



The CLEAN PAPER

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

הסרגל הקוסמי החד ביותר של DESI — ו"אולי" זהיר לגבי אנרגיה אפלה

DESI מדד את היסטוריית התפשטות היקום באמצעות סרגל התנודות האקוסטיות הבאריוניות המדויק ביותר שנבנה עד כה, מתוך שישה מיליון עצמים. בפני עצמו, הסרגל מתאים למודל הסטנדרטי שבו אנרגיה אפלה קבועה. רק כאשר משלבים את *DESI* עם קרינת הרקע הקוסמית ועם מדגם סופרנובות מופיעה העדפה לאנרגיה אפלה מתפתחת — בין $\sigma 2.6$ ל- $\sigma 3.9$ בהתאם לסופרנובות שמוסיפים, מתחת לסף שפיזיקאים דורשים לגילוי ורגישה לנתונים שמצרפים. שאלה אמיתית שנעשתה מדויקת, לא תשובה.

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

סרגל שעשוי מצליל

בראשית היקום, לפני שהיו כוכבים, הפלזמה החמה של חומר רגיל ואור "צלצלה". גלי לחץ נעו בתוכה במהירות של יותר ממחצית מהירות האור, עד שהיקום התקרר מספיק כדי שאטומים ייווצרו והצלצול נעצר — והשאיר מרחק מועדף חלש שקפא בתוך התפלגות החומר. המרחק הזה, אופק הקול (sound horizon), הוא כיום בערך 150 מגה-פארסק (כ-490 מיליון שנות אור), והוא מופיע כעודף קטן של זוגות גלקסיות המופרדות בערך במרחק הזה, בכל הכיוונים ובכל תקופה קוסמית. קוסמולוגים קוראים לתופעה תנודה אקוסטית באריזונית, או BAO, ומשתמשים בה כסרגל תקני: מודדים כמה גדול נראה הסולם הקפוא בשמים במרחקים שונים, וכך ממפים כמה מהר היקום התפשט לאורך ההיסטוריה שלו.

ה-DESI Instrument Spectroscopic Energy Dark (DESI) נבנה כדי למדוד את הסרגל הזה טוב יותר מכל מכשיר לפניו. שחרור הנתונים הראשון שלו ממפה את סולם ה-BAO בגלקסיות, קוואזרים וב-יער לימן-אלפא של ענני גז רחוקים — יותר משישה מיליון עצמים, המחולקים לשבעה תחומי היסט לאדום מ-0.1 עד 4.2. כדי להרחיק את ציפיות החוקרים מהתוצאה, הצוות ביצע ניתוח עיוור: התשובה הקוסמולוגית הוסתרה מהם עד שהשיטות ננעלו. בפער גדול, זו מדידת ה-BAO המדויקת ביותר שנעשתה.



DESI מותקן על טלסקופ Mayall U. Nicholas בקוטר 4 מטרים ב-Peak, Kitt אריזונה. המכשיר מזין אלפי סיבים אופטיים לתוך ספקטורגרים, והופך מיקומים בשמים לספקטרומים ולהיסטים לאדום של מיליוני גלקסיות וקוואזרים.

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

מהו DESI

4 בקוטר Nicholas U. Mayall טלסקופ על ספקטרוגרף הוא Dark Energy Spectroscopic Instrument-ה- שאנרגיה משום יכול, אינו מכשיר שום — ישירות אפלה אנרגיה "רואה" אינו הוא אריזונה, Kitt-ב Peak מטרים וקוואזרים, גלקסיות כ-5,000 של הספקטרומים את בו-זמנית רושם הוא זאת במקום אור. פולטת אינה אפלה תלת- מפה ובונה אורו, את מתחה היקום התפשטות שבו האופן מתוך עצם כל של לאדום ההיסט את קורא קצב שינוי את מראה המפה שבו האופן מתוך אפלה אנרגיה על מסיקים מכן לאחר עצמים. מיליוני של ממדית כיצד ראו — האקוסטי לסרגל ועד הרובוטיים מהסיבים — המלא להסבר הזמן. לאורך הקוסמית ההתפשטות DESI עובד.

הכותרת שהתפשטה מהתוצאה הייתה שאנרגיה אפלה אולי אינה קבועה — שהדבר המסתורי שמאיץ את התפשטות היקום עשוי להיחלש עם הזמן, ולסדוק את המודל הקוסמולוגי הסטנדרטי. הטענה הזאת אינה מומצאת, אבל קל לקרוא לתוכה יותר מדי. הנוסח הכנה ספציפי יותר, ומעניין יותר: הסרגל של DESI, בפני עצמו, מתאים למודל הפשוט. הרמז למשהו חדש מופיע רק כאשר משלבים את DESI עם נתונים אחרים — ועוצמת הרמז משתנה לפי הנתונים האחרים שבוחרים.

סרגל ה-BAO של DESI לבדו תואם אנרגיה אפלה קבועה (קבוע קוסמולוגי). ההעדפה לאנרגיה אפלה מתפתחת בזמן מופיעה רק כאשר משלבים את DESI עם קרינת הרקע הקוסמית ועם מדגם סופרנובות — והעוצמה משתנה בהתאם למדגם הסופרנובות.

סרגל תקני, ושתי הדרכים שבהן אנרגיה אפלה יכולה להשתנות

המוקדם, היקום של הפיזיקה מתוך האמיתי אורכו את יודעים שאנו מכיוון: תקני סרגל הוא ה-BAO סולם מדידה אז. עד התפשט היקום כמה לנו אומרת נתון במרחק שלו הנראה לגודל האמיתי האורך השוואת עליו. משפיעה אפלה שאנרגיה הדבר וזה — כולה ההתפשטות היסטורית אחר עוקבת רבים במרחקים במודל הסטנדרטי, הנקרא Λ CDM אנרגיה אפלה היא קבוע קוסמולוגי: צפיפות אנרגיה קבועה של החלל הריק שאינה משתנה. פיזיקאים מתארים את התנהגותה באמצעות פרמטר "משוואת מצב", w , שעבור קבוע קוסמולוגי אמיתי הוא בדיוק -1 , בכל מקום ובכל זמן. כדי לבדוק זאת אפשר להרפות את ההנחה בשתי דרכים. הפשוטה יותר היא לאפשר ל- w להיות קבוע אחר, שעדיין אינו משתנה בזמן — זהו w CDM. העשירה יותר היא לאפשר ל- w להשתנות כאשר היקום מתפשט, באמצעות שני מספרים: w_0 , ערכו כיום, ו- w_a , קצב השינוי שלו. מודל w_0w_a CDM הזה מצטמצם ל- Λ CDM בנקודה היחידה $w_0 = -1$, $w_a = 0$. העדפה ל- w_0 גדול מ- -1 יחד עם w_a שלילי היא מה שנקרא כאן "אנרגיה אפלה מתפתחת". אנרגיה אפלה שהייתה דוחפת יותר בעבר ונחלשת כיום.

מה עשו המחקרים

- מדדו את סולם ה-BAO מנתוני השנה הראשונה של DESI — גלקסיות, קוואזרים ויער לימן-אלפא — מעל שישה מיליון עצמים בשבעה תחומי היסט לאדום בטווח $0.1 < z < 4.2$.
- הפעילו ניתוח עיוור, שבו התוצאה הקוסמולוגית הוסתרה עד שהמתודולוגיה נקבעה, כדי להגן מפני הטיית אישוש.
- התאימו את מודל Λ CDM השטוח הסטנדרטי ל-BAO של DESI לבדו, ואז בשילוב prior של נוקלאוסיתנזה מהמפץ הגדול וקרינת הרקע הקוסמית (CMB) מ-Planck ומ-ACT.
- הרחיבו את המודל בשתי דרכים: w קבוע לאנרגיה אפלה, (w CDM) ו- w_0w_a (שמשתנה בזמן) w_0w_a CDM.
- בדקו את המודל המשתנה בזמן על ידי שילוב DESI+CMB, בתורו, עם שלושה אוספים שונים של סופרנובות מסוג

- Λ CDM, Union3 Pantheon+, DES-SN5YR — במקום לבחור רק אחד.
- הציבו גבולות על סכום מסות הנייטרינים, ובדקו כיצד הגבולות משתנים אם מאפשרים לרקע האנרגיה האפלה לסטות מ- Λ CDM.

מה הם מצאו

- BAO של DESI לבדו תואם את המודל הסטנדרטי. הוא נותן צפיפות חומר $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, וכאשר מאפשרים לאנרגיה אפלה w קבוע, מתקבל $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — ממש על ערך הקבוע הקוסמולוגי -1 .
- בשילוב עם ה-CMB והעידוש שלו, DESI נותן $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ וקבוע האבל $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (68.52 ± 0.62) כאשר משלבים עם נוקלאוסיתזה ועם הסולם האקוסטי של ה-CMB במקום זאת).
- במודל המשתנה בזמן, השילובים מעדיפים אנרגיה אפלה מתפתחת — $w_0 < 0$ ו- $w_0 > -1$. ההעדפה היא 2.6σ עבור DESI+CMB, וכאשר מוסיפים מדגם סופרנובות היא נעשית 2.5σ , 3.5σ או 3.9σ עבור Pantheon+, Union3 או DES-SN5YR (בהתאמה σ) מודד כמה רחוקה התוצאה מציפיית המודל הסטנדרטי; 5σ הוא הסף המקובל לטענת גילוי, והוא אינו אומר שהפרשנות בהכרח נכונה — מדריך).
- כאשר משאירים את סכום מסות הנייטרינים חופשי, מתקבל גבול הדוק — מתחת ל- 0.072 eV (ב-95% ביטחון) עבור DESI+CMB — אך המאמר מציין במפורש שהגבול נחלש משמעותית אם מאפשרים לרקע האנרגיה האפלה לסטות מ- Λ CDM.

מה זה לא מוכיח

- זה לא מראה שאנרגיה אפלה מתפתחת. הסרגל של DESI עצמו תואם קבוע קוסמולוגי; רמז ההתפתחות מופיע רק בהתאמות משולבות, ורק במודל העשיר בעל שני הפרמטרים.
- זה לא אומר "CDM מת" או "איינשטיין טעה". המספר החזק ביותר, 3.9σ , נמוך מהכלל של 5σ שפיזיקאים דורשים לפני שמכריזים על גילוי — והמודל הסטנדרטי עדיין מתאים היטב ל-DESI לבדו.
- התוצאה אינה בלתי-תלויה במדגם. החלפת אוסף הסופרנובות מזיזה את המובהקות מ- 2.5σ ל- 3.9σ — יותר מסיגמה שלמה. אות שעוצמתו תלויה כל כך במערך החיצוני שמחברים אליו הוא רמז ששווה לרדוף אחריו, לא מדידה שכבר אפשר לבסס עליה מסקנה.
- הנטייה של DESI לבדו לכיוון $w_0 > -1$ נגרמת בחלקה מנקודה חריגה אחת — תחום הגלקסיות בהיסט לאדום 0.51, שנמצא מעט גבוה יחסית ל- Λ CDM אבל כאן המאמר עושה את הבדיקות הנדרשות: הוא מתייחס לנקודה כאל תנודה סטטיסטית ומראה שהחלפת כל המדידות של DESI בהיסט אדום נמוך ($z < 0.6$) במדידות SDSS הישנות משאירה את תוצאת האנרגיה האפלה ללא שינוי. הנקודה החריגה מושכת את DESI לבדו; היא אינה מחזיקה את הרמז המשולב. (קבוצות עצמאיות בדקו מאז לעומק את תפקידה). לכן ההסתייגות הזאת פועלת דווקא בכיוון ההפוך מהאופן שבו לפעמים מספרים אותה: התוצאה נבחנה מול הנתון החריג ביותר שלה, ושרדה.
- גבול מסת הנייטרינים אינו פסק דין בלתי-תלוי במודל. הוא הדוק רק אם מחזיקים את התפשטות הרקע ל- Λ CDM; כאשר מרפים את ההנחה, הגבול נרפה יחד איתה.

עד כמה הראיות חזקות

- **חזקות מאוד כמדידת מרחק.** סרגל ה-BAO הוא אחד הכלים הנקיים ביותר בקוסמולוגיה, המדידה של DESI היא המדויקת ביותר עד כה, והניתוח העיוור הוא בדיוק אמצעי ההגנה שרוצים נגד קריאת התשובה שקיוונו לראות לתוך הנתונים.
- **מסקרנות באמת, אך לא מכריעות, כטענה על אנרגיה אפלה.** העדפה של 2.6σ מ-DESI+CMB, שעולה ל- 3.9σ עם מדגם הסופרנובות המגביל ביותר, היא סוג התוצאה שמצדיק עוד זמן טלסקופ — לא סוג התוצאה שמפיל מודל. הסיבה הכנה לזהירות היא הפיזור בין מדגמי הסופרנובות; לזכותם של המחקרים, הם גם בדקו שהנקודה החריגה ביותר ב-BAO אינה מניעה את התוצאה — בדיוק בדיקת העמידות שטענה כזאת צריכה.
- **המאמר זהיר עם עצמו:** הוא מדווח על המובהקות בשלוש דרכים במקום לבחור את המספר הגדול ביותר, והוא מסמן את תלות תוצאת הנייטרונים במודל. אם יש הגזמה, היא בדרך כלל בסיפור שמספרים על המאמר, לא במאמר עצמו.

למה זה חשוב

במשך רבע מאה, "אנרגיה אפלה" ו"קבוע קוסמולוגי" שימשו כמעט כמילים נרדפות, משום שכל מדידה הייתה עקבית עם w ששווה בדיוק – 1. DESI הוא מערך הנתונים הראשון שמדויק מספיק כדי, בשילוב עם אחרים, אפילו לשאול אם – 1 הזה משתנה — ולקבל תשובה שאינה "לא" שטוח. זה שינוי אמיתי במה שהנתונים מסוגלים לעשות, ולכן התוצאה ראויה לתשומת לב. אבל אותה דיוק גם מאפשר לנו לראות עד כמה הרמז מותנה: חי בשילובי נתונים מסוימים, שקט באחרים, ורגיש במיוחד לאיזה קטלוג סופרנובות מצרפים ל-DESI. העמדה הנכונה אינה ביטול וגם לא הכרזה מוקדמת על מהפכה. צריך לעקוב אחר שחרור DESI הגדול הבא — DR2, שכבר פורסם ב-2025 — ואחר מדגמי סופרנובות עצמאיים, ולראות אם הסחיפה מתחזקת או נעלמת. כך נראה "אולי" אמיתי בקוסמולוגיה, וכדאי לדווח עליו כעל אולי.

בקצרה

DESI מדד את היסטוריית התפשטות היקום באמצעות סרגל התנודות האקוסטיות הבאריוניות המדויק ביותר שנבנה עד כה, מתוך שישה מיליון עצמים. בפני עצמו, הסרגל מתאים למודל הסטנדרטי שבו אנרגיה אפלה קבועה. כאשר משלבים אותו עם קרינת הרקע הקוסמית ועם מדגם סופרנובות, מופיעה העדפה לאנרגיה אפלה שמשתנה בזמן — בין 2.6σ ל- 3.9σ , בהתאם לסופרנובות שמוסיפים. זה רמז אמיתי ומעניין, לא גילוי: הוא נשאר מתחת לסף שפיזיקאים דורשים, ומשתנה לפי נתוני הסופרנובות שמצרפים. ייתכן שאנרגיה אפלה מתפתחת. DESI הפך את השאלה הזאת לכזו שאפשר לשאול בדיוק — הוא עדיין לא ענה עליה.

מקורות

JCAP) in (published arXiv:2404.03002 Collaboration, DESI
<https://arxiv.org/abs/2404.03002>

10.1088/1475-7516/2025/02/021 DOI ,021 (2025) 02 JCAP Collaboration, DESI
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021>