The CLEAN PAPER

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

أدق مسطرة كونية لـDESI، و«ربما» حذرة بشأن الطاقة المظلمة

قاس *DESI* تاريخ تمدد الكون بأدق مسطرة باريونية صوتية حتى الآن، من ستة ملايين جسم. وحدها، تتفق هذه المسطرة مع النموذج القياسي الذي تكون فيه الطاقة المظلمة ثابتة. ولا يظهر تفضيل لطاقة مظلمة تتطور مع الزمن إلا عند دمج *DESI* مع الخلفية الكونية الميكروية وعينة من المستعرات العظمى — بقوة $\sigma 6.2$ إلى $\sigma 9.3$ بحسب المستعرات المضافة، دون العتبة التي يطلبها الفيزيائيون لإعلان اكتشاف، وحساسًا للبيانات المقترنة به. سؤال حقيقي صار أكثر دقة، لا جوابًا حاسمًا.

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: 7516/2025/02/021-1088/1475.10

مسطرة مصنوعة من الصوت

في بدايات الكون، قبل أن توجد النجوم، كان البلازما الحارة من المادة العادية والضوء «ترن». تحركت فيها موجات ضغط بسرعة تزيد على نصف سرعة الضوء، إلى أن برد الكون بما يكفي لتتكون الذرات فتوقف الرنين — وتجمدت مسافة مفضلة خافتة داخل توزيع المادة. تلك المسافة، المسماة أفق الصوت، تبلغ اليوم نحو 150 ميغافرسخ فلكي (قرابة 490 مليون سنة ضوئية)، وتظهر على هيئة زيادة طفيفة في عدد أزواج المجرات التي تفصل بينها هذه المسافة، في كل الاتجاهات وعبر الأزمنة الكونية. يسمي علماء الكونيات هذه البصمة **التذبذب الصوتي الباريوني**، أو BAO، ويستخدمونها كمسطرة معيارية: قِس كيف يبدو حجم هذه المسافة المتجمدة في السماء عند مسافات مختلفة، فتحصل على سجل لكيفية تغير معدل تمدد الكون عبر تاريخه.

صُمم **Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)** لقياس هذه المسطرة بدقة غير مسبوقة. يرسم أول إصدار من بياناته مقياس BAO باستخدام المجرات والكوازارات وغابة لايمان-ألفا لسحب الغاز البعيدة — أكثر من ستة ملايين جسم موزعة على سبع حزم من الانزياح الأحمر بين 1.0 و2.4. ولإبعاد توقعات البشر عن النتيجة، أجرى الفريق التحليل بطريقة عمياء، فأخفى الإجابة الكونية عن نفسه إلى أن ثبّت المنهجية. وهو، بفارق كبير، أدق قياس لـBAO أُنجز حتى الآن.

رُكّب DESI على تلسكوب Mayall U. Nicholas ذي المرآة 4 أمتار في Peak Kitt بأريزونا. يغذي الجهاز آلاف الألياف البصرية إلى مطيافات، محولًا مواضع الأجسام في السماء إلى أطياف وانزياحات حمراء لملايين المجرات والكوازارات.

KPNO/NOIRLab/NSF/AURA/P. Marenfeld CC BY 0.4

ما هو DESI

Kitt في أمتار 4 المرآة ذي Nicholas U. Mayall تلسكوب على مطياف هو **Dark Energy Spectroscopic Instrument** يسجل ذلك من بدلًا ضوءًا. تبعث لا المظلمة الطاقة لأن ذلك، شيء يستطيع ولا — مباشرة المظلمة الطاقة يرى لا بأريزونا. Peak ثم الكون، تمدد مع ضوئه تمدد مقدار من جسم لكل الأحمر الانزياح ويستخرج نفسه، الوقت في وكوازار مجرة 5000 نحو أطياف مع الكوني التمدد تغير الخريطة بها تُظهر التي الكيفية من المظلمة الطاقة تُستنتج بعدها الأجسام. لملايين الأبعاد ثلاثية خريطة يبني .كيف يعمل DESI انظر — الصوتية المسطرة إلى الروبوتية الألياف من — الكاملة وللسلسلة الزمن.

العنوان الذي انتشر من هذه النتيجة كان أن الطاقة المظلمة ربما ليست ثابتة — وأن الشيء الغامض الذي يسرّع تمدد الكون ربما يضعف مع الزمن، بما يشق النموذج الكوني القياسي. هذا الادعاء ليس مخترعًا، لكنه سهل الإفراط في قراءته. النسخة الصادقة أكثر تحديدًا، وأكثر إثارة للاهتمام: مسطرة DESI نفسها، وحدها، تتفق مع النموذج القياسي البسيط. تظهر إشارة إلى شيء جديد فقط عند دمج DESI مع بيانات أخرى — وتتغير قوة الإشارة بحسب البيانات الأخرى التي تختارها.

مسطرة DESI الباريونية الصوتية وحدها متوافقة مع طاقة مظلمة ثابتة (ثابت كوني). أما التفضيل لطاقة مظلمة متطورة مع الزمن فلا يظهر إلا عندما يُجمع DESI مع الخلفية الكونية الميكروية وعينة من المستعرات العظمى — وتتغير قوته مع عينة المستعرات المستخدمة.

المسطرة المعيارية والطريقتان اللتان يمكن أن تتغير بهما الطاقة المظلمة

الظاهري بالحجم الطول هذا مقارنة فإن المبكر، الكون فيزياء من الحقيقي طولها نعرف لأننا :معيارية مسطرة هو BAO مقياس المسطرة ترسم عديدة، مسافات عبر القياس وعند الزمن. ذلك حتى تمدد قد الكون كان ما بمقدار تخبرنا معينة مسافة على للمقياس المظلمة. الطاقة فيه تتحكم ما بالضبط وهو — كله التمدد تاريخ

في النموذج القياسي ΛCDM، الطاقة المظلمة هي ثابت كوني: كثافة طاقة ثابتة للفراغ لا تتغير. يصف الفيزيائيون سلوكها بمعامل «معادلة الحالة» w، الذي يساوي بالضبط -1 للثابت الكوني الحقيقي، في كل مكان وكل زمن.

لاختبار هذا الافتراض يمكن تخفيفه بطريقتين. الأبسط هي السماح لـw بأن يكون ثابتًا آخر غير -1 (لكنه يظل ثابتًا مع الزمن) — وهذا هو نموذج wCDM. والطريقة الأغنى هي السماح لـw بالتغير مع تمدد الكون، بوصفه برقمين: w_0، قيمته اليوم، وw_a، معدل انجرافه. هذا النموذج، w_0w_aCDM، يعود إلى ΛCDM عند النقطة الوحيدة $w_0 = -1,\ w_a = 0$. والتفضيل لـw_0 أكبر من -1 مع w_a سالب هو ما تعنيه «طاقة مظلمة متطورة» هنا: طاقة مظلمة كانت أكثر تنافرًا في الماضي ويخف تأثيرها الآن.

ما الذي فعله الباحثون

- قاسوا مقياس BAO من السنة الأولى لبيانات DESI — المجرات والكوازارات وغابة لايمان-ألفا — لأكثر من ستة ملايين جسم في سبع حزم انزياح أحمر تغطي $0.1 < z < 4.2$.
- أجروا التحليل **بصورة عمياء**، مع إخفاء النتيجة الكونية إلى أن تثبت المنهجية، لتقليل تحيز التأكيد.
- لائموا نموذج ΛCDM المسطح القياسي على BAO من DESI وحده، ثم مع قيد سابق من التخليق النووي للانفجار العظيم والخلفية الكونية الميكروية (CMB) من Planck وACT.
- وسعوا النموذج بطريقتين: w ثابت للطاقة المظلمة، (wCDM) وw_0w_a متغير مع الزمن (w_0w_aCDM).
- اختبروا النموذج المتغير زمنيا بدمج DESI+CMB تباعًا مع ثلاث مجموعات مختلفة من المستعرات العظمى من النوع Ia — Pantheon+ وUnion3 وDES-SN5YR — بدل اختيار مجموعة واحدة.

- وضعوا حدودًا لمجموع كتل النيوترينوات، واختبروا كيف تتغير هذه الحدود إذا سُمح لخلفية الطاقة المظلمة بالابتعاد عن ΛCDM.

ماذا وجدوا

- **BAO من DESI وحده متوافق مع النموذج القياسي.** يعطي كثافة مادة $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$، وعندما يُسمح للطاقة المظلمة بـw ثابت يعطي $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — أي عمليًا على قيمة الثابت الكوني -1.
- عند دمجه مع CMB وعدستها، يعطي DESI $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ وثابت هابل $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (أو 68.52 ± 0.62 عند دمجه بدلًا من ذلك مع التخليق النووي والمقياس الصوتي لـCMB).
- **في نموذج الطاقة المظلمة المتغيرة مع الزمن، تفضل التركيبات طاقة مظلمة متطورة** — $w_0 > -1$ و$w_a < 0$. يبلغ التفضيل 2.6σ لـDESI+CMB، وعند إضافة عينة مستعرات يصبح 2.5σ أو 3.5σ أو 3.9σ لـPantheon+ وUnion3 وDES-SN5YR على التوالي (تقيس سيغما مدى ابتعاد النتيجة عن توقع النموذج القياسي؛ و5σ هي العتبة المعتادة لإعلان اكتشاف، ولا تعني أن التفسير نفسه صحيح — الدليل).
- إذا تُرك مجموع كتل النيوترينوات حرًا، يصبح الحد ضيقًا — أقل من 0.072 eV بثقة 95% لـDESI+CMB — لكن الورقة تصرح بأن هذا الحد يتسع كثيرًا إذا سُمح لخلفية الطاقة المظلمة بالابتعاد عن ΛCDM.

ما الذي لا تثبته هذه الدراسة

- لا تُظهر أن الطاقة المظلمة تتطور مع الزمن. مسطرة DESI نفسها متوافقة مع ثابت كوني؛ وإشارة التطور تظهر فقط في الملاءمات المشتركة، وفقط في النموذج الأغنى ذي المعاملين.
- لا تعني أن «ΛCDM مات» أو أن «أينشتاين كان مخطئًا». أقوى رقم، 3.9σ، أقل من معيار 5σ الذي يتطلبه الفيزيائيون عادة قبل تسمية النتيجة اكتشافًا — كما أن النموذج القياسي يظل ملاءمة جيدة لـDESI وحده.
- النتيجة **ليست مستقلة عن العينة.** تبديل تجميعة المستعرات يحرك الدلالة من 2.5σ إلى 3.9σ — أكثر من سيغما كاملة. إشارة يتغير حجمها بهذا القدر بحسب مجموعة البيانات الخارجية المضافة هي تلميح يستحق المتابعة، لا قياسًا يمكن اعتباره محسومًا.
- ميل DESI وحده نحو $w_0 > -1$ مدفوع **جزئيًا بنقطة شاذة واحدة** — حزمة المجرات عند انزياح أحمر 0.51، التي تقع أعلى قليلًا من توقع ΛCDM. لكن هنا تقوم الورقة بما ينبغي: تعامل النقطة كتقلب إحصائي، وتُظهر أن استبدال جميع قياسات DESI منخفضة الانزياح الأحمر ($z < 0.6$) بقياسات SDSS الأقدم يترك نتيجة الطاقة المظلمة من دون تغيير. النقطة الغريبة تشد DESI وحده قليلًا؛ لكنها **لا** تسند الإشارة المشتركة. (وقد درست مجموعات مستقلة دورها بمزيد من التفصيل لاحقًا.) لذلك يعمل هذا التحفظ بعكس الطريقة التي يُروى بها أحيانًا: اختُبرت النتيجة تحت الضغط باستبدال أكثر بياناتها شذوذًا، وصمدت.
- حد كتلة النيوترينو **ليس حكمًا مستقلًا عن النموذج.** هو ضيق فقط إذا ثُبّت تمدد الخلفية إلى ΛCDM؛ وإذا خُفف ذلك، خف الحد معه.

ما مدى قوة الدليل

- **قوي جدًا بوصفه قياسًا للمسافة.** مسطرة BAO من أنظف أدوات علم الكون، وقياس DESI هو الأدق حتى الآن، والتحليل الأعمى هو بالضبط نوع الحماية الذي تريده لمنع قراءة إجابة مأمولة داخل البيانات.

- **مثير فعلًا لكنه غير حاسم كادعاء عن الطاقة المظلمة.** تفضيل قدره 2.6σ من DESI+CMB يرتفع إلى 3.9σ مع أكثر مجموعات المستعرات تقييدًا، وهو النوع من النتائج الذي يستحق وقتًا إضافيًا على التلسكوب — لا النوع الذي يقلب نموذجًا. والسبب الصادق للحذر هو التباين بين عينات المستعرات؛ ولصالح المؤلفين أنهم تحققوا أيضًا من أن أكثر نقطة BAO شذوذًا لا تقود النتيجة — وهو بالضبط الاختبار الذي يحتاجه ادعاء من هذا النوع.
- الورقة حذرة مع نفسها: تبلغ الدلالة بثلاث طرق بدل اقتباس أكبر رقم فقط، وتنبه إلى اعتماد نتيجة النيوترينوات على النموذج. وإذا وُجدت مبالغة، فهي في إعادة السرد لا في الورقة.

لماذا يهم ذلك

على مدى ربع قرن استُخدمت عبارتا «الطاقة المظلمة» و«الثابت الكوني» تقريبًا بالتبادل، لأن كل القياسات كانت متوافقة مع w يساوي -1 بالضبط. DESI هو أول مجموعة بيانات دقيقة بما يكفي لأن تستطيع، عند دمجها مع غيرها، حتى سؤال ما إذا كانت تلك -1 تنحرف — والحصول على جواب ليس «لا» قاطعة. هذا تحول حقيقي في ما تستطيع البيانات فعله، ولهذا تستحق النتيجة الانتباه. لكن الدقة نفسها هي ما يسمح لنا برؤية مدى شرطية الإشارة: موجودة في بعض تراكيب البيانات، هادئة في أخرى، وحساسة خصوصًا لأي تكالوج مستعرات يُقرن بـDESI. الموقف الصحيح ليس الرفض ولا إعلان الثورة مبكرًا. بل مراقبة الإصدار الأكبر التالي من DESI — DR2، الذي صدر بالفعل في 2025 — وعينات المستعرات المستقلة، ورؤية ما إذا كان الانجراف سيقوى أم يتلاشى. هكذا يبدو «ربما» حقيقي في علم الكون، ويستحق أن يُروى بوصفه «ربما».

خلاصة واضحة

قاس DESI تاريخ تمدد الكون بأفضل مسطرة باريونية صوتية بُنيت حتى الآن، باستخدام ستة ملايين جسم. وحدها، تتفق هذه المسطرة مع النموذج القياسي الذي تكون فيه الطاقة المظلمة ثابتة. عند دمجها مع الخلفية الكونية الميكروية وعينة من المستعرات العظمى، يظهر تفضيل لطاقة مظلمة تتغير مع الزمن — بين 2.6σ و3.9σ بحسب عينة المستعرات المضافة. هذه إشارة حقيقية ومثيرة للاهتمام، لا اكتشافًا: تظل دون العتبة التي يطلبها الفيزيائيون، وتتغير مع بيانات المستعرات التي تُقرن بها. ربما تكون الطاقة المظلمة متطورة. جعل DESI هذا سؤالًا يمكن طرحه بدقة — لكنه لم يُجب عنه بعد.

المصادر

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

7516/2025/02/021-1088/1475.10 DOI ,021 (2025) 02 JCAP Collaboration, DESI
https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021