



The CLEAN PAPER

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

DESI's skarpeste kosmiske lineal, og et forsigtigt måske om mørk energi

DESI har målt universets udvidelseshistorie med den mest præcise akustiske baryonlineal, der nogensinde er bygget, ud fra seks millioner objekter. Alene stemmer den lineal overens med standardmodellen, hvor mørk energi er en konstant. Først når DESI kombineres med den kosmiske mikrobølgebaggrund og et supernovaudvalg, opstår en præference for udviklende mørk energi — på $2,6\sigma$ til $3,9\sigma$ afhængigt af hvilke supernovaer der tilføjes, under den tærskel fysikere kræver for en opdagelse og følsom over for hvilke data den pares med. Et reelt spørgsmål gjort præcist, ikke et svar.

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

En lineal lavet af lyd

Tidligt i universet, før der fandtes stjerner, klingede det hede plasma af almindeligt stof og lys. Trykbølger løb igennem det med mere end halvdelen af lysets hastighed, indtil universet blev koldt nok til, at atomer kunne dannes, og klangen stoppede — og fastfros en svag foretrukken afstand i fordelingen af stof. Den afstand, *lydhorisonten*, er i dag omkring 150 megaparsec (cirka 490 millioner lysår), og den viser sig som et let overskud af galakser adskilt af netop den afstand, i alle retninger og til alle epoker. Kosmologer kalder det baryon-akustiske oscillationer, eller BAO, og bruger det som en standardlineal: mål hvor stor den fastfrosne skala ser ud til at være på himlen ved forskellige afstande, og du kortlægger, hvor hurtigt universet har udvidet sig gennem sin historie.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) blev bygget for at måle den lineal bedre, end nogen andre har gjort. Dets første datasæt kortlægger BAO-skalaen i galakser, kvasarer og Lyman-alfa-skoven af fjerne gasskyer — over seks millioner objekter, spredt over syv rødforskydningsintervaller fra rødforskydning 0,1 til 4,2. For at holde menneskelige forventninger ude af resultatet kørte teamet analysen *blindt* og skjulte det kosmologiske svar for sig selv, indtil metoderne var låst. Det er, med bred margin, den mest præcise BAO-måling, der er lavet.



DESI er monteret på Nicholas U. Mayall 4-meter-teleskopet ved Kitt Peak, Arizona. Instrumentet fører tusindvis af optiske fibre ind i spektrografer og omdanner positioner på himlen til spektre og rødforskydninger for millioner af galakser og kvasarer.

Hvad er DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument er en spektrograf på Nicholas U. Mayall 4-meter-teleskopet ved Kitt Peak, Arizona. Det ser ikke mørk energi direkte — det kan intet gøre, da mørk energi ikke udsender noget lys. I stedet registrerer det spektrene for omkring 5.000 galakser og kvasarer på én gang, aflæser hvert objekts rødforskydning ud fra, hvordan det ekspanderende univers har strakt dets lys, og opbygger et tredimensionelt kort over millioner af dem. Mørk energi udledes derefter af, hvordan det kort viser den kosmiske ekspansion ændre sig over tid. For hele kæden — fra de robotstyrede fibre til den akustiske lineal — se Sådan virker DESI.

Overskriften, der bredte sig derfra, var, at mørk energi måske ikke er en konstant — at det mystiske noget, der accelererer universets udvidelse, kunne *svækkes* over tid, hvilket ville sprække den kosmologiske standardmodel. Den påstand er ikke opdigtet, men den er let at overfortolke. Den ærlige version er mere specifik og mere interessant: DESIs egen lineal stemmer alene overens med den enkle standardmodel. Antydningen af noget nyt viser sig kun, når man kombinerer DESI med andre data — og hvor stærk antydningen ser ud til at være, afhænger af hvilke andre data man vælger.

DESI's baryon-akustiske lineal alene er forenelig med konstant mørk energi (en kosmologisk konstant). Præferencen for *udviklende* mørk energi opstår kun, når DESI kombineres med den kosmiske mikrobølgebaggrund og et supernovaudvalg — og styrken skifter afhængigt af hvilket supernovaudvalg der bruges.

Standardlineal, og de to måder mørk energi kan variere på

BAO-skalaen er en *standardlineal*: fordi vi kender dens sande længde ud fra fysikken i det tidlige univers, fortæller sammenligningen mellem dens sande længde og dens tilsyneladende størrelse ved en given afstand os, hvor meget universet havde udvidet sig på det tidspunkt. Målt over mange afstande sporer linealen hele udvidelseshistorien — hvilket er det, mørk energi styrer.

I standardmodellen, kaldet Λ CDM, er mørk energi en *kosmologisk konstant*: en fast energitæthed i det tomme rum, som aldrig ændrer sig. Fysikere betegner dens opførsel med en "tilstandsligning"-parameter, w , som for en sand kosmologisk konstant er nøjagtig -1 , overalt og altid.

For at teste dette kan man lempe på det på to måder. Den enkleste er at lade w være en anden konstant (stadig fast i tid) — dette er "wCDM". Den rigere er at lade w ændre sig, efterhånden som universet udvider sig, beskrevet med to tal: w_0 , dens værdi i dag, og w_a , hvor hurtigt den driver. Denne " w_0w_a CDM"-model reducerer til Λ CDM ved det ene punkt $w_0 = -1$, $w_a = 0$. En præference for w_0 større end -1 med w_a negativ er, hvad "udviklende mørk energi" betyder her: mørk energi, der var mere frastødende i fortiden og nu aftager.

Hvad forfatterne gjorde

- Målte BAO-skalaen fra DESIs første års data — galakser, kvasarer og Lyman-alfa-skoven — over seks millioner objekter i syv rødforskydningsintervaller, der spænder fra $0,1 < z < 4,2$.
- Kørte analysen **blindt** og skjulte det kosmologiske resultat, indtil metodikken var fastlagt, for at beskytte mod bekræftelsesbias.
- Tilpassede den flade standard- Λ CDM-model til DESI BAO alene, og derefter i kombination med et big bang-nukleosyntese-prior og den kosmiske mikrobølgebaggrund (CMB) fra Planck og ACT.
- Udvidede modellen på to måder: en konstant mørk-energi- w (w CDM), og en tidsvarierende $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$ CDM).
- Testede den tidsvarierende model ved at kombinere DESI+CMB med tre forskellige type Ia-supernova-sammenstillinger på skift — Pantheon+, Union3 og DES-SN5YR — i stedet for at vælge én.
- Satte grænser for den summerede neutrinomasse og undersøgte, hvordan disse grænser flytter sig, hvis mørk-energi-baggrunden tillades at variere.

Hvad de fandt

- **DESI BAO alene er forenelig med standardmodellen.** De giver en materietæthed $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$, og når mørk energi tillades en konstant w , $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$ — hvilket ligger lige på den kosmologiske konstants værdi -1 .
- Kombineret med CMB og dens linsning giver DESI $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ og en Hubble-konstant $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$ når den kombineres med nukleosyntese og CMBs akustiske skala i stedet).
- **I den tidsvarierende model foretrækker kombinationerne udviklende mørk energi** — $w_0 > -1$ og $w_a < 0$. Præferencen er $2,6\sigma$ for DESI+CMB, og når et supernovaudvalg tilføjes, bliver det $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ eller $3,9\sigma$ for henholdsvis Pantheon+, Union3 eller DES-SN5YR (sigma måler, hvor langt et resultat ligger fra standardmodellens forventning; 5σ er den sædvanlige tærskel for en påstået opdagelse, og det er ikke en påstand om, at fortolkningen er korrekt — guide).
- Frit tilladt er den summerede neutrinomasse afgrænset stramt — under $0,072 \text{ eV}$ (95 % konfidens) for DESI+CMB — men artiklen er eksplicit om, at denne grænse løsnes betydeligt, hvis mørk-energi-baggrunden tillades at afvige fra Λ CDM.

Hvad dette ikke beviser

- Det viser **ikke**, at mørk energi udvikler sig. DESIs egen lineal er forenelig med en kosmologisk konstant; antydningen af udvikling viser sig kun i *kombinerede* tilpasninger, og kun i den rigere to-parameter-model.
- Det betyder **ikke**, at “ Λ CDM er død”, eller at “Einstein tog fejl”. Det stærkeste tal, $3,9\sigma$, ligger under den 5σ -konvention, som fysikere kræver, før noget kan kaldes en opdagelse — og standardmod-

ellen forbliver en god tilpasning til DESI alene.

- Resultatet er **ikke** uafhængigt af udvalg. At skifte supernova-sammenstilling flytter signifikansen fra $2,5\sigma$ til $3,9\sigma$ — mere end en hel sigma. Et signal, hvis størrelse afhænger så meget af hvilket eksternt datasæt man kobler på, er en antydning der bør følges, ikke en måling der kan lægges til grund.
- Den DESI-*alene*-tendens mod $w_0 > -1$ drives **delvist af et enkelt afvigende punkt** — galaksebinnet ved rødforskydning 0,51, som ligger en smule højt sammenlignet med Λ CDM. Men det er her, artiklen gør sit hjemmearbejde: den behandler dette punkt som en statistisk fluktuation og viser, at det at erstatte *alle* DESIs lav-rødforskydningsmålinger ($z < 0,6$) med de ældre SDSS-målinger lader mørk-energi-resultatet stå uændret. Det afvigende punkt trækker DESI alene; det **understøtter ikke** den kombinerede antydning. (Uafhængige grupper har siden set nærmere på dets rolle.) Så dette forbehold peger den modsatte vej af, hvordan det nogle gange fortælles: resultatet blev stresstestet mod sit mest afvigende datapunkt og holdt.
- Neutrinomasse-grænsen er **ikke** en modelafhængig dom. Den er stram kun, hvis baggrundsudvidelsen holdes fast til Λ CDM; lempes på det, lempes grænsen med det.

Hvor stærk er evidensen

- **Meget stærk som en afstandsmåling.** BAO-linealen er et af de reneste værktøjer i kosmologi, DESIs er den mest præcise hidtil, og den blinde analyse er præcis den beskyttelse, man ønsker mod at læse et håbet-på svar ind i dataene.
- **Genuint interessant, men ikke afgørende, som en mørk-energi-påstand.** En præference på $2,6\sigma$ fra DESI+CMB, der stiger til $3,9\sigma$ med det mest begrænsende supernovaudvalg, er den slags resultat, der giver mere teleskoptid — ikke den slags, der vælter en model. Den ærlige grund til forsigtighed er spredningen mellem supernovaudvalgene; det er til forfatterens ære, at de også tjekkede, at deres enkelte mest afvigende BAO-punkt ikke driver resultatet — netop det hjemmearbejde en sådan påstand kræver.
- Artiklen er forsigtig med sig selv: den rapporterer signifikansen på tre måder frem for at citere den største, og den flager modelafhængigheden i sit neutrinoresultat. Overfortolkningen, hvor den findes, ligger i genfortællingen, ikke i artiklen.

Hvorfor det betyder noget

I et kvart århundrede er “mørk energi” og “kosmologisk konstant” blevet brugt næsten synonymt, fordi enhver måling har været forenelig med et w på nøjagtig -1 . DESI er det første datasæt præcist nok til, at det, kombineret med andre, overhovedet kan *spørge*, om denne -1 driver — og få et svar, der ikke er et klart nej. Det er et reelt skifte i, hvad dataene kan, og det er derfor resultatet fortjener opmærksomhed. Men den samme præcision er det, der lader os se, hvor betinget antydningen er: levende i nogle datakombinationer, stille i andre, og frem for alt følsom over for, hvilket supernovakatalog der pares med DESI. Den rette holdning er hverken afvisning eller en for tidligt proklameret revolution. Det er at følge med i den næste, større DESI-udgivelse — DR2, allerede udgivet i 2025 — og

de uafhængige supernovaudvalg, og se, om driften styrkes eller forsvinder. Sådan ser et ægte måske ud i kosmologi, og det fortjener at blive rapporteret som et måske.

Kort resumé

DESI har målt universets udvidelseshistorie med den bedste baryon-akustiske lineal, der nogensinde er bygget, ud fra seks millioner objekter. Alene stemmer den lineal overens med standardmodellen, hvor mørk energi er en konstant. Kombiner den med den kosmiske mikrobølgebaggrund og et supernovaudvalg, og en præference opstår for mørk energi, der ændrer sig over tid — på $2,6\sigma$ til $3,9\sigma$, afhængigt af hvilke supernovaer der tilføjes. Det er en reel og interessant antydning, ikke en opdagelse: den forbliver under den tærskel, fysikere kræver, og den skifter afhængigt af hvilke supernovadata den pares med. Mørk energi kan være i udvikling. DESI har gjort dette til et spørgsmål, det er værd at stille præcist — endnu ikke et spørgsmål, det har besvaret.

Kilder

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>