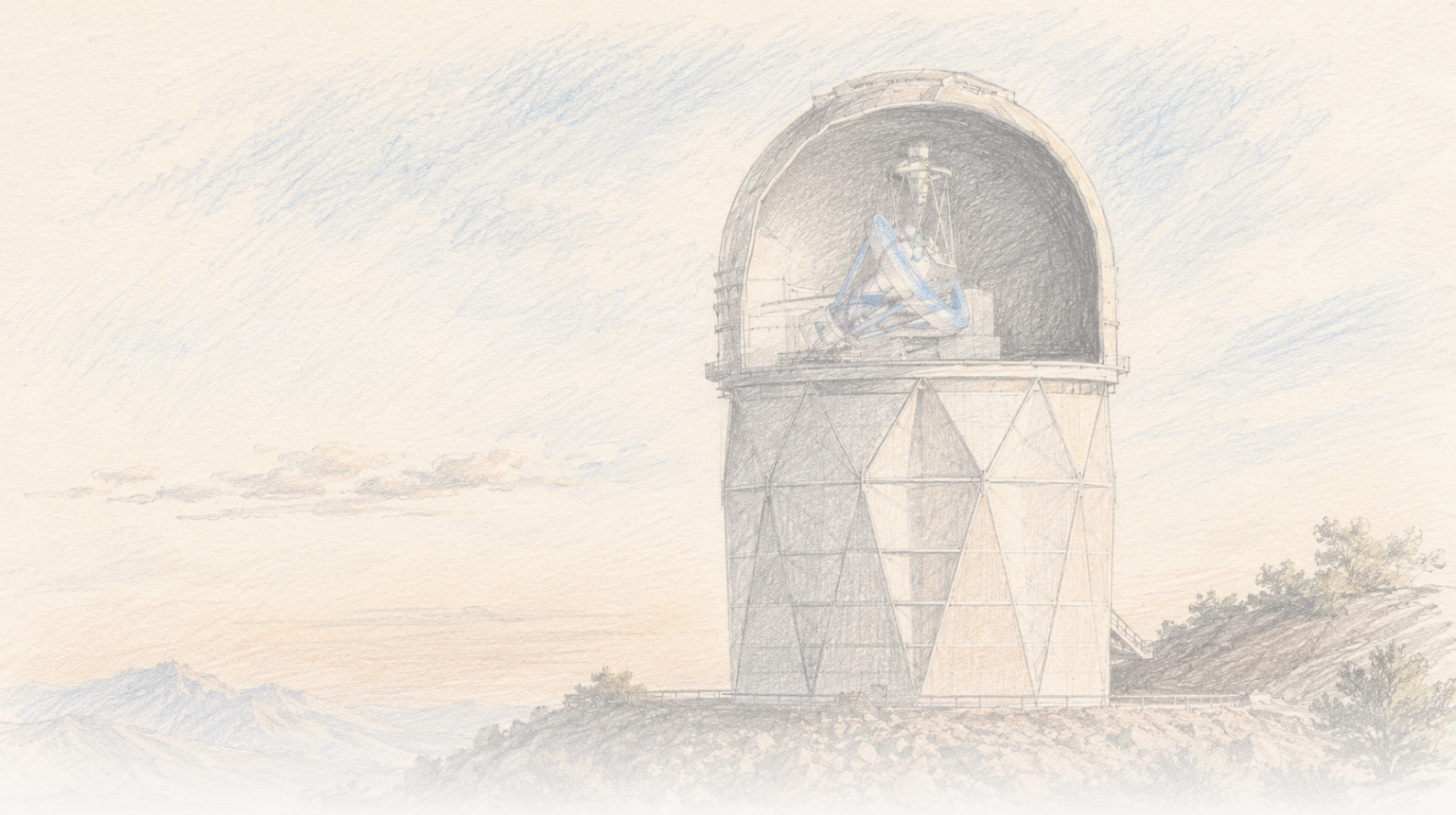

The Clean Paper

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

A DESI eddigi legélesebb kozmikus vonalzója, és egy óvatos „talán” a sötét energiáról

A DESI hatmillió objektumból a valaha készült legpontosabb barionakusztikus standard vonalzóval mérte meg a világegyetem tágulástörténetét. Önmagában a mérés egyetért a standard modellel, amelyben a sötét energia állandó. Csak a kozmikus mikrohullámú háttérrel és szupernóvamintával kombinálva jelenik meg az időben változó sötét energia preferenciája — 2.6σ és 3.9σ között attól függően, melyik szupernóvákat adják hozzá, a felfedezési küszöb alatt és érzékenyen a párosított adatokra. Egy valós kérdés, amelyet végre pontosan fel lehet tenni — nem egy kész válasz.

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

Hangból készült vonalzó

A korai világegyetemben, még a csillagok kialakulása előtt, a közönséges anyag és a fény forró plazmája „zengett”. Nyomáshullámok haladtak át rajta a fénysebesség több mint felével, amíg a világegyetem eléggé le nem hűlt az atomok kialakulásához, és a rezgés meg nem állt — halvány kitüntetett távolságot fagyasztva az anyag eloszlásába. Ez a távolság, a *hanghorizont*, ma körülbelül 150 megaparszek (nagyjából 490 millió fényév), és enyhe többletként jelenik meg az egymástól ekkora távolságra lévő galaxisok számában, minden irányban és minden korszakban. A kozmológusok ezt barion akusztikus oszcillációnak, BAO-nak nevezik, és standard vonalzóként használják: ha különböző távolságokban megmérjük, mekkorának látszik ez a befagyott skála az égbolton, feltérképezhetjük, milyen gyorsan tágult a világegyetem története során.

A Dark Energy Spectroscopic Instrumentet (DESI) arra építették, hogy ezt a vonalzót minden korábbinál pontosabban mérje. Első adatközlése galaxisokban, kvazárokban és távoli gázfelhők Lyman-alfa erdejében térképezi fel a BAO-skálát — több mint hatmillió objektummal, hét vöröseltolódási tartományban z = 0.1 és 4.2 között. Hogy az emberi várakozások ne befolyásolják az eredményt, a csapat *vak* elemzést végzett: elrejtették saját maguk elől a kozmológiai eredményt addig, amíg a módszertant véglegesen le nem zárták. Ez messze a valaha készült legpontosabb BAO-mérés.

A DESI az arizonai Kitt Peak Nicholas U. Mayall 4 méteres távcsövére van szerelve. A műszer több ezer optikai szálon vezeti a fényt spektrográfokba, így az égbolton mért pozíciókból galaxisok és kvazárok millióinak spektrumát és vöröseltolódását készíti el.

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

Mi a DESI?

A **Dark Energy Spectroscopic Instrument** egy spektrográf az arizonai Kitt Peak Nicholas U. Mayall 4 méteres távcsövén. Nem közvetlenül látja a sötét energiát — ilyet semmi nem tud, hiszen a sötét energia nem bocsát ki fényt. Ehelyett egyszerre körülbelül 5,000 galaxis és kvazár spektrumát rögzíti, az egyes objektumok vöröseltolódását abból olvassa ki, hogyan nyújtotta meg fényüket a táguló világegyetem, majd több millió objektumból háromdimenziós térképet épít. A sötét energiára ezután abból következtetnek, hogyan mutatja a térkép a kozmikus tágulás időbeli változását. A teljes lánchoz — a robotikus szálaktól az akusztikus vonalzóig — lásd: Hogyan működik a DESI?.

Az eredményből az a cím terjedt el, hogy a sötét energia talán nem állandó — hogy a világegyetem tágulását gyorsító rejtélyes összetevő idővel *gyengülhet*, megrepesztve a standard kozmológiai modellt. Ez az állítás nem kitaláció, de könnyű túlértelmezni. Az őszinte változat konkrétabb és érdekesebb: a DESI saját vonalzója önmagában egyetért az egyszerű standard modellel. Valami újra utaló jel csak akkor jelenik meg, amikor a DESI-t más adatokkal kombináljuk — és a jel erőssége attól függ, melyik másik adathalmazt választjuk.

A DESI barionakusztikus vonalzója önmagában összeegyeztethető állandó sötét energiával, vagyis kozmológiai állandóval. Az *időben változó* sötét energia előnyben részesítése csak akkor jelenik meg, amikor a DESI-t a kozmikus mikrohullámú háttérrel és szupernóvamintával kombinálják — és erőssége attól változik, melyik szupernóvamintát használják.

Standard vonalzó, és a sötét energia változásának két módja

A BAO-skála *standard vonalzó*: mivel a korai világegyetem fizikájából ismerjük valódi hosszát, egy adott távolságban a valódi és látszólagos méretének összehasonlítása megmutatja, mennyit tágult addigra a világegyetem. Sok távolságban megmérve a vonalzó a teljes tágulástörténetet kirajzolja — éppen azt, amit a sötét energia szabályoz.
A standard ΛCDM modellben a sötét energia *kozmológiai állandó*: az üres tér állandó energiasűrűsége, amely soha nem változik. A fizikusok viselkedését az „állapotegyenlet” w paraméterével írják le, amely valódi kozmológiai állandó esetén mindenütt és mindig pontosan -1.
Ennek tesztelésére kétféleképpen lehet lazítani a feltételt. Az egyszerűbb esetben w más állandó értéket vehet fel, de időben továbbra is rögzített — ez a „wCDM”. Gazdagabb változatban w a világegyetem tágulásával változhat, két számmal leírva: w_0 a mai értéke, w_a pedig a változás üteme. Ez a „w_0w_aCDM” modell a $w_0 = -1,\ w_a = 0$ egyetlen pontban redukálódik ΛCDM-re. A $w_0 > -1$ és negatív w_a előnyben részesítése jelenti itt az „evolválódó sötét energiát”: olyan sötét energiát, amely a múltban erősebben taszított, és most gyengül.

Mit csináltak a szerzők?

- A DESI első évének adataiból — galaxisokból, kvazárokból és a Lyman-alfa erdőből — több mint hatmillió objektummal, hét vöröseltolódási tartományban, $0.1 < z < 4.2$ között mérték meg a BAO-skálát.
- **Vak elemzést** végeztek: a kozmológiai eredményt elrejtették addig, amíg a módszertan nem rögzült, hogy csökkentsék a megerősítési torzítást.
- A standard sík ΛCDM modellt először csak a DESI BAO-ra illesztették, majd ősrobbanás-nukleoszintézis priorral és a Planck, illetve ACT kozmikus mikrohullámú háttér (CMB) adataival együtt.
- Két irányban bővítették a modellt: állandó sötétenergia-w-vel (wCDM) és időben változó w_0w_a-val (w_0w_aCDM).
- Az időben változó modellt úgy tesztelték, hogy a DESI+CMB kombinációhoz egymás után három különböző Ia típusú szupernóva-katalógust adtak — Pantheon+, Union3 és DES-SN5YR —, nem pedig egyetlen választott mintát.
- Korlátokat adtak a neutrínók összesített tömegére, és ellenőrizték, hogyan változnak ezek, ha a sötétenergia-háttér eltérhet a ΛCDM-től.

Mit találtak?

- **A DESI BAO önmagában összhangban van a standard modellel.** Anyagsűrűségre $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ értéket ad, és ha a sötét energiának állandó w paramétert engedünk, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — lényegében pontosan a kozmológiai állandó -1 értékén.
- A CMB-vel és lencsézésével kombinálva a DESI $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ és $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} Hubble-állandót ad (68.52 ± 0.62, ha nukleoszintézissel és a CMB akusztikus skálájával párosítják).
- **Az időben változó modellben a kombinációk evolválódó sötét energiát részesítenek előnyben** — $w_0 > -1$ és $w_a < 0$. A preferencia DESI+CMB esetén 2.6σ, szupernóvaminta hozzáadásakor pedig Pantheon+, Union3, illetve DES-SN5YR esetén 2.5σ, 3.5σ és 3.9σ (a szigma azt méri, milyen messze van az eredmény a standard modell várakozásától; felfedezés állításához szokásosan 5σ kell, és még ez sem jelenti, hogy az értelmezés biztosan helyes — útmutató).
- Szabadon hagyva a neutrínók összesített tömegére nagyon szoros korlát adódik — DESI+CMB esetén 0.072 eV alatt (95%-os konfidencia) —, de a tanulmány világosan kimondja, hogy ez a korlát jelentősen lazul, ha a sötétenergia-háttér eltérhet a ΛCDM-től.

Mit nem bizonyít ez?

- **Nem** mutatja, hogy a sötét energia evolválódik. A DESI saját vonalzója összeegyeztethető kozmológiai állandóval; a változás jele csak *kombinált* illesztésekben és a gazdagabb, kétparaméteres modellben jelenik meg.

- **Nem** jelenti azt, hogy „a ΛCDM halott” vagy „Einstein tévedett”. A legerősebb szám, 3.9σ, alatta marad az 5σ hagyományos küszöbének, amelyet a fizikusok felfedezés előtt kérnek — és a standard modell önmagában jól illeszkedik a DESI-adatokhoz.
- Az eredmény **nem mintafüggetlen**. A szupernóva-katalógus cseréje 2.5σ és 3.9σ között mozgatja a szignifikanciát — több mint egy teljes szigmával. Ha egy jel nagysága ennyire függ attól, melyik külső adathalmazt illesztjük hozzá, az követendő jelzés, nem elkönyvelhető mérés.
- A DESI *önmagában* mutatott $w_0 > -1$ irányú elmozdulását **részben egyetlen anomális pont** hajtja — a z = 0.51 galaxisbin, amely kissé magasabban fekszik a ΛCDM várakozásánál. A tanulmány azonban itt elvégzi a szükséges ellenőrzést: statisztikai fluktuációként kezeli ezt a pontot, és megmutatja, hogy ha a DESI *összes* alacsony vöröseltolódású ($z < 0.6$) mérését a régebbi SDSS-eredményekre cserélik, a sötétenergia-eredmény változatlan marad. A furcsa pont a DESI önálló illesztését húzza, de **nem** tartja fenn a kombinált jelet. Független csoportok azóta részletesebben is vizsgálták szerepét. Ez a fenntartás tehát éppen ellentétes irányba mutat azzal, ahogyan néha elmesélik: az eredményt stressztesztelték a leganomálisabb adatpont ellen, és fennmaradt.
- A neutrínótömeg-korlát **nem modellfüggetlen ítélet**. Csak akkor ilyen szoros, ha a háttér tágulását ΛCDM-hez rögzítjük; ha ezt lazítjuk, a korlát is lazul.

Mennyire erős a bizonyíték?

- **Távolságmérésként nagyon erős.** A BAO-vonalzó a kozmológia egyik legtisztább eszköze, a DESI mérése a legpontosabb eddig, a vak elemzés pedig pontosan az a biztosíték, amelyet szeretnénk a várt válasz adatba olvasása ellen.
- **Sötétenergia-állításként valóban izgalmas, de nem döntő.** A DESI+CMB 2.6σ preferenciája, amely a legszigorúbb szupernóvamintával 3.9σ-ra nő, olyan eredmény, amely több távcsőidőt érdemel — nem olyan, amely modellt dönt meg. A valódi óvatossági ok a szupernóvaminták közötti eltérés; a szerzők érdemére legyen mondva, azt is ellenőrizték, hogy az egyetlen leganomálisabb BAO-pontjuk nem hajtja a következtetést.
- A tanulmány saját magával is óvatos: háromféle szignifikanciát közöl ahelyett, hogy csak a legnagyobbat idézné, és jelzi neutrínóeredményének modellfüggését. A túlzás, ahol van, az újramesélésben jelenik meg, nem a tanulmányban.

Miért fontos?

Negyed évszázadon át a „sötét energia” és a „kozmológiai állandó” szinte felcserélhető kifejezések voltak, mert minden mérés összeegyeztethető volt pontosan $w = -1$ értékkel. A DESI az első olyan pontosságú adathalmaz, amely más adatokkal kombinálva egyáltalán pontosan meg tudja kérdezni, változik-e ez a -1 — és nem egy lapos „nem” a válasz. Ez valódi változás abban, mire képesek az adatok, és ezért érdemel figyelmet az eredmény. Ugyanez a pontosság azonban azt is láthatóvá teszi, mennyire feltételes a jel: egyes adatkombinációkban él, másokban halk, és mindenekelőtt érzékeny arra, melyik szupernóva-katalógust párosítjuk a DESI-hez. A helyes hozzáállás sem az elutasítás, sem egy túl korán bejelentett forradalom. A következő, nagyobb DESI-adatközlést — a DR2 már 2025-ben

megjelent — és független szupernóvamintákat kell figyelni, hogy a sodródás erősödik-e vagy eltűnik. Így néz ki egy valódi „talán” a kozmológiában, és „talánként” érdemes közölni.

Röviden

A DESI több mint hatmillió objektumból a valaha készült legpontosabb barionakusztikus standard vonalzóval mérte meg a világegyetem tágulástörténetét. Önmagában ez a vonalzó egyetért a standard modellel, amelyben a sötét energia állandó. A kozmikus mikrohullámú háttérrel és szupernóvamintával kombinálva viszont megjelenik az időben változó sötét energia preferenciája — 2.6σ és 3.9σ között attól függően, melyik szupernóvamintát adják hozzá. Ez valós és érdekes jelzés, nem felfedezés: alatta marad a fizikusok által megkövetelt küszöbnek, és változik a hozzá párosított szupernóvaadatokkal. Lehetséges, hogy a sötét energia evolválódik. A DESI ezt a kérdést pontosan feltehetővé tette — még nem válaszolta meg.

Források

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