



The CLEAN PAPER

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

DESI's skarpeste kosmiske linjal, og et forsiktig kanskje om mørk energi

DESI har målt universets ekspansjonshistorie med den mest presise akustiske baryonlinjal som noensinne er bygget, fra seks millioner objekter. Alene stemmer den linjalen overens med standardmodellen der mørk energi er en konstant. Først når DESI kombineres med den kosmiske bakgrunnsstrålingen og et supernovautvalg, dukker en preferanse for utviklende mørk energi opp — på $2,6\sigma$ til $3,9\sigma$ avhengig av hvilke supernovaer som legges til, under terskelen fysikere krever for en oppdagelse og følsom for hvilke data den pares med. Et reelt spørsmål gjort presist, ikke et svar.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · 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 linjal laget av lyd

Tidlig i universet, før det fantes stjerner, ringte det hete plasmaet av vanlig materie og lys. Trykkbølger gikk gjennom det med mer enn halve lyshastigheten, helt til universet ble kaldt nok til at atomer kunne dannes og ringingen stoppet — og fastfroset en svak foretrukket avstand i fordelingen av materie. Den avstanden, *lydhorisonten*, er i dag omtrent 150 megaparsec (rundt 490 millioner lysår), og den viser seg som et lite overskudd av galakser med nettopp den avstanden mellom seg, i alle retninger og til alle epoker. Kosmologer kaller det baryon-akustiske oscillasjoner, eller BAO, og bruker det som en standardlinjal: mål hvor stor den fastfrosne skalaen ser ut til å være på himmelen ved ulike avstander, og du kartlegger hvor raskt universet har utvidet seg gjennom sin historie.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) ble bygget for å måle den linjalen bedre enn noen andre har gjort. Dets første datasett kartlegger BAO-skalaen i galakser, kvasarer og Lyman-alfa-skogen av fjerne gasskyer — over seks millioner objekter, spredt over sju rødforskyvningsintervaller fra rødforskyvning 0,1 til 4,2. For å holde menneskelige forventninger unna resultatet kjørte teamet analysen *blindt*, og skjulte det kosmologiske svaret for seg selv til metodene var låst. Det er, med god margin, den mest presise BAO-målingen som er gjort.



DESI er montert på Nicholas U. Mayall 4-meter-teleskopet ved Kitt Peak, Arizona. Instrumentet mater tusenvis av optiske fibre inn i spektrografer, og omdanner posisjoner på himmelen til spektre og rødforskyvninger for millioner av galakser og kvasarer.

Hva 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 ingenting gjøre, siden mørk energi ikke avgir noe lys. I stedet registrerer det spektrene til omkring 5000 galakser og kvasarer samtidig, leser av hvert objekts rødforskyvning ut fra hvordan det ekspanderende universet har strukket lyset dets, og bygger et tredimensjonalt kart over millioner av dem. Mørk energi utledes deretter fra hvordan det kartet viser at den kosmiske ekspansjonen endrer seg over tid. For hele kjeden — fra de robotstyrte fibrene til den akustiske linjalen — se Slik fungerer DESI.

Overskriften som spredte seg derfra var at mørk energi kanskje ikke er en konstant — at det mystiske noe som akselererer universets ekspansjon kan *svettes* over tid, og dermed sprekke den standard kosmologiske modellen. Den påstanden er ikke oppdiktet, men den er lett å overtolke. Den ærlige versjonen er mer spesifikk, og mer interessant: DESIs egen linjal, alene, stemmer overens med den enkle standardmodellen. Antydningen om noe nytt dukker bare opp når man kombinerer DESI med andre data — og hvor sterk antydningen ser ut til å være, avhenger av hvilke andre data man velger.

DESI's baryon-akustiske linjal alene er forenlig med konstant mørk energi (en kosmologisk konstant). Preferansen for *utviklende* mørk energi dukker bare opp når DESI kombineres med den kosmiske bakgrunnsstrålingen og et supernovautvalg — og styrken skifter med hvilket supernovautvalg som brukes.

Standardlinjal, og de to måtene mørk energi kan variere på

BAO-skalaen er en *standardlinjal*: fordi vi kjenner dens sanne lengde fra fysikken i det tidlige universet, forteller sammenligningen mellom den sanne lengden og dens tilsynelatende størrelse ved en gitt avstand oss hvor mye universet hadde utvidet seg på det tidspunktet. Målt over mange avstander sporer linjalen hele ekspansjonshistorien — som er det mørk energi styrer.

I standardmodellen, kalt Λ CDM, er mørk energi en *kosmologisk konstant*: en fast energitetthet i det tomme rommet som aldri endrer seg. Fysikere betegner dens oppførsel med en «tilstandslikning»-parameter, w , som for en sann kosmologisk konstant er nøyaktig -1 , overalt og alltid.

For å teste dette kan man løsne på det på to måter. Den enkleste er å la w være en annen konstant (fortsatt fast i tid) — dette er « w CDM». Den rikere er å la w endre seg etter hvert som universet ekspanderer, beskrevet med to tall: w_0 , verdien i dag, og w_a , hvor raskt den driver. Denne « w_0w_a CDM»-modellen reduseres til Λ CDM ved det ene punktet $w_0 = -1$, $w_a = 0$. En preferanse for w_0 større enn -1 med w_a negativ er hva «utviklende mørk energi» betyr her: mørk energi som var mer frastøtende i fortiden og som nå avtar.

Hva forfatterne gjorde

- Målte BAO-skalaen fra DESIs første års data — galakser, kvasarer og Lyman-alfa-skogen — over seks millioner objekter i sju rødforskyvningsintervaller som spenner fra $0,1 < z < 4,2$.
- Kjørte analysen **blindt**, og skjulte det kosmologiske resultatet til metodikken var fastlagt, for å verne mot bekreftelsesskjevhet.
- Tilpasset standard flat Λ CDM-modell til DESI BAO alene, og deretter i kombinasjon med et big bang-nukleosyntese-prior og den kosmiske bakgrunnsstrålingen (CMB) fra Planck og ACT.
- Utvidet modellen på to måter: en konstant mørk-energi- w (w CDM), og en tidsvarierende $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$ CDM).
- Testet den tidsvarierende modellen ved å kombinere DESI+CMB med tre ulike type Ia-supernova-sammenstillinger etter tur — Pantheon+, Union3 og DES-SN5YR — i stedet for å velge bare én.
- Satte grenser for den summerte nøytrinomassen, og sjekket hvordan disse grensene beveger seg dersom mørk-energi-bakgrunnen tillates å variere.

Hva de fant

- **DESI BAO alene er forenlig med standardmodellen.** De gir en materietetthet $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$, og når mørk energi tillates en konstant w , $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$ — som ligger rett på den kosmologiske konstantens verdi -1 .
- Kombinert med CMB og dens lensing gir 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 modellen foretrekker kombinasjonene utviklende mørk energi** — $w_0 > -1$ og $w_a < 0$. Preferansen er $2,6\sigma$ for DESI+CMB, og når et supernovautvalg legges til blir 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 vanlige terskelen for en påstått oppdagelse, og det er ikke et utsagn om at tolkningen er riktig — guide).
- Fritt tillatt er den summerte nøytrinomassen begrenset stramt — under $0,072 \text{ eV}$ (95 % konfidens) for DESI+CMB — men artikkelen er eksplisitt på at denne grensen løsner betydelig dersom mørk-energi-bakgrunnen tillates å avvike fra Λ CDM.

Hva dette ikke beviser

- Det viser **ikke** at mørk energi er i endring. DESIs egen linjal er forenlig med en kosmologisk konstant; antydningen om utvikling dukker bare opp i *kombinerte* tilpasninger, og bare i den rikere to-parameter-modellen.
- Det betyr **ikke** at « Λ CDM er død» eller at «Einstein tok feil». Det sterkeste tallet, $3,9\sigma$, ligger under den 5σ -konvensjonen fysikere krever før noe kan kalles en oppdagelse — og standardmodellen forblir en god tilpasning til DESI alene.

- Resultatet er **ikke** uavhengig av utvalg. Å bytte supernova-sammenstilling flytter signifikansen fra $2,5\sigma$ til $3,9\sigma$ — mer enn en hel sigma. Et signal hvis størrelse avhenger så mye av hvilket eksternt datasett man kobler på, er en antydning å forfølge, ikke en måling å legge til grunn.
- Den DESI-*alene*-tendensen mot $w_0 > -1$ drives **delvis av et enkelt avvikende punkt** — galaksebinet ved rødforskyvning 0,51, som ligger noe høyt sammenlignet med Λ CDM. Men det er her artikkelen gjør hjemmeleksen sin: den behandler det punktet som en statistisk fluktuasjon, og viser at det å erstatte *alle* DESIs lav-rødforskyvnings-målinger ($z < 0,6$) med de eldre SDSS-målingene lar mørk-energi-resultatet stå uendret. Det avvikende punktet trekker DESI alene; det **understøtter ikke** den kombinerte antydningen. (Uavhengige grupper har siden sett nærmere på dets rolle.) Så dette forbeholdet peker motsatt vei av det som noen ganger fortelles: resultatet ble stresstestet mot sitt mest avvikende datapunkt, og holdt.
- Nøytrinomasse-grensen er **ikke** en modelluavhengig dom. Den er stram bare dersom bakgrunnsekspansjonen holdes fast til Λ CDM; løsner man på det, løsner grensen med det.

Hvor sterk er beviskraften

- **Svært sterk som avstandsmåling.** BAO-linjalene er et av de reneste verktøyene i kosmologi, DESIs er den mest presise hittil, og den blinde analysen er nettopp den beskyttelsen man ønsker mot å lese et håpet-på svar inn i dataene.
- **Genuint interessant, men ikke avgjørende, som en mørk-energi-påstand.** En preferanse på $2,6\sigma$ fra DESI+CMB, som stiger til $3,9\sigma$ med det mest begrensende supernovautvalget, er den typen resultat som fortjener mer teleskoptid — ikke den typen som velter en modell. Den ærlige grunnen til forsiktighet er spredningen mellom supernovautvalgene; til forfatternes ære sjekket de også at det enkelte mest avvikende BAO-punktet ikke driver resultatet — nettopp den hjemmeleksen en slik påstand trenger.
- Artikkelen er forsiktig med seg selv: den rapporterer signifikansen på tre måter i stedet for å oppgi den største, og den flagger modellavhengigheten i nøytrinoresultatet. Overtolkningen, der den finnes, ligger i gjenfortellingen, ikke i artikkelen.

Hvorfor det spiller en rolle

I et kvart århundre har «mørk energi» og «kosmologisk konstant» blitt brukt nesten om hverandre, fordi hver eneste måling har vært forenlig med en w på nøyaktig -1 . DESI er det første datasettet presist nok til at det, kombinert med andre, i det hele tatt kan *spørre* om denne -1 driver — og få et svar som ikke er et klart nei. Det er et reelt skifte i hva dataene kan gjøre, og det er derfor resultatet fortjener oppmerksomhet. Men den samme presisjonen er det som lar oss se hvor betinget antydningen er: levende i noen datakombinasjoner, stille i andre, og først og fremst følsom for hvilken supernova-katalog som pares med DESI. Den rette holdningen er verken avvising eller en for tidlig proklamert revolusjon. Det er å følge med på den neste, større DESI-utgivelsen — DR2, allerede utgitt i 2025 — og de uavhengige supernovautvalgene, og se om driften styrker seg eller forsvinner. Dette er hvordan et genuint kanskje ser ut i kosmologi, og det fortjener å rapporteres som et kanskje.

Kort sammendrag

DESI har målt universets ekspansjonshistorie med den beste baryon-akustiske linjalen som noensinne er bygget, fra seks millioner objekter. Alene stemmer den linjalen overens med standardmodellen der mørk energi er en konstant. Kombiner den med den kosmiske bakgrunnsstrålingen og et supernovautvalg, og en preferanse dukker opp for mørk energi som endrer seg over tid — på $2,6\sigma$ til $3,9\sigma$, avhengig av hvilke supernovaer som legges til. Det er en reell og interessant antydning, ikke en oppdagelse: den forblir under terskelen fysikere krever, og den skifter med hvilke supernovadata den pares med. Mørk energi kan være i endring. DESI har gjort dette til et spørsmål verdt å stille presist — ikke ennå et spørsmål det har besvart.

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>