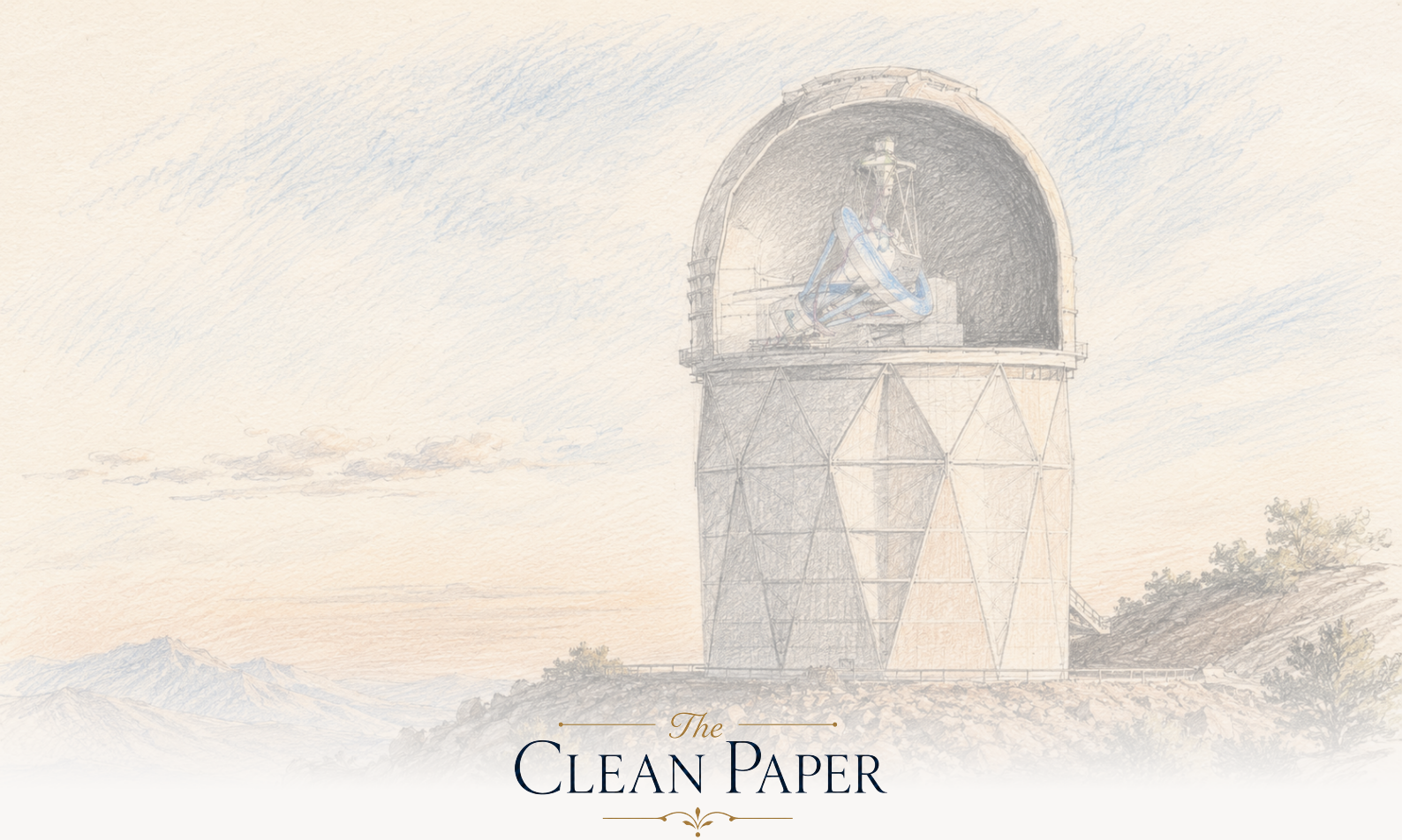




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Ο ακριβέστερος κοσμικός χάρακας του DESI και ένα προσεκτικό «ίσως» για τη σκοτεινή ενέργεια

Το DESI μέτρησε την ιστορία διαστολής του σύμπαντος με τον ακριβέστερο μέχρι σήμερα βαρυονικό ακουστικό χάρακα, χρησιμοποιώντας έξι εκατομμύρια αντικείμενα. Από μόνος του, ο χάρακας συμφωνεί με το καθιερωμένο μοντέλο όπου η σκοτεινή ενέργεια είναι σταθερή. Μόνο όταν το DESI συνδυάζεται με την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου και ένα δείγμα υπερκαινοφανών εμφανίζεται προτίμηση για εξελισσόμενη σκοτεινή ενέργεια — από 2.6σ έως 3.9σ ανάλογα με το ποια υπερκαινοφανή προστίθενται, κάτω από το όριο που απαιτούν οι φυσικοί για ανακάλυψη και ευαίσθητη στα δεδομένα με τα οποία συνδυάζεται. Ένα πραγματικό ερώτημα που έγινε ακριβές, όχι μια απάντηση.

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

Ένας χάρακας φτιαγμένος από ήχο

Στο πρώιμο σύμπαν, πριν υπάρξουν άστρα, το καυτό πλάσμα συνηθισμένης ύλης και φωτός αντηχούσε. Κύματα πίεσης κινούνταν μέσα του με περισσότερο από τη μισή ταχύτητα του φωτός, ώσπου το σύμπαν ψύχθηκε αρκετά ώστε να σχηματιστούν άτομα και ο ήχος σταμάτησε — παγώνοντας μια αχνή προτιμώμενη απόσταση στην κατανομή της ύλης. Αυτή η απόσταση, ο ηχητικός ορίζοντας, είναι σήμερα περίπου 150 megaparsec (περίπου 490 εκατομμύρια έτη φωτός) και εμφανίζεται ως μια μικρή περίσσεια γαλαξιών που χωρίζονται από αυτή την απόσταση, προς κάθε κατεύθυνση και σε κάθε εποχή. Οι κοσμολόγοι το ονομάζουν βαρυονική ακουστική ταλάντωση, ή BAO, και το χρησιμοποιούν ως πρότυπο χάρακα: μετρώντας πόσο μεγάλο φαίνεται αυτό το παγωμένο μήκος στον ουρανό σε διαφορετικές αποστάσεις, χαρτογραφούν πόσο γρήγορα διαστελλόταν το σύμπαν στην ιστορία του.

Το Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) κατασκευάστηκε για να μετρήσει αυτόν τον χάρακα καλύτερα από οποιονδήποτε άλλο. Η πρώτη δημοσίευση δεδομένων του χαρτογραφεί την κλίμακα BAO σε γαλαξίες, κβάζαρ και στο δάσος Lyman-alpha μακρινών νεφών αερίου — περισσότερα από έξι εκατομμύρια αντικείμενα σε επτά διαστήματα ερυθρομετάθεσης από 0.1 έως 4.2. Για να κρατήσει τις προσδοκίες των ερευνητών έξω από το αποτέλεσμα, η ομάδα έκανε την ανάλυση τυφλά, κρύβοντας από τον εαυτό της την κοσμολογική απάντηση ώσπου να κλειδώσουν οι μέθοδοι. Είναι, με μεγάλη διαφορά, η ακριβέστερη μέτρηση BAO που έχει γίνει.



Το DESI είναι τοποθετημένο στο τηλεσκόπιο Nicholas U. Mayall 4 μέτρων στο Kitt Peak της Αριζόνα. Το

όργανο οδηγεί χιλιάδες οπτικές ίνες σε φασματογράφους, μετατρέποντας θέσεις στον ουρανό σε φάσματα και ερυθρομεταθέσεις για εκατομμύρια γαλαξίες και κβάζαρ.

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

Τι είναι το DESI

Το **Dark Energy Spectroscopic Instrument** είναι ένας φασματογράφος στο τηλεσκόπιο Nicholas U. Mayall 4 μέτρων στο Kitt Peak της Αριζόνα. Δεν βλέπει άμεσα τη σκοτεινή ενέργεια — τίποτα δεν μπορεί, αφού η σκοτεινή ενέργεια δεν εκπέμπει φως. Αντί γι' αυτό καταγράφει ταυτόχρονα τα φάσματα περίπου 5.000 γαλαξιών και κβάζαρ, διαβάζει την ερυθρομετάθεση κάθε αντικειμένου από το πόσο έχει τεντώσει το φως του η διαστολή του σύμπαντος και κατασκευάζει έναν τρισδιάστατο χάρτη εκατομμυρίων αντικειμένων. Η σκοτεινή ενέργεια συμπεραίνεται από το πώς αυτός ο χάρτης δείχνει την κοσμική διαστολή να αλλάζει με τον χρόνο. Για ολόκληρη την αλυσίδα — από τις ρομποτικές ίνες μέχρι τον ακουστικό χάρακα — δείτε Πώς λειτουργεί το DESI.

Ο τίτλος που ταξίδεψε από το αποτέλεσμα ήταν ότι η σκοτεινή ενέργεια ίσως δεν είναι σταθερή — ότι το μυστηριώδες συστατικό που επιταχύνει τη διαστολή του σύμπαντος θα μπορούσε να εξασθενεί με τον χρόνο, ραγίζοντας το καθιερωμένο κοσμολογικό μοντέλο. Ο ισχυρισμός δεν είναι επισημειωμένος, αλλά είναι εύκολο να διαβαστεί περισσότερο απ' όσο αντέχει. Η έντιμη εκδοχή είναι πιο συγκεκριμένη και πιο ενδιαφέρουσα: ο ίδιος ο χάρακας του DESI, από μόνος του, συμφωνεί με το απλό καθιερωμένο μοντέλο. Η ένδειξη για κάτι νέο εμφανίζεται μόνο όταν συνδυάσεις το DESI με άλλα δεδομένα — και το πόσο ισχυρή φαίνεται εξαρτάται από το ποια άλλα δεδομένα επιλέγεις.

Ο βαρυονικός ακουστικός χάρακας του DESI από μόνος του είναι συμβατός με σταθερή σκοτεινή ενέργεια (κοσμολογική σταθερά). Η προτίμηση για εξελισσόμενη σκοτεινή ενέργεια εμφανίζεται μόνο όταν το DESI συνδυάζεται με την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου και ένα δείγμα υπερκαινοφανών — και η ισχύς της αλλάζει ανάλογα με το ποιο δείγμα υπερκαινοφανών χρησιμοποιείται.

Πρότυπος χάρακας και οι δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί να μεταβάλλεται η σκοτεινή ενέργεια

Η κλίμακα BAO είναι ένας πρότυπος χάρακας: επειδή γνωρίζουμε το πραγματικό μήκος της από τη φυσική του πρώιμου σύμπαντος, συγκρίνοντας το πραγματικό της μήκος με το φαινόμενο μέγεθός της σε μια δεδομένη απόσταση μπορούμε να καταλάβουμε πόσο είχε διασταλεί το σύμπαν μέχρι τότε. Μετρημένος σε πολλές αποστάσεις, ο χάρακας ιχνηλατεί ολόκληρη την ιστορία διαστολής — αυτό που κυβερνά η σκοτεινή ενέργεια. Στο καθιερωμένο μοντέλο, που λέγεται Λ CDM, η σκοτεινή ενέργεια είναι μια κοσμολογική σταθερά: σταθερή ενεργειακή πυκνότητα του κενού χώρου που δεν αλλάζει ποτέ. Οι φυσικοί περιγράφουν τη συμπεριφορά της με μια παράμετρο «καταστατικής εξίσωσης», w , η οποία για μια αληθινή κοσμολογική σταθερά είναι ακριβώς -1 , παντού και πάντα.

Για να το ελέγξουμε, μπορούμε να χαλαρώσουμε αυτή την παραδοχή με δύο τρόπους. Ο απλούστερος είναι να αφήσουμε το w να είναι κάποια άλλη σταθερή τιμή (αλλά ακόμη αμετάβλητη στον χρόνο) — αυτό είναι το « w CDM». Ο πλουσιότερος είναι να αφήσουμε το w να αλλάζει καθώς διαστέλλεται το σύμπαν, περιγράφοντάς το με δύο αριθμούς: w_0 , την τιμή του σήμερα, και w_a , το πόσο γρήγορα μετατοπίζεται. Αυτό το μοντέλο « w_0w_a CDM» ανάγεται στο Λ CDM στο μοναδικό σημείο $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Μια προτίμηση για w_0 μεγαλύτερο από -1 και w_a αρνητικό είναι αυτό που εδώ σημαίνει «εξελισσόμενη σκοτεινή ενέργεια»: σκοτεινή ενέργεια που ήταν πιο απωστική στο παρελθόν και τώρα εξασθενεί.

Τι έκαναν οι συγγραφείς

- Μέτρησαν την κλίμακα BAO από το πρώτο έτος δεδομένων του DESI — γαλαξίες, κβάζαρ και το δάσος Lyman-alpha — σε περισσότερα από έξι εκατομμύρια αντικείμενα μέσα σε επτά διαστήματα ερυθρομετάθεσης που καλύπτουν $0.1 < z < 4.2$.
- Έκαναν την ανάλυση τυφλά, αποκρύπτοντας το κοσμολογικό αποτέλεσμα μέχρι να οριστικοποιηθεί η μεθοδολογία, ως προστασία από τη μεροληψία επιβεβαίωσης.
- Προσάρμοσαν το τυπικό επίπεδο μοντέλο Λ CDM πρώτα μόνο στα BAO του DESI και έπειτα σε συνδυασμό με έναν εκ των προτέρων περιορισμό από τη νουκλεοσύνθεση της Μεγάλης Έκρηξης και την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου (CMB) από Planck και ACT.
- Επέκτειναν το μοντέλο με δύο τρόπους: ένα σταθερό w για τη σκοτεινή ενέργεια (w CDM) και ένα χρονικά μεταβαλλόμενο w_0w_a (w_0w_a CDM).
- Δοκίμασαν το χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο συνδυάζοντας διαδοχικά DESI+CMB με τρεις διαφορετικές συλλογές υπερκαινοφανών τύπου Ia — Pantheon+, Union3 και DES-SN5YR — αντί να επιλέξουν μόνο μία.
- Έθεσαν όρια στο άθροισμα των μαζών των νετρίνων και έλεγξαν πώς μετακινούνται αυτά τα όρια αν επιτραπεί να μεταβάλλεται το υπόβαθρο της σκοτεινής ενέργειας.

Τι βρήκαν

- Τα BAO του DESI από μόνα τους είναι συμβατά με το καθιερωμένο μοντέλο. Δίνουν πυκνότητα ύλης $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, και όταν επιτρέπεται στη σκοτεινή ενέργεια ένα σταθερό w , $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — ακριβώς πάνω στην τιμή -1 της κοσμολογικής σταθεράς.
- Σε συνδυασμό με το CMB και τη βαρυτική φακοποίηση του, το DESI δίνει $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ και σταθερά Hubble $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (68.52 ± 0.62 όταν συνδυάζεται αντί γι' αυτό με τη νουκλεοσύνθεση και την ακουστική κλίμακα του CMB).
- Στο χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο, οι συνδυασμοί προτιμούν εξελισσόμενη σκοτεινή ενέργεια — $w_0 > -1$ και $w_a < 0$. Η προτίμηση είναι 2.6σ για DESI+CMB και, όταν προστεθεί δείγμα υπερκαινοφανών, γίνεται 2.5σ, 3.5σ ή 3.9σ για Pantheon+, Union3 ή

DES-SN5YR αντίστοιχα (το σ μετρά πόσο απέχει ένα αποτέλεσμα από την προσδοκία του καθιερωμένου μοντέλου· 5σ είναι το συνηθισμένο όριο για να ανακοινωθεί ανακάλυψη και δεν αποτελεί δήλωση ότι η ερμηνεία είναι σωστή — οδηγός).

- Αν αφεθεί ελεύθερο, το άθροισμα των μαζών των νετρίνων περιορίζεται αυστηρά — κάτω από 0.072 eV (95% εμπιστοσύνη) για DESI+CMB — αλλά η εργασία δηλώνει ρητά ότι αυτό το όριο χαλαρώνει σημαντικά αν επιτραπεί στο υπόβαθρο της σκοτεινής ενέργειας να αποκλίνει από το Λ CDM.

Τι δεν αποδεικνύει

- Δεν δείχνει ότι η σκοτεινή ενέργεια εξελίσσεται. Ο ίδιος ο χάρακας του DESI είναι συμβατός με κοσμολογική σταθερά· η ένδειξη εξέλιξης εμφανίζεται μόνο σε συνδυασμένες προσαρμογές και μόνο στο πλουσιότερο μοντέλο δύο παραμέτρων.
- Δεν σημαίνει «το Λ CDM πέθανε» ή «ο Einstein έκανε λάθος». Ο ισχυρότερος αριθμός, 3.9σ, βρίσκεται κάτω από τη σύμβαση των 5σ που απαιτούν οι φυσικοί πριν ονομάσουν κάτι ανακάλυψη — και το καθιερωμένο μοντέλο παραμένει καλή προσαρμογή μόνο για τα δεδομένα DESI.
- Το αποτέλεσμα **δεν είναι ανεξάρτητο από το δείγμα**. Η αλλαγή της συλλογής υπερκαινοφανών μετακινεί τη σημαντικότητα από 2.5σ σε 3.9σ — περισσότερο από ένα ολόκληρο σ . Ένα σήμα του οποίου το μέγεθος εξαρτάται τόσο από το ποιο εξωτερικό σύνολο δεδομένων προσθέτεις είναι ένδειξη που αξίζει να ακολουθηθεί, όχι μέτρηση που μπορείς ήδη να θεωρήσεις δεδομένη.
- Η τάση του DESI **μόνου** του προς $w_0 > -1$ οφείλεται **εν μέρει σε ένα μόνο ανώμαλο σημείο** — το διάστημα γαλαξιών σε ερυθρομετάθεση 0.51, που βρίσκεται λίγο ψηλότερα από το Λ CDM. Όμως εδώ η εργασία κάνει τον απαραίτητο έλεγχο: αντιμετωπίζει το σημείο ως στατιστική διακύμανση και δείχνει ότι η αντικατάσταση όλων των μετρήσεων χαμηλής ερυθρομετάθεσης ($z < 0.6$) του DESI με τις παλαιότερες του SDSS αφήνει αμετάβλητο το αποτέλεσμα για τη σκοτεινή ενέργεια. Το περίεργο σημείο τραβά το DESI όταν εξετάζεται μόνο του· **δεν στηρίζει τη συνδυασμένη ένδειξη**. (Ανεξάρτητες ομάδες έχουν έκτοτε εξετάσει πιο προσεκτικά τον ρόλο του.) Άρα αυτή η επιφύλαξη λειτουργεί αντίθετα απ' όσο μερικές φορές παρουσιάζεται: το αποτέλεσμα δοκιμάστηκε απέναντι στο πιο ανώμαλο δεδομένο και άντεξε.
- Το όριο στη μάζα των νετρίνων **δεν είναι συμπέρασμα ανεξάρτητο από το μοντέλο**. Είναι αυστηρό μόνο αν η διαστολή υποβάθρου κρατηθεί στο Λ CDM· χαλαρώστε αυτή την παραδοχή και χαλαρώνει μαζί και το όριο.

Πόσο ισχυρά είναι τα στοιχεία

- Πολύ ισχυρά ως **μέτρηση απόστασης**. Ο χάρακας BAO είναι ένα από τα καθαρότερα εργαλεία της κοσμολογίας, του DESI είναι ο ακριβέστερος μέχρι σήμερα και η τυφλή ανάλυση είναι ακριβώς η δικλείδα που θέλεις απέναντι στο να διαβάσεις στα δεδομένα

την απάντηση που ελπίζεις.

- **Πραγματικά συναρπαστικά, αλλά όχι αποφασιστικά, ως ισχυρισμός για τη σκοτεινή ενέργεια.** Μια προτίμηση 2.6σ από DESI+CMB που ανεβαίνει σε 3.9σ με το πιο περιοριστικό σύνολο υπερκαινοφανών είναι το είδος αποτελέσματος που κερδίζει περισσότερο χρόνο τηλεσκοπίου — όχι εκείνο που ανατρέπει ένα μοντέλο. Ο έντιμος λόγος για προσοχή είναι η διασπορά ανάμεσα στα δείγματα υπερκαινοφανών προς τιμήν τους, οι συγγραφείς έλεγξαν επίσης ότι το πιο ανώμαλο σημείο BAO δεν οδηγεί το αποτέλεσμα — ακριβώς ο έλεγχος που χρειάζεται ένας τέτοιος ισχυρισμός.
- Η εργασία είναι προσεκτική με τον εαυτό της: αναφέρει τη σημαντικότητα με τρεις τρόπους αντί να παραθέσει μόνο τη μεγαλύτερη και επισημαίνει την εξάρτηση του αποτελέσματος για τα νετρίνα από το μοντέλο. Η υπερβολή, όπου υπάρχει, βρίσκεται στην αναδιήγηση και όχι στην εργασία.

Γιατί έχει σημασία

Για ένα τέταρτο του αιώνα, οι όροι «σκοτεινή ενέργεια» και «κοσμολογική σταθερά» χρησιμοποιούνται σχεδόν εναλλακτικά, επειδή κάθε μέτρηση ήταν συμβατή με w ακριβώς -1 . Το DESI είναι το πρώτο σύνολο δεδομένων αρκετά ακριβές ώστε, σε συνδυασμό με άλλα, να μπορεί καν να ρωτήσει αν αυτό το -1 μεταβάλλεται — και να πάρει μια απάντηση που δεν είναι ένα ξερό όχι. Αυτό είναι πραγματική αλλαγή στο τι μπορούν να κάνουν τα δεδομένα και γι' αυτό το αποτέλεσμα αξίζει προσοχή. Όμως η ίδια ακρίβεια μάς επιτρέπει να δούμε πόσο υπό όρους είναι η ένδειξη: ζωντανή σε ορισμένους συνδυασμούς δεδομένων, ήσυχη σε άλλους και ευαίσθητη πάνω απ' όλα στο ποιος κατάλογος υπερκαινοφανών συνδυάζεται με το DESI. Η σωστή στάση δεν είναι ούτε απόρριψη ούτε πρόωρη ανακήρυξη επανάστασης. Είναι να παρακολουθήσουμε την επόμενη, μεγαλύτερη δημοσίευση DESI — το DR2, που έχει ήδη κυκλοφορήσει από το 2025 — και τα ανεξάρτητα δείγματα υπερκαινοφανών, για να δούμε αν η μεταβολή θα ενισχυθεί ή θα χαθεί. Έτσι μοιάζει ένα γνήσιο «ίσως» στην κοσμολογία, και αξίζει να παρουσιαστεί ως «ίσως».

Καθαρή σύνοψη

Το DESI έχει μετρήσει την ιστορία διαστολής του σύμπαντος με τον καλύτερο βαρυονικό ακουστικό χάρακα που έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα, χρησιμοποιώντας έξι εκατομμύρια αντικείμενα. Από μόνος του, αυτός ο χάρακας συμφωνεί με το καθιερωμένο μοντέλο όπου η σκοτεινή ενέργεια είναι σταθερή. Συνδυάστε τον με την κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου και ένα δείγμα υπερκαινοφανών και εμφανίζεται προτίμηση για σκοτεινή ενέργεια που αλλάζει με τον χρόνο — από 2.6σ έως 3.9σ, ανάλογα με το ποια υπερκαινοφανή προσθέτετε. Είναι μια πραγματική και ενδιαφέρουσα ένδειξη, όχι ανακάλυψη: παραμένει κάτω από το όριο που απαιτούν οι φυσικοί και μεταβάλλεται ανάλογα με τα δεδομένα υπερκαινοφανών που συνδυάζονται μαζί της. Η σκοτεινή ενέργεια ίσως εξελίσσεται. Το DESI έκανε αυτή την ερώτηση αξία ακριβούς διατύπωσης — δεν την έχει ακόμη απαντήσει.

Πηγές

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>