



The CLEAN PAPER

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

Nejpřesnější kosmické pravítko DESI a opatrné „možná“ o temné energii

DESI změřil historii rozpínání vesmíru nejpřesnějším dosavadním baryonově akustickým pravítkem, vytvořeným ze šesti milionů objektů. Samotné pravítko souhlasí se standardním modelem, v němž je temná energie konstantní. Preference pro vyvíjející se temnou energii se objeví až po spojení DESI s reliktním mikrovlnným zářením a souborem supernov — na úrovni $2,6\sigma$ až $3,9\sigma$ podle přidání souboru, pod prahem objevu a citlivá na spojená data. Skutečná otázka položená přesně, nikoli odpověď.

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 vytvořené ze zvuku

V raném vesmíru, ještě před vznikem hvězd, znělo horké plazma obyčejné hmoty a světla. Tlakové vlny se jím šířily rychlostí přesahující polovinu rychlosti světla, dokud vesmír nevychladl natolik, aby se mohly vytvořit atomy a vlnění ustalo — v rozložení hmoty tak zamrzla slabě upřednostňovaná vzdálenost. Tato vzdálenost, *zvukový horizont*, dnes činí asi 150 megaparseků (přibližně 490 milionů světelných let) a projevuje se jako mírný nadbytek dvojic galaxií oddělených právě tímto rozestupem, ve všech směrech a epochách. Kosmologové jí říkají baryonová akustická oscilace neboli BAO a používají ji jako standardní pravítko: změří-li, jak velká se tato zamrzlá škála jeví na obloze v různých vzdálenostech, zmapují rychlost rozpínání vesmíru v průběhu jeho dějin.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) byl postaven, aby toto pravítko změřil lépe než kdokoli předtím. Jeho první zveřejněná data mapují škálu BAO v galaxiích, kvasarech a Lymanově alfa lese vzdálených plynových mračen — ve více než šesti milionech objektů rozdělených do sedmi intervalů rudého posuvu od 0,1 do 4,2. Aby očekávání lidí výsledek neovlivnilo, tým provedl analýzu *naslepo* a kosmologickou odpověď před sebou skryl, dokud nebyly metody uzamčeny. Jde s velkým náskokem o nejpresnější dosavadní měření BAO.



DESI je instalován na 4metrovém dalekohledu Nicholas U. Mayalla na Kitt Peaku v Arizoně. Přístroj vede světlo tisíce optických vláken do spektrografů a převádí polohy na obloze na spektra a rudé posuvy milionů galaxií a kvasarů.

Co je DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument je spektrograf na 4metrovém dalekohledu Nicholase U. Mayalla na Kitt Peak v Arizoně. Temnou energii nevidí přímo — to nedokáže nic, protože temná energie nevyzařuje světlo. Místo toho zaznamenává současně spektra asi 5 000 galaxií a kvasarů, z roztažení světla rozpínajícím se vesmírem odečítá rudý posuv každého objektu a vytváří trojrozměrnou mapu milionů z nich. Temná energie se pak odvozuje z toho, jak mapa ukazuje proměnu kosmického rozpínání v čase. Celý řetězec od robotických vláken po akustické pravítko popisuje průvodce Jak DESI funguje.

Z měření se rozšířil titul, že temná energie možná není konstantní — že tajemná složka urychlující rozpínání vesmíru může postupem času *slábnout* a narušovat standardní kosmologický model. Toto tvrzení není vymyšlené, snadno se z něj však vyčte příliš mnoho. Poctivá verze je konkrétnější a zajímavější: vlastní pravítko DESI samo o sobě souhlasí s běžným standardním modelem. Náznak něčeho nového se objevuje až při spojení DESI s jinými daty — a jeho síla závisí na tom, která další data zvolíte.

Samotné baryonové akustické pravítko DESI je v souladu s konstantní temnou energií, tedy kosmologickou konstantou. Preference pro *vyvíjející se* temnou energii vzniká teprve spojením DESI s reliktním mikrovlnným zářením a souborem supernov — a její síla se mění podle použitého souboru supernov.

Standardní pravítko a dva způsoby, jak se může temná energie měnit

Škála BAO je *standardní pravítko*: její skutečnou délku známe z fyziky raného vesmíru, a porovnání této délky s její zdánlivou velikostí v určité vzdálenosti proto ukazuje, nakolik se vesmír do té doby rozpínal. Měření v mnoha vzdálenostech sleduje celou historii rozpínání — tedy proces, který řídí temná energie.

Ve standardním modelu zvaném Λ CDM je temná energie *kosmologickou konstantou*: neměnnou hustotou energie prázdného prostoru. Fyzici její chování popisují parametrem „stavové rovnice“ w , který je pro skutečnou kosmologickou konstantu všude a vždy přesně -1 .

Tento předpoklad lze uvolnit dvěma způsoby. Jednodušší dovolí, aby w bylo jinou konstantou, stále však pevnou v čase — to je „ w CDM“. Bohatší model nechává w měnit se s rozpínáním vesmíru a popisuje je dvěma čísly: w_0 , dnešní hodnotou, a w_a , rychlostí změny. Model „ $w_0 w_a$ CDM“ se redukuje na Λ CDM v jediném bodě $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Preference w_0 většího než -1 a záporného w_a zde znamená „vyvíjející se temnou energii“: v minulosti odpuzovala silněji a nyní její účinek slábne.

Co autoři udělali

- Změřili škálu BAO v datech z prvního roku DESI — galaxiích, kvasarech a Lymanově alfa lese — pro více než šest milionů objektů v sedmi intervalech rudého posuvu $0,1 < z < 4,2$.
- Provedli analýzu **naslepo** a až do ustálení metodiky skrývali kosmologický výsledek, aby se

chránili před konfirmačním zkreslením.

- Přizpůsobili standardní plochý model Λ CDM nejprve samotným BAO DESI a poté jejich kombinaci s apriorním omezením z nukleosyntézy velkého třesku a reliktním mikrovlnným zářením (CMB) z měření Planck a ACT.
- Rozšířili model dvěma způsoby: o konstantní w temné energie (w CDM) a o časově proměnné $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$ CDM).
- Testovali časově proměnný model tak, že DESI+CMB postupně spojili se třemi různými soubory supernov typu Ia — Pantheon+, Union3 a DES-SN5YR — místo aby vybrali jediný.
- Stanovili omezení součtu hmotností neutrin a zkontrolovali, jak se mění, pokud se pozadí temné energie smí odchýlit.

Co zjistili

- **Samotné BAO DESI jsou v souladu se standardním modelem.** Dávají hustotu hmoty $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$ a při povolení konstantního w temné energie $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$, tedy přímo u hodnoty -1 pro kosmologickou konstantu.
- Po spojení s CMB a jeho gravitačním čočkováním dává DESI $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ a Hubbleovu konstantu $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$ při spojení s nukleosyntézou a akustickou škálou CMB).
- **V časově proměnném modelu kombinace dat preferují vyvíjející se temnou energii** — $w_0 > -1$ a $w_a < 0$. Preference činí $2,6\sigma$ pro DESI+CMB a po přidání souboru supernov $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ nebo $3,9\sigma$ pro Pantheon+, Union3 či DES-SN5YR (sigma měří, jak daleko výsledek leží od očekávání standardního modelu; 5σ je obvyklý práh pro ohlášení objevu a samo o sobě neříká, že je interpretace správná — průvodce).
- Při volném součtu hmotností neutrin vychází přísné omezení — méně než $0,072 \text{ eV}$ (95% spolehlivost) pro DESI+CMB — práce však výslovně uvádí, že se výrazně uvolní, pokud se pozadí temné energie může odchýlit od Λ CDM.

Co to nedokazuje

- Výsledek **neukazuje**, že se temná energie vyvíjí. Vlastní pravítka DESI je v souladu s kosmologickou konstantou; náznak vývoje se objevuje jen v *kombinovaných* přizpůsobeních a pouze v bohatším dvouparametrovém modelu.
- Neznamená, že „ Λ CDM je mrtvý“ nebo že „Einstein se mýlil“. Nejsilnější hodnota $3,9\sigma$ je pod konvencí 5σ , kterou fyzici vyžadují před označením výsledku za objev, a standardní model zůstává dobrým popisem samotného DESI.
- Výsledek **není nezávislý na použitém souboru**. Záměna souboru supernov posune významnost z $2,5\sigma$ na $3,9\sigma$ — o více než jednu sigma. Signál, jehož velikost tak silně závisí na připojeném externím souboru, je podnětem k dalšímu zkoumání, ne měřením, na které se lze spolehnout jako na ustálené.
- Tendenci samotného DESI k $w_0 > -1$ pohání **zčásti jediný anomální bod** — interval galaxií s

rudým posuvem 0,51, který leží mírně nad Λ CDM. Zde však práce provádí potřebnou kontrolu: bod považuje za statistickou fluktuaci a ukazuje, že nahrazení *všech* měření DESI při nízkém rudém posuvu ($z < 0,6$) staršími měřeními SDSS výsledek pro temnou energii nezmění. Neobvyklý bod ovlivňuje DESI samotné, ale **neudrží** kombinovaný náznak. (Nezávislé skupiny později jeho úlohu zkoumaly podrobněji.) Tato výhrada tedy působí opačně, než se někdy vypráví: výsledek byl vystaven zátěžové zkoušce vůči nejvíce anomálním datům a obstál.

- Omezení hmotnosti neutrin **není** verdikt nezávislý na modelu. Je přísné pouze tehdy, pokud je rozpínání pozadí vázáno na Λ CDM; po uvolnění tohoto předpokladu se uvolní i mez.

Jak silné jsou důkazy

- **Velmi silné jako měření vzdálenosti.** Pravítko BAO je jedním z nejčistších nástrojů kosmologie, DESI poskytuje dosud nejpresnější měření a slepá analýza je přesně tou ochranou, která brání čtení očekávané odpovědi z dat.
- **Skutečně zajímavé, ale nikoli rozhodující jako tvrzení o temné energii.** Preference $2,6\sigma$ pro DESI+CMB, rostoucí na $3,9\sigma$ s nejvíce omezujícím souborem supernov, si zaslouží další čas dalekohledů, ne svržení modelu. Poctivým důvodem opatrnosti je rozptyl mezi soubory supernov; autoři navíc ověřili, že výsledek nepohání jejich jediný nejvíce anomální bod BAO — přesně takovou kontrolu podobné tvrzení potřebuje.
- Práce je vůči sobě opatrná: uvádí významnost třemi způsoby místo citování nejvyšší hodnoty a upozorňuje na modelovou závislost výsledku pro neutrina. Přehánění, pokud se objevuje, vzniká v převyprávění, ne v práci.

Proč na tom záleží

Čtvrt století se „temná energie“ a „kosmologická konstanta“ používaly téměř zaměnitelně, protože všechna měření byla v souladu s w přesně -1 . DESI je první soubor dat natolik přesný, že se v kombinaci s jinými vůbec dokáže zeptat, zda se tato -1 mění — a získat odpověď, která není jednoznačným ne. To je skutečný posun v tom, co data dokážou, a důvod, proč si výsledek zaslouží pozornost. Stejná přesnost však ukazuje jeho podmíněnost: v některých kombinacích dat je náznak živý, v jiných tichý a především citlivý na katalog supernov připojený k DESI. Správnou reakcí není ani odmítnutí, ani předčasně vyhlášená revoluce. Je třeba sledovat další, větší zveřejnění DESI — DR2, dostupné už v roce 2025 — a nezávislé soubory supernov a zjistit, zda se odchylka upevní, nebo zmizí. Tak v kosmologii vypadá skutečné „možná“ a jako „možná“ stojí za to je popsat.

Stručné shrnutí

DESI změřil historii rozpínání vesmíru nejlepším dosavadním baryonově akustickým pravítkem, vytvořeným ze šesti milionů objektů. Samotné pravítko souhlasí se standardním modelem, v němž je temná energie konstantní. Po spojení s reliktním mikrovlnným zářením a souborem supernov se objeví preference pro temnou energii, která se mění v čase — od $2,6\sigma$ do $3,9\sigma$ podle přidaného souboru supernov. Je to skutečný a zajímavý náznak, nikoli objev: zůstává pod požadovaným prahem a mění se s volbou dat. Temná energie se možná vyvíjí. DESI z toho udělal otázku, kterou stojí za to klást přesně — zatím však na ni neodpověděl.

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>