



The CLEAN PAPER

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

DESI's schärfstes kosmisches Lineal und ein sorgfältiges Vielleicht zur Dunklen Energie

DESI hat die Expansionsgeschichte des Universums mit dem präzisesten je gebauten baryonisch-akustischen Lineal vermessen, aus sechs Millionen Objekten. Für sich genommen stimmt dieses Lineal mit dem Standardmodell überein, in dem Dunkle Energie eine Konstante ist. Erst wenn DESI mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund und einer Supernova-Stichprobe kombiniert wird, erscheint eine Präferenz für sich entwickelnde Dunkle Energie — bei $2,6\sigma$ bis $3,9\sigma$, je nachdem, welche Supernovae hinzugefügt werden, unterhalb der Schwelle, die Physiker für eine Entdeckung verlangen, und empfindlich für die Daten, mit denen sie gepaart wird. Eine echte Frage, präzise gestellt, keine Antwort.

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

Ein Lineal aus Schall

Früh im Universum, bevor es Sterne gab, klang das heiße Plasma aus gewöhnlicher Materie und Licht. Druckwellen liefen mit mehr als halber Lichtgeschwindigkeit hindurch, bis das Universum so weit abgekühlt war, dass sich Atome bilden konnten und das Klingen verstummte — und dabei eine schwache bevorzugte Distanz in die Verteilung der Materie einfro. Diese Distanz, der *Schallhorizont*, beträgt heute etwa 150 Megaparsec (rund 490 Millionen Lichtjahre) und zeigt sich als leichter Überschuss an Galaxien, die durch genau diese Spanne getrennt sind, in jeder Richtung und zu jeder Epoche. Kosmologen nennen sie die baryonische akustische Oszillation, kurz BAO, und nutzen sie als Standardlineal: Misst man, wie groß diese eingefrorene Skala am Himmel in verschiedenen Entfernungen erscheint, so kartiert man, wie schnell sich das Universum im Laufe seiner Geschichte ausgedehnt hat.

Das Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) wurde gebaut, um dieses Lineal besser zu vermessen, als es je zuvor jemandem gelungen ist. Seine erste Datenveröffentlichung kartiert die BAO-Skala in Galaxien, Quasaren und dem Lyman-Alpha-Wald ferner Gaswolken — über sechs Millionen Objekte, verteilt auf sieben Rotverschiebungsintervalle von Rotverschiebung 0,1 bis 4,2. Um menschliche Erwartungen aus dem Ergebnis herauszuhalten, führte das Team die Analyse *blind* durch und hielt die kosmologische Antwort vor sich selbst verborgen, bis die Methoden festgeschrieben waren. Es ist mit weitem Abstand die präziseste BAO-Messung, die je gemacht wurde.



DESI ist am Nicholas-U.-Mayall-4-Meter-Teleskop auf dem Kitt Peak in Arizona montiert. Das Instrument führt Tausende optischer Fasern in Spektrographen und verwandelt Positionen am Himmel in Spektren und

Rotverschiebungen für Millionen von Galaxien und Quasaren.

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

Was ist DESI

Das **Dark Energy Spectroscopic Instrument** ist ein Spektrograph am Nicholas-U.-Mayall-4-Meter-Teleskop auf dem Kitt Peak in Arizona. Es sieht Dunkle Energie nicht direkt — das kann nichts, denn Dunkle Energie sendet kein Licht aus. Stattdessen zeichnet es die Spektren von rund 5.000 Galaxien und Quasaren gleichzeitig auf, liest die Rotverschiebung jedes Objekts daran ab, wie das expandierende Universum sein Licht gedehnt hat, und erstellt eine dreidimensionale Karte von Millionen von ihnen. Auf die Dunkle Energie wird dann daraus geschlossen, wie diese Karte zeigt, dass sich die kosmische Expansion über die Zeit verändert. Für die vollständige Kette — von den robotischen Fasern bis zum akustischen Lineal — siehe Wie DESI funktioniert.

Die Schlagzeile, die davon um die Welt ging, lautete, Dunkle Energie sei womöglich keine Konstante — dass das rätselhafte Etwas, das die Expansion des Universums beschleunigt, mit der Zeit *schwächer* werden könnte und damit das kosmologische Standardmodell zum Bersten bringt. Diese Behauptung ist nicht erfunden, aber sie lässt sich leicht überinterpretieren. Die ehrliche Version ist spezifischer, und interessanter: DESIs eigenes Lineal stimmt für sich genommen mit dem schlichten Standardmodell überein. Der Hinweis auf etwas Neues zeigt sich erst, wenn man DESI mit anderen Daten kombiniert — und wie stark der Hinweis wirkt, hängt davon ab, welche anderen Daten man wählt.

DESI's baryonisch-akustisches Lineal ist für sich allein mit einer konstanten Dunklen Energie (einer kosmologischen Konstante) vereinbar. Die Präferenz für *sich entwickelnde* Dunkle Energie tritt erst auf, wenn DESI mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund und einer Supernova-Stichprobe kombiniert wird — und ihre Stärke verschiebt sich je nachdem, welche Supernova-Stichprobe verwendet wird.

Standardlineal und die zwei Arten, wie Dunkle Energie variieren kann

Die BAO-Skala ist ein *Standardlineal*: Weil wir ihre wahre Länge aus der Physik des frühen Universums kennen, verrät uns der Vergleich ihrer wahren Länge mit ihrer scheinbaren Größe in einer gegebenen Entfernung, wie stark sich das Universum bis dahin ausgedehnt hatte. Über viele Entfernungen gemessen, zeichnet das Lineal die gesamte Expansionsgeschichte nach — und genau die wird von der Dunklen Energie bestimmt.

Im Standardmodell, Λ CDM genannt, ist Dunkle Energie eine *kosmologische Konstante*: eine feste Energiedichte des leeren Raums, die sich niemals ändert. Physiker beschreiben ihr Verhalten mit einem Parameter der „Zustandsgleichung“, w , der für eine echte kosmologische Konstante überall und immer exakt -1 beträgt.

Um das zu testen, kann man die Annahme auf zwei Arten lockern. Die einfachere ist, w eine andere Konstante sein zu lassen (weiterhin zeitlich fest) — das ist „ w CDM“. Die reichere ist, w sich mit der Expansion des Universums ändern zu lassen, beschrieben durch zwei Zahlen: w_0 , seinen heutigen Wert, und w_a , wie schnell er driftet. Dieses „ $w_0 w_a$ CDM“-Modell reduziert

sich am einzelnen Punkt $w_0 = -1$, $w_a = 0$ auf Λ CDM. Eine Präferenz für w_0 größer als -1 bei negativem w_a ist das, was „sich entwickelnde Dunkle Energie“ hier bedeutet: Dunkle Energie, die in der Vergangenheit stärker abstoßend war und jetzt nachlässt.

Was die Autoren getan haben

- Sie haben die BAO-Skala aus DESIs erstem Datenjahr gemessen — Galaxien, Quasare und der Lyman-Alpha-Wald — über sechs Millionen Objekte in sieben Rotverschiebungsintervallen im Bereich $0,1 < z < 4,2$.
- Sie führten die Analyse **blind** durch und hielten das kosmologische Ergebnis verborgen, bis die Methodik festgelegt war, um sich gegen Bestätigungsfehler zu wappnen.
- Sie passten das flache Λ CDM-Standardmodell an DESI-BAO allein an, dann in Kombination mit einem Prior aus der Urknall-Nukleosynthese und dem kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB) von Planck und ACT.
- Sie erweiterten das Modell auf zwei Arten: ein konstantes Dunkle-Energie- w (w CDM) und ein zeitlich veränderliches $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$ CDM).
- Sie testeten das zeitlich veränderliche Modell, indem sie DESI+CMB nacheinander mit drei verschiedenen Kompilationen von Typ-Ia-Supernovae kombinierten — Pantheon+, Union3 und DES-SN5YR — statt eine einzige auszuwählen.
- Sie setzten Grenzen für die Summe der Neutrinomassen und prüften, wie sich diese Grenzen verschieben, wenn der Dunkle-Energie-Hintergrund variieren darf.

Was sie herausfanden

- **DESI-BAO allein sind mit dem Standardmodell vereinbar.** Sie ergeben eine Materiedichte $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$ und, wenn der Dunklen Energie ein konstantes w erlaubt wird, $w = -0,99$ ($+0,15/-0,13$) — genau auf dem Wert -1 der kosmologischen Konstante.
- Kombiniert mit dem CMB und dessen Gravitationslinseneffekt ergibt DESI $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ und eine Hubble-Konstante $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$, wenn stattdessen mit der Nukleosynthese und der akustischen Skala des CMB gepaart).
- **Im zeitlich veränderlichen Modell bevorzugen die Kombinationen sich entwickelnde Dunkle Energie** — $w_0 > -1$ und $w_a < 0$. Die Präferenz beträgt $2,6\sigma$ für DESI+CMB, und wenn eine Supernova-Stichprobe hinzukommt, wird sie zu $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ bzw. $3,9\sigma$ für Pantheon+, Union3 oder DES-SN5YR (Sigma misst, wie weit ein Ergebnis von der Erwartung des Standardmodells entfernt liegt; 5σ ist die übliche Schwelle für eine behauptete Entdeckung, und es ist keine Aussage darüber, dass die Interpretation korrekt ist — Leitfaden).
- Wird sie frei gelassen, ist die Summe der Neutrinomassen eng begrenzt — unter $0,072 \text{ eV}$ (95 % Konfidenz) für DESI+CMB — doch das Paper sagt ausdrücklich, dass sich diese Grenze erheblich lockert, wenn der Dunkle-Energie-Hintergrund von Λ CDM abweichen darf.

Was das nicht beweist

- Es zeigt **nicht**, dass sich Dunkle Energie entwickelt. DESIs eigenes Lineal ist mit einer kosmologischen Konstante vereinbar; der Hinweis auf Entwicklung erscheint nur in *kombinierten* Fits und nur im reicheren Zwei-Parameter-Modell.
- Es bedeutet **nicht** „ Λ CDM ist tot“ oder „Einstein hat sich geirrt“. Die stärkste Zahl, $3,9\sigma$, liegt unter der 5σ -Konvention, die Physiker verlangen, bevor sie etwas eine Entdeckung nennen – und das Standardmodell bleibt eine gute Beschreibung von DESI allein.
- Das Ergebnis ist **nicht** stichprobenunabhängig. Der Austausch der Supernova-Kompilation verschiebt die Signifikanz von $2,5\sigma$ auf $3,9\sigma$ – mehr als ein volles Sigma. Ein Signal, dessen Größe derart davon abhängt, welchen externen Datensatz man anfügt, ist ein Hinweis, dem man nachgehen sollte, keine Messung, die man verbuchen kann.
- Die Neigung von DESI *allein* zu $w_0 > -1$ wird **teilweise von einem einzigen anomalen Punkt** getrieben – dem Galaxienintervall bei Rotverschiebung 0,51, das gegenüber Λ CDM leicht zu hoch liegt. Doch genau hier macht das Paper seine Hausaufgaben: Es behandelt diesen Punkt als statistische Fluktuation und zeigt, dass das Ersetzen *aller* DESI-Messungen bei niedriger Rotverschiebung ($z < 0,6$) durch die älteren SDSS-Messungen das Dunkle-Energie-Ergebnis unverändert lässt. Der auffällige Punkt zieht an DESI für sich allein; er stützt **nicht** den kombinierten Hinweis. (Unabhängige Gruppen haben seine Rolle seither genauer untersucht.) Dieser Vorbehalt schneidet also in die entgegengesetzte Richtung, als er manchmal erzählt wird: Das Ergebnis wurde gegen seine anomalsten Daten einem Stresstest unterzogen – und hielt stand.
- Die Neutrinomassen-Grenze ist **kein** modellunabhängiges Urteil. Sie ist nur dann eng, wenn die Hintergrundexpansion auf Λ CDM festgehalten wird; lockert man das, lockert sich die Grenze mit.

Wie belastbar sind die Belege?

- **Sehr stark als Entfernungsmessung.** Das BAO-Lineal ist eines der saubersten Werkzeuge der Kosmologie, DESIs ist das bislang präziseste, und die blinde Analyse ist genau die Absicherung, die man sich gegen das Hineinlesen einer erhofften Antwort in die Daten wünscht.
- **Wirklich faszinierend, aber nicht entscheidend, als Aussage über Dunkle Energie.** Eine $2,6\sigma$ -Präferenz aus DESI+CMB, die mit dem restriktivsten Supernova-Datensatz auf $3,9\sigma$ steigt, ist die Art von Ergebnis, die mehr Teleskopzeit einbringt – nicht die Art, die ein Modell umstürzt. Der ehrliche Grund zur Vorsicht ist die Streuung über die Supernova-Stichproben; zu ihrem Verdienst haben die Autoren auch geprüft, dass ihr einzelner anomaler BAO-Punkt das Ergebnis nicht treibt – genau die Hausaufgaben, die eine solche Behauptung braucht.
- Das Paper geht sorgsam mit sich selbst um: Es berichtet die Signifikanz auf drei Arten, statt die größte zu zitieren, und es weist auf die Modellabhängigkeit seines Neutrino-Ergebnisses hin. Die Übertreibung, wo es sie gibt, liegt in der Nacherzählung, nicht im Paper.

Warum es wichtig ist

Ein Vierteljahrhundert lang wurden „Dunkle Energie“ und „kosmologische Konstante“ nahezu austauschbar verwendet, weil jede Messung mit einem w von exakt -1 vereinbar war. DESI ist der erste Datensatz, der präzise genug ist, um – kombiniert mit anderen – überhaupt zu *fragen*, ob dieses -1 driftet, und eine Antwort zu bekommen, die kein glattes Nein ist. Das ist eine echte Verschiebung dessen, was die Daten leisten können, und deshalb verdient das Ergebnis Aufmerksamkeit. Doch dieselbe Präzision lässt uns auch sehen, wie bedingt der Hinweis ist: lebendig in manchen Datenkombinationen, still in anderen und vor allem empfindlich dafür, welcher Supernova-Katalog mit DESI gepaart wird. Die richtige Haltung ist weder Abtun noch eine zu früh ausgerufene Revolution. Sie besteht darin, die nächste, größere DESI-Veröffentlichung – DR2, bereits 2025 erschienen – und die unabhängigen Supernova-Stichproben zu beobachten und zu sehen, ob sich die Drift verfestigt oder verblasst. So sieht ein echtes Vielleicht in der Kosmologie aus, und es verdient, als Vielleicht berichtet zu werden.

Kurz zusammengefasst

DESI hat die Expansionsgeschichte des Universums mit dem besten je gebauten baryonisch-akustischen Lineal vermessen, aus sechs Millionen Objekten. Für sich genommen stimmt dieses Lineal mit dem Standardmodell überein, in dem Dunkle Energie eine Konstante ist. Kombiniert man es mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund und einer Supernova-Stichprobe, entsteht eine Präferenz für Dunkle Energie, die sich mit der Zeit ändert – bei $2,6\sigma$ bis $3,9\sigma$, je nachdem, welche Supernovae man hinzufügt. Das ist ein echter und interessanter Hinweis, keine Entdeckung: Er bleibt unter der Schwelle, die Physiker verlangen, und er verschiebt sich damit, mit welchen Supernova-Daten man ihn paart. Dunkle Energie könnte sich entwickeln. DESI hat daraus eine Frage gemacht, die es sich lohnt, präzise zu stellen – noch keine Frage, die es beantwortet hat.

Quellen

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>