá a červené posuny miliónov galaxií a kvazarov.

Čo je DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument je spektrograf na 4-metrovom ďalekohľade Nicholasa U. Mayalla na Kitt Peak v Arizone. Temnú energiu nevidí priamo — nedokáže to nič, pretože temná energia nevyžaruje svetlo. Namiesto toho súčasne zaznamenáva spektrá približne 5 000 galaxií a kvazarov, z natiahnutia svetla rozpínajúcim sa vesmírom odčíta červený posun každého objektu a vytvára trojrozmernú mapu miliónoch z nich. Temná energia sa potom odvodzuje z toho, ako mapa ukazuje zmenu kozmického rozpínania v čase. Celý reťazec od robotických vlákien po akustické pravítko opisuje sprievodca Ako funguje DESI.

Z merania sa rozšíril titulok, že temná energia možno nie je konštantná — že tajomná zložka urýchľujúca rozpínanie vesmíru môže časom *slabnúť* a narúšať štandardný kozmologický model. Toto tvrdenie nie je vymyslené, no ľahko sa z neho vyčíta priveľa. Poctivá verzia je konkrétnejšia a zaujímavejšia: vlastné pravítko DESI samo osebe súhlasí s bežným štandardným modelom. Náznak niečoho nového sa objavuje až po spojení DESI s inými údajmi — a jeho sila závisí od toho, ktoré ďalšie údaje vyberiete.

Samotné baryónovo-akustické pravítko DESI je v súlade s konštantnou temnou energiou, teda kozmologickou konštantou. Preferencia pre *vyvíjajúcu sa* temnú energiu vzniká až spojením DESI s reliktným mikrovlnným žiarením a súborom supernov — a jej sila sa mení podľa použitého súboru supernov.

Štandardné pravítko a dva spôsoby, ako sa môže temná energia meniť

Mierka BAO je *štandardné pravítko*: jej skutočnú dĺžku poznáme z fyziky raného vesmíru, takže porovnanie tejto dĺžky s jej zdalivou veľkosťou v určitej vzdialenosti ukazuje, nakoľko sa vesmír dovtedy rozpínal. Meranie v mnohých vzdialenostiach sleduje celú históriu rozpínania — teda proces, ktorý riadi temná energia.

V štandardnom modeli nazývanom Λ CDM je temná energia *kozmozologickou konštantou*: nemennou hustotou energie prázdneho priestoru. Fyzici jej správanie opisujú parametrom „stavovej rovnice“ w , ktorý je pre skutočnú kozmologickú konštantu všade a vždy presne -1 .

Tento predpoklad možno uvoľniť dvoma spôsobmi. Jednoduchší dovoľí, aby w bolo inou konštantou, stále však pevnou v čase — to je „ w CDM“. Bohatší model necháva w meniť sa s rozpínaním vesmíru a opisuje ho dvoma číslami: w_0 , dnešnou hodnotou, a w_a , rýchlosťou zmeny. Model „ w_0w_a CDM“ sa redukuje na Λ CDM v jedinom bode $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Preferencia w_0 väčšieho než -1 a záporného w_a tu znamená „vyvíjajúcu sa temnú energiu“: v minulosti odpudzovala silnejšie a teraz jej účinok slabne.

Čo autori urobili

- Zmerali mierku BAO v údajoch z prvého roka DESI — galaxiách, kvazaroč a Lymanovom alfa lese — pre viac než šesť miliónoch objektov v siedmich intervaloch červeného posunu $0,1 < z < 4,2$.
- Vykonali analýzu **naslepo** a až do ustálenia metodiky skrývali kozmologický výsledok, aby sa

chránili pred konfirmačným skreslením.

- Prispôbili štandardný plochý model Λ CDM najprv samotným BAO DESI a potom ich kombinácii s apriórny obmedzením z nukleosyntézy veľkého tresku a reliktným mikrovlnným žiarením (CMB) z meraní Planck a ACT.
- Rozšírili model dvoma spôsobmi: o konštantné w temnej energie (w CDM) a o časovo premenlivé $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$ CDM).
- Testovali časovo premenlivý model tak, že DESI+CMB postupne spojili s tromi rôznymi súbormi supernov typu Ia — Pantheon+, Union3 a DES-SN5YR — namiesto výberu jediného.
- Stanovili obmedzenia súčtu hmotností neutrín a skontrolovali, ako sa menia, ak sa pozadie temnej energie môže odchýliť.

Čo zistili

- **Samotné BAO DESI sú v súlade so štandardným modelom.** Dávajú hustotu hmoty $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$ a pri povolení konštantného w temnej energie $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$, teda priamo pri hodnote -1 pre kozmologickú konštantu.
- Po spojení s CMB a jeho gravitačným šošovkovaním dáva DESI $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ a Hubblovu konštantu $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$ pri spojení s nukleosyntézou a akustickou mierkou CMB).
- **V časovo premenlivom modeli kombinácie údajov uprednostňujú vyvíjajúcu sa temnú energiu** — $w_0 > -1$ a $w_a < 0$. Preferencia predstavuje $2,6\sigma$ pre DESI+CMB a po pridaní súboru supernov $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ alebo $3,9\sigma$ pre Pantheon+, Union3 či DES-SN5YR (sigma meria, ako ďaleko výsledok leží od očakávania štandardného modelu; 5σ je obvyklá hranica na ohlásenie objavu a samo osebe nehovorí, že interpretácia je správna — sprievodca).
- Pri voľnom súčte hmotností neutrín vychádza prísne obmedzenie — menej než $0,072 \text{ eV}$ (95 % spoľahlivosť) pre DESI+CMB — práca však výslovne uvádza, že sa výrazne uvoľní, ak sa pozadie temnej energie môže odchýliť od Λ CDM.

Čo to nedokazuje

- Výsledok **neukazuje**, že sa temná energia vyvíja. Vlastné pravítko DESI je v súlade s kozmologickou konštantou; náznak vývoja sa objavuje iba v *kombinovaných* prispôbeniach a len v bohatšom dvojparametrovom modeli.
- Neznamená, že „ Λ CDM je mŕtvy“ alebo že „Einstein sa mýlil“. Najsilnejšia hodnota $3,9\sigma$ je pod hranicou 5σ , ktorú fyzici vyžadujú pred označením výsledku za objav, a štandardný model zostáva dobrým opisom samotného DESI.
- Výsledok **nie je nezávislý od použitého súboru**. Zámena súboru supernov posunie významnosť z $2,5\sigma$ na $3,9\sigma$ — o viac než jednu sigmu. Signál, ktorého veľkosť tak silno závisí od pripojeného externého súboru, je podnetom na ďalšie skúmanie, nie meraním, ktoré možno považovať za ustálené.
- Tendenciu samotného DESI k $w_0 > -1$ poháňa **sčasti jediný anomálny bod** — interval galaxií s

červeným posunom 0,51, ktorý leží mierne nad Λ CDM. Práca tu však robí potrebnú kontrolu: bod považuje za štatistickú fluktuáciu a ukazuje, že nahradenie *všetkých* meraní DESI pri nízkom červenom posune ($z < 0,6$) staršími meraniami SDSS výsledok pre temnú energiu nezmení. Nezvyčajný bod ovplyvňuje samotné DESI, ale **neudržiava** kombinovaný náznak. (Nezávislé skupiny neskôr jeho úlohu skúmali podrobnejšie.) Táto výhrada teda pôsobí opačne, než sa niekedy podáva: výsledok prešiel záťažovou skúškou voči najanomálnejším údajom a obstál.

- Obmedzenie hmotnosti neutrín **nie je** verdikt nezávislý od modelu. Je prísne iba vtedy, ak je rozpínanie pozadia viazané na Λ CDM; po uvoľnení tohto predpokladu sa uvoľní aj hranica.

Aké silné sú dôkazy

- **Veľmi silné ako meranie vzdialenosti.** Pravítko BAO je jedným z najčistejších nástrojov kozmológie, DESI poskytuje doteraz najpresnejšie meranie a slepá analýza je presne tou ochranou, ktorá bráni čítaniu očakávanej odpovede z údajov.
- **Skutočne zaujímavé, ale nie rozhodujúce ako tvrdenie o temnej energii.** Preferencia $2,6\sigma$ pre DESI+CMB, rastúca na $3,9\sigma$ s najviac obmedzujúcim súborom supernov, si zaslúži ďalší čas ďalekohľadov, nie zvrhnutie modelu. Poctivým dôvodom opatrnosti je rozptyl medzi súbormi supernov; autori navyše overili, že výsledok nepoháňa ich jediný najanomálnejší bod BAO — presne takú kontrolu podobné tvrdenie potrebuje.
- Práca je voči sebe opatrná: uvádza významnosť tromi spôsobmi namiesto citovania najvyššej hodnoty a upozorňuje na modelovú závislosť výsledku pre neutrína. Preháňanie, ak sa objavuje, vzniká v prerozprávaní, nie v práci.

Prečo na tom záleží

Štvrt storočia sa „temná energia“ a „kozmozologická konštanta“ používali takmer zameniteľne, pretože všetky merania boli v súlade s w presne -1 . DESI je prvý súbor údajov natoľko presný, že sa v kombinácii s inými vôbec dokáže spýtať, či sa táto -1 mení — a získať odpoveď, ktorá nie je jednoznačným nie. To je skutočný posun v tom, čo údaje dokážu, a dôvod, prečo si výsledok zaslúži pozornosť. Rovnaká presnosť však ukazuje jeho podmienenosť: v niektorých kombináciách údajov je náznak živý, v iných tichý a najmä citlivý na katalóg supernov pripojený k DESI. Správnu reakciou nie je ani odmietnutie, ani predčasne vyhlásená revolúcia. Treba sledovať ďalšie, väčšie zverejnenie DESI — DR2, dostupné už v roku 2025 — a nezávislé súbory supernov a zistiť, či sa odchýlka upevní, alebo zmizne. Tak v kozmológii vyzerá skutočné „možno“ a ako „možno“ sa ho oplatí opísať.

Stručné zhrnutie

DESI zmeral históriu rozpínania vesmíru najlepším doterajším baryónovo-akustickým pravítkom vytvoreným zo šiestich miliónov objektov. Samotné pravítko súhlasí so štandardným modelom, v ktorom je temná energia konštantná. Po spojení s reliktným mikrovlnným žiarením a súborom supernov sa objaví preferencia pre temnú energiu meniacu sa v čase — od $2,6\sigma$ do $3,9\sigma$ podľa pridaného súboru supernov. Je to skutočný a zaujímavý náznak, nie objav: zostáva pod požadovanou hranicou a mení sa s voľbou údajov. Temná energia sa možno vyvíja. DESI z toho urobil otázku, ktorú sa oplatí klásť presne — zatiaľ na ňu však neodpovedal.

Zdroje

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>