



The CLEAN PAPER

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

Il righello cosmico più preciso di DESI, e un cauto forse sull'energia oscura

DESI ha misurato la storia dell'espansione dell'universo con il più preciso righello barionico-acustico finora costruito, da sei milioni di oggetti. Da solo, quel righello concorda con il modello standard in cui l'energia oscura è una costante. Solo quando DESI viene combinato con il fondo cosmico a microonde e un campione di supernove appare una preferenza per energia oscura evolutiva: da $2,6\sigma$ a $3,9\sigma$ a seconda delle supernove aggiunte, sotto la soglia che i fisici richiedono per una scoperta e sensibile ai dati con cui viene accoppiato. Una domanda reale resa precisa, non una risposta.

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

Un righello fatto di suono

All'inizio dell'universo, prima che esistessero le stelle, il plasma caldo di materia ordinaria e luce risuonava. Onde di pressione lo attraversavano a più di metà della velocità della luce, finché l'universo si raffreddò abbastanza da formare atomi e il risuonare si fermò, congelando una debole distanza preferita nella distribuzione della materia. Quella distanza, l'*orizzonte sonoro*, oggi è circa 150 megaparsec (circa 490 milioni di anni luce), e compare come un lieve eccesso di galassie separate da quella scala, in ogni direzione e a ogni epoca. I cosmologi la chiamano oscillazione acustica barionica, o BAO, e la usano come righello standard: misuri quanto grande appare quella scala congelata nel cielo a distanze diverse, e tracci quanto velocemente l'universo si è espanso nella sua storia.

Il Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) è stato costruito per misurare quel righello meglio di chiunque altro. Il suo primo rilascio dati mappa la scala BAO in galassie, quasar e nella foresta Lyman-alpha di nubi di gas lontane: più di sei milioni di oggetti, distribuiti in sette bin di redshift da 0,1 a 4,2. Per tenere le aspettative umane fuori dal risultato, il team ha condotto l'analisi *blind*, nascondendo a se stesso la risposta cosmologica finché i metodi non erano fissati. È, con ampio margine, la misura BAO più precisa mai fatta.



DESI è montato sul telescopio Nicholas U. Mayall da 4 metri a Kitt Peak, in Arizona. Lo strumento alimenta migliaia di fibre ottiche in spettrografi, trasformando posizioni nel cielo in spettri e redshift per milioni di galassie e quasar.

Che cos'è DESI

Il **Dark Energy Spectroscopic Instrument** è uno spettrografo sul telescopio Nicholas U. Mayall da 4 metri a Kitt Peak, in Arizona. Non vede direttamente l'energia oscura: nulla può farlo, perché l'energia oscura non emette luce. Invece registra gli spettri di circa 5.000 galassie e quasar alla volta, legge il redshift di ciascun oggetto da come l'espansione dell'universo ha stirato la sua luce, e costruisce una mappa tridimensionale di milioni di questi oggetti. L'energia oscura viene poi inferita da come quella mappa mostra il cambiamento dell'espansione cosmica nel tempo. Per l'intera catena - dalle fibre robotiche al righello acustico - vedi How DESI works.

Il titolo che ne è circolato era che l'energia oscura potrebbe non essere una costante: che la cosa misteriosa che accelera l'espansione dell'universo potrebbe *indebolirsi* nel tempo, incrinando il modello cosmologico standard. Questa affermazione non è inventato, ma è facile leggerlo troppo. La versione onesta è più specifica e più interessante: il righello di DESI, da solo, concorda con il modello più semplice. L'indizio di qualcosa di nuovo appare solo quando combini DESI con altri dati - e quanto forte sembri l'indizio dipende da quali altri dati scegli.

Il righello barionico-acustico di DESI, da solo, è compatibile con un'energia oscura costante (una costante cosmologica). La preferenza per un'energia oscura *evolutiva* emerge solo quando DESI viene combinato con il fondo cosmico a microonde e un campione di supernove, e la sua forza cambia a seconda del campione di supernove usato.

Righello standard, e i due modi in cui l'energia oscura può variare

La scala BAO è un *righello standard*: poiché conosciamo la sua vera lunghezza dalla fisica dell'universo primordiale, confrontare quella lunghezza vera con la sua dimensione apparente a una certa distanza ci dice quanto l'universo si fosse espanso allora. Misurato a molte distanze, il righello traccia l'intera storia dell'espansione: proprio ciò che l'energia oscura governa.

Nel modello standard, chiamato Λ CDM, l'energia oscura è una *costante cosmologica*: una densità fissa di energia dello spazio vuoto che non cambia mai. I fisici ne etichettano il comportamento con un parametro di "equazione di stato", w , che per una vera costante cosmologica è esattamente -1 , ovunque e sempre.

Per testarlo, puoi rilassarlo in due modi. Il più semplice è lasciare che w sia un'altra costante (sempre fissa nel tempo): questo è "wCDM". Il più ricco è lasciare che w cambi mentre l'universo si espande, descritto da due numeri: w_0 , il suo valore oggi, e w_a , quanto rapidamente deriva. Questo modello " w_0w_a CDM" si riduce a Λ CDM nel singolo punto $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Una preferenza per w_0 maggiore di -1 con w_a negativo è ciò che qui significa "energia oscura evolutiva": energia oscura che era più repulsiva in passato e ora si sta attenuando.

Che cosa hanno fatto gli autori

- Hanno misurato la scala BAO dal primo anno di dati DESI - galassie, quasar e foresta Lyman-alpha - su più di sei milioni di oggetti in sette bin di redshift che coprono $0,1 < z < 4,2$.
- Hanno condotto l'analisi **blind**, nascondendo il risultato cosmologico finché la metodologia non era fissata, per proteggersi dal bias di conferma.
- Hanno adattato il modello standard piatto Λ CDM ai soli BAO di DESI, poi in combinazione con un prior di nucleosintesi del big bang e con il fondo cosmico a microonde (CMB) di Planck e ACT.
- Hanno esteso il modello in due modi: una w dell'energia oscura costante (w CDM), e una $w_0 w_a$ variabile nel tempo ($w_0 w_a$ CDM).
- Hanno testato il modello variabile nel tempo combinando DESI+CMB con tre diverse compilazioni di supernove di tipo Ia a turno - Pantheon+, Union3 e DES-SN5YR - invece di sceglierne una.
- Hanno posto limiti alla massa totale dei neutrini e controllato come quei limiti si spostano se si permette allo sfondo di energia oscura di variare.

Che cosa hanno trovato

- **I BAO di DESI da soli sono compatibili con il modello standard.** Danno una densità di materia $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$ e, quando si permette all'energia oscura una w costante, $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$: proprio sul valore di costante cosmologica -1 .
- Combinato con il CMB e il suo lensing, DESI dà $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ e una costante di Hubble $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$ quando accoppiato con nucleosintesi e scala acustica del CMB).
- **Nel modello variabile nel tempo, le combinazioni preferiscono energia oscura evolutiva:** $w_0 > -1$ e $w_a < 0$. La preferenza è $2,6\sigma$ per DESI+CMB, e quando viene aggiunto un campione di supernove diventa $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ o $3,9\sigma$ per Pantheon+, Union3 o DES-SN5YR rispettivamente (sigma misura quanto un risultato dista dall'aspettativa del modello standard; 5σ è la soglia usuale per rivendicare una scoperta, e non è una dichiarazione che l'interpretazione sia corretta — guida).
- Lasciata libera, la massa totale dei neutrini è vincolata strettamente - sotto $0,072 \text{ eV}$ (95% di confidenza) per DESI+CMB - ma l'articolo è esplicito che questo vincolo si allenta molto se si permette allo sfondo di energia oscura di deviare da Λ CDM.

Che cosa non prova

- **Non** mostra che l'energia oscura stia evolvendo. Il righello di DESI è compatibile con una costante cosmologica; l'indizio di evoluzione appare solo nei fit *combinati*, e solo nel modello più ricco a due parametri.
- **Non** significa “ Λ CDM è morto” o “Einstein aveva torto”. Il numero più forte, $3,9\sigma$, è sotto la convenzione dei 5σ che i fisici richiedono prima di chiamare qualcosa una scoperta, e il modello

standard resta un buon fit per DESI da solo.

- Il risultato **non** è indipendente dal campione. Cambiare la compilazione di supernove sposta la significatività da $2,5\sigma$ a $3,9\sigma$: più di un sigma pieno. Un segnale la cui dimensione dipende così tanto dal dataset esterno che gli agganci è un indizio da inseguire, non una misura da mettere in banca.
- La tendenza di DESI *da solo* verso $w_0 > -1$ è guidata **in parte da un singolo punto anomalo**: il bin di galassie a redshift 0,51, che sta leggermente alto rispetto a Λ CDM. Ma qui l'articolo fa i compiti: tratta quel punto come una fluttuazione statistica e mostra che sostituire *tutte* le misure DESI a basso redshift ($z < 0,6$) con quelle più vecchie di SDSS lascia invariato il risultato sull'energia oscura. Il punto strano tira DESI da solo; **non** sostiene l'indizio combinato. (Gruppi indipendenti hanno poi guardato più a fondo il suo ruolo.) Quindi questa cautela va nella direzione opposta a come a volte viene raccontato: il risultato è stato messo alla prova proprio sul dato più anomalo, e ha retto.
- Il limite sulla massa dei neutrini **non** è un verdetto indipendente dal modello. È stretto solo se l'espansione di fondo viene tenuta a Λ CDM; rilassalo, e il vincolo si rilassa con esso.

Quanto sono solide le prove?

- **Molto forte come misura di distanza.** Il righello BAO è uno degli strumenti più puliti della cosmologia, quello di DESI è il più preciso finora, e l'analisi blind è esattamente la salvaguardia che vuoi contro il leggere nei dati una risposta sperata.
- **Davvero intrigante, ma non decisiva, come affermazione sull'energia oscura.** Una preferenza di $2,6\sigma$ da DESI+CMB, che sale a $3,9\sigma$ con il set di supernove più vincolante, è il tipo di risultato che merita più tempo di telescopio, non quello che rovescia un modello. La ragione onesta della cautela è la dispersione tra campioni di supernove; a loro merito, gli autori hanno anche controllato che il loro singolo punto BAO più anomalo non guidi il risultato: proprio il compito necessario per un'affermazione del genere.
- L'articolo è attento con se stesso: riporta la significatività in tre modi invece di citare solo la più grande, e segnala la dipendenza dal modello del suo risultato sui neutrini. L'esagerazione, dove esiste, sta nel racconto, non nell'articolo.

Perché conta

Per un quarto di secolo, “energia oscura” e “costante cosmologica” sono stati usati quasi come sinonimi, perché ogni misura era compatibile con una w esattamente uguale a -1 . DESI è il primo dataset abbastanza preciso da poter persino *chiedere*, combinato con altri, se quel -1 derivi - e ottenere una risposta che non è un no piatto. È un vero cambiamento in ciò che i dati possono fare, ed è per questo che il risultato merita attenzione. Ma la stessa precisione ci fa vedere quanto sia condizionato l'indizio: vivo in alcune combinazioni di dati, silenzioso in altre, e sensibile soprattutto a quale catalogo di supernove viene accoppiato con DESI. La postura giusta non è né scartarlo né annunciare presto una rivoluzione. È guardare il prossimo rilascio DESI più grande - DR2, già uscito nel 2025 - e

i campioni indipendenti di supernove, e vedere se la deriva si rafforza o svanisce. Questo è l'aspetto di un vero forse in cosmologia, e vale la pena raccontarlo come un forse.

In breve

DESI ha misurato la storia dell'espansione dell'universo con il miglior righello barionico-acustico finora costruito, da sei milioni di oggetti. Da solo, quel righello concorda con il modello standard in cui l'energia oscura è una costante. Combinalo con il fondo cosmico a microonde e un campione di supernove, e appare una preferenza per un'energia oscura che cambia nel tempo: da $2,6\sigma$ a $3,9\sigma$, a seconda di quali supernove aggiungi. È un indizio reale e interessante, non una scoperta: resta sotto la soglia richiesta dai fisici e si sposta con i dati di supernove a cui lo abbiniamo. L'energia oscura potrebbe evolvere. DESI l'ha resa una domanda da porre con precisione, non ancora una domanda a cui abbia risposto.

Fonti

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>