The Clean Paper

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

# Pembaris kosmik paling tajam DESI, dan satu 'mungkin' yang berhati-hati tentang tenaga gelap

*DESI mengukur sejarah pengembangan alam semesta dengan pembaris akustik barion paling tepat yang pernah dibina, menggunakan enam juta objek. Secara sendiri, pembaris itu bersetuju dengan model piawai yang menganggap tenaga gelap sebagai pemalar. Hanya apabila DESI digabungkan dengan latar gelombang mikro kosmik dan satu sampel supernova muncul kecenderungan terhadap tenaga gelap yang berubah mengikut masa — pada 2.6σ hingga 3.9σ bergantung pada set supernova yang ditambah, masih di bawah ambang yang diperlukan ahli fizik untuk penemuan dan sensitif kepada data yang digandingkan dengannya. Satu soalan sebenar yang kini boleh ditanya dengan tepat, bukan satu jawapan.*

---

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

# Pembaris yang diperbuat daripada bunyi

Pada awal alam semesta, sebelum ada bintang, plasma panas daripada jirim biasa dan cahaya bergetar. Gelombang tekanan merambat melaluinya pada lebih separuh kelajuan cahaya, sehingga alam semesta cukup sejuk untuk atom terbentuk dan getaran itu berhenti — membekukan satu jarak pilihan yang samar ke dalam taburan jirim. Jarak itu, *ufuk bunyi*, kini kira-kira 150 megaparsec (lebih kurang 490 juta tahun cahaya), dan ia muncul sebagai sedikit lebihan galaksi yang dipisahkan oleh jarak itu, dalam setiap arah dan pada setiap zaman. Ahli kosmologi memanggilnya ayunan akustik barion, atau BAO, dan menggunakannya sebagai pembaris piawai: ukur sebesar mana skala beku itu kelihatan di langit pada jarak berbeza, dan anda boleh memetakan berapa pantas alam semesta berkembang sepanjang sejarahnya.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) dibina untuk mengukur pembaris itu lebih baik daripada sesiapa sebelum ini. Keluaran data pertamanya memetakan skala BAO dalam galaksi, kuasar dan hutan Lyman-alpha awan gas jauh — lebih enam juta objek, tersebar dalam tujuh bin anjakan merah dari 0.1 hingga 4.2. Untuk mengelakkan jangkaan manusia mempengaruhi hasil, pasukan menjalankan analisis secara *buta*, menyembunyikan jawapan kosmologi daripada diri mereka sendiri sehingga kaedah dikunci. Dengan jurang yang besar, ini ialah ukuran BAO paling tepat yang pernah dibuat.

DESI dipasang pada Teleskop Nicholas U. Mayall 4 meter di Kitt Peak, Arizona. Instrumen itu menyalurkan ribuan gentian optik ke dalam spektrograf, menukar kedudukan di langit menjadi spektrum dan anjakan merah untuk berjuta-juta galaksi dan kuasar.

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

### Apakah DESI

**Dark Energy Spectroscopic Instrument** ialah spektrograf pada teleskop Nicholas U. Mayall 4 meter di Kitt Peak, Arizona. Ia tidak melihat tenaga gelap secara langsung — tiada apa boleh, kerana tenaga gelap tidak memancarkan cahaya. Sebaliknya ia merekodkan spektrum kira-kira 5,000 galaksi dan kuasar serentak, membaca anjakan merah setiap objek daripada cara pengembangan alam semesta meregangkan cahayanya, lalu membina peta tiga dimensi berjuta-juta objek. Tenaga gelap kemudian disimpulkan daripada cara peta itu menunjukkan pengembangan kosmik berubah sepanjang masa. Untuk keseluruhan rantai — daripada gentian robotik hingga pembaris akustik — lihat Bagaimana DESI berfungsi.

Tajuk utama yang tersebar daripadanya ialah bahawa tenaga gelap mungkin bukan pemalar — bahawa sesuatu yang misteri yang mempercepat pengembangan alam semesta mungkin *semakin lemah* dengan masa, lalu meretakkan model kosmologi piawai. Dakwaan itu bukan direka-reka, tetapi mudah dibaca terlalu jauh. Versi jujurnya lebih khusus dan lebih menarik: pembaris DESI sendiri, apabila digunakan sendirian, bersetuju dengan model asas biasa. Petunjuk sesuatu yang baharu hanya muncul apabila DESI digabungkan dengan data lain — dan sejauh mana kuat petunjuk itu kelihatan bergantung pada data lain yang dipilih.

Pembaris akustik barion DESI sahaja konsisten dengan tenaga gelap yang malar (pemalar kosmologi). Kecenderungan terhadap tenaga gelap yang *berevolusi* hanya muncul apabila DESI digabungkan dengan latar gelombang mikro kosmik dan satu sampel supernova — dan kekuatannya berubah mengikut sampel supernova yang digunakan.

### Pembaris piawai, dan dua cara tenaga gelap boleh berubah

Skala BAO ialah *pembaris piawai*: kerana kita mengetahui panjang sebenarnya daripada fizik alam semesta awal, membandingkan panjang sebenar itu dengan saiz nampaknya pada sesuatu jarak memberitahu kita sejauh mana alam semesta telah berkembang pada ketika itu. Diukur merentas banyak jarak, pembaris ini menjejak seluruh sejarah pengembangan — perkara yang dikawal oleh tenaga gelap.

Dalam model piawai, dipanggil ΛCDM, tenaga gelap ialah *pemalar kosmologi*: ketumpatan tenaga ruang kosong yang tetap dan tidak pernah berubah. Ahli fizik melabel tingkah lakunya dengan parameter "persamaan keadaan", $w$, yang bagi pemalar kosmologi sebenar bernilai tepat $-1$, di mana-mana dan pada bila-bila masa.

Untuk mengujinya, anda boleh melonggarkan andaian itu dengan dua cara. Cara lebih mudah ialah membenarkan $w$ menjadi satu pemalar lain (masih tetap sepanjang masa) — ini ialah "wCDM." Cara lebih kaya ialah membenarkan $w$ berubah ketika alam semesta mengembang, diterangkan dengan dua nombor: $w_0$, nilainya hari ini, dan $w_a$, berapa pantas ia berubah. Model "$w_0w_a$CDM" ini kembali kepada ΛCDM pada satu titik $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Kecenderungan kepada $w_0$ lebih besar daripada $-1$ bersama $w_a$ negatif ialah apa yang dimaksudkan dengan "tenaga gelap berevolusi" di sini: tenaga gelap yang lebih menolak pada masa lalu dan kini

> semakin reda.

# Apa yang dilakukan oleh para penulis

- Mengukur skala BAO daripada tahun pertama data DESI — galaksi, kuasar dan hutan Lyman-alpha — melibatkan lebih enam juta objek dalam tujuh bin anjakan merah yang meliputi $0.1 < z < 4.2$.
- Menjalankan analisis secara **buta**, menyembunyikan hasil kosmologi sehingga metodologi ditetapkan, untuk melindungi daripada bias pengesahan.
- Memadankan model ΛCDM rata piawai kepada BAO DESI sahaja, kemudian dalam gabungan dengan prior nukleosintesis Dentuman Besar dan latar gelombang mikro kosmik (CMB) daripada Planck dan ACT.
- Memperluas model dengan dua cara: tenaga gelap $w$ yang malar (wCDM), dan $w_0 w_a$ yang berubah mengikut masa ($w_0 w_a$CDM).
- Menguji model berubah-masa dengan menggabungkan DESI+CMB secara bergilir-gilir dengan tiga kompilasi supernova jenis Ia — Pantheon+, Union3 dan DES-SN5YR — bukannya memilih satu sahaja.
- Meletakkan had pada jumlah jisim neutrino, dan memeriksa bagaimana had itu berubah jika latar tenaga gelap dibenarkan berubah.

# Apa yang mereka temui

- **BAO DESI sahaja konsisten dengan model piawai.** Ia memberikan ketumpatan jirim $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, dan apabila tenaga gelap dibenarkan mempunyai $w$ malar, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — tepat sekitar nilai pemalar kosmologi $-1$.
- Digabungkan dengan CMB dan pelensaannya, DESI memberikan $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ dan pemalar Hubble $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s$^{-1}$ Mpc$^{-1}$ ($68.52 \pm 0.62$ apabila digandingkan dengan nukleosintesis dan skala akustik CMB sebaliknya).
- **Dalam model berubah-masa, gabungan data lebih menyukai tenaga gelap yang berevolusi** — $w_0 > -1$ dan $w_a < 0$. Kecenderungan itu ialah $2.6\sigma$ bagi DESI+CMB, dan apabila sampel supernova ditambah menjadi $2.5\sigma$, $3.5\sigma$, atau $3.9\sigma$ masing-masing bagi Pantheon+, Union3 atau DES-SN5YR (sigma mengukur sejauh mana sesuatu hasil berada daripada jangkaan model piawai; $5\sigma$ ialah ambang biasa untuk dakwaan penemuan, dan ia bukan pernyataan bahawa tafsiran itu pasti betul — panduan).
- Jika dibiarkan bebas, jumlah jisim neutrino dihadkan dengan ketat — di bawah 0.072 eV (keyakinan 95%) bagi DESI+CMB — tetapi kertas itu secara jelas mengatakan had ini menjadi jauh lebih longgar jika latar tenaga gelap dibenarkan menyimpang daripada ΛCDM.

# Apa yang tidak dibuktikan oleh kajian ini

- Ia **tidak** menunjukkan bahawa tenaga gelap sedang berevolusi. Pembaris DESI sendiri konsisten dengan pemalar kosmologi; petunjuk evolusi hanya muncul dalam pemadanan *gabungan*, dan hanya dalam model dua parameter yang lebih kaya.
- Ia **tidak** bermaksud "ΛCDM sudah mati" atau "Einstein salah." Nombor paling kuat, $3.9\sigma$, masih di bawah konvensyen $5\sigma$ yang diperlukan ahli fizik sebelum memanggil sesuatu sebagai penemuan — dan model piawai kekal sepadan baik dengan DESI sahaja.
- Hasilnya **tidak** bebas daripada pilihan sampel. Menukar kompilasi supernova menggerakkan keertian daripada $2.5\sigma$ kepada $3.9\sigma$ — lebih daripada satu sigma penuh. Isyarat yang saiznya bergantung begitu banyak pada set data luar yang digabungkan ialah petunjuk untuk dikejar, bukan ukuran yang boleh dianggap sudah pasti.
- Kecenderungan DESI-*sahaja* kepada $w_0 > -1$ didorong **sebahagiannya oleh satu titik aneh** — bin galaksi anjakan merah 0.51, yang berada sedikit tinggi berbanding ΛCDM. Tetapi di sinilah kertas itu melakukan semakan yang patut: ia menganggap titik itu sebagai turun naik statistik, dan menunjukkan bahawa menggantikan *semua* ukuran anjakan merah rendah DESI ($z < 0.6$) dengan ukuran SDSS lebih lama tidak mengubah hasil tenaga gelap. Titik aneh itu menarik DESI apabila digunakan sendirian; ia **tidak** menopang petunjuk gabungan. (Kumpulan bebas sejak itu meneliti peranannya dengan lebih mendalam.) Jadi peringatan ini sebenarnya memotong ke arah bertentangan daripada cara ia kadang-kadang diceritakan: hasil itu diuji tekanan terhadap data paling anehnya dan tetap bertahan.
- Had jisim neutrino **bukan** keputusan bebas model. Ia ketat hanya jika pengembangan latar dikekalkan pada ΛCDM; longgarkan itu, dan hadnya turut longgar.

# Sejauh mana kukuh buktinya

- **Sangat kuat sebagai ukuran jarak.** Pembaris BAO ialah salah satu alat paling bersih dalam kosmologi, ukuran DESI ialah yang paling tepat setakat ini, dan analisis buta tepat perlindungan yang kita mahukan daripada membaca jawapan yang dijangka ke dalam data.
- **Benar-benar menarik, tetapi belum menentukan, sebagai dakwaan tenaga gelap.** Kecenderungan $2.6\sigma$ daripada DESI+CMB, meningkat kepada $3.9\sigma$ dengan set supernova yang paling mengehadkan, ialah jenis hasil yang layak mendapat lebih banyak masa teleskop — bukan jenis yang menggulingkan model. Sebab jujur untuk berhati-hati ialah sebaran antara sampel supernova; kredit kepada para penulis, mereka juga memeriksa bahawa satu titik BAO paling aneh tidak memacu hasil — tepat kerja rumah yang diperlukan dakwaan seperti ini.
- Kertas itu berhati-hati dengan dirinya sendiri: ia melaporkan keertian dalam tiga cara dan bukan hanya memetik nilai terbesar, serta menandai kebergantungan model bagi hasil neutrino. Jika ada keterlaluan, ia lebih banyak muncul dalam penceritaan semula, bukan dalam kertas itu.

# Mengapa ia penting

Selama suku abad, “tenaga gelap” dan “pemalar kosmologi” digunakan hampir sebagai istilah yang boleh saling menggantikan, kerana setiap ukuran konsisten dengan $w$ tepat $-1$. DESI ialah set data pertama yang cukup tepat sehingga, apabila digabungkan dengan data lain, ia boleh benar-benar *bertanya* sama ada $-1$ itu berubah — dan mendapat jawapan yang bukan sekadar tidak. Itu perubahan sebenar dalam apa yang boleh dilakukan data, dan sebab hasil ini wajar diberi perhatian. Tetapi ketepatan yang sama juga membolehkan kita melihat betapa bersyaratnya petunjuk itu: hidup dalam sesetengah gabungan data, senyap dalam yang lain, dan paling sensitif terhadap katalog supernova yang digandingkan dengan DESI. Sikap yang betul bukan menolaknya dan bukan juga mengumumkan revolusi terlalu awal. Ia ialah memerhati keluaran DESI seterusnya yang lebih besar — DR2, yang sudah keluar pada 2025 — serta sampel supernova bebas, dan melihat sama ada perubahan itu menjadi lebih kukuh atau pudar. Beginilah rupa satu “mungkin” yang sebenar dalam kosmologi, dan ia patut dilaporkan sebagai mungkin.

# Ringkasan utama

DESI telah mengukur sejarah pengembangan alam semesta dengan pembaris akustik barion terbaik setakat ini, menggunakan enam juta objek. Secara sendiri, pembaris itu bersetuju dengan model piawai yang menganggap tenaga gelap sebagai pemalar. Gabungkannya dengan latar gelombang mikro kosmik dan sampel supernova, dan muncul kecenderungan kepada tenaga gelap yang berubah mengikut masa — pada $2.6\sigma$ hingga $3.9\sigma$, bergantung pada supernova yang ditambah. Itu petunjuk sebenar dan menarik, bukan penemuan: ia kekal di bawah ambang yang dituntut ahli fizik, dan berubah mengikut data supernova yang digandingkan dengannya. Tenaga gelap mungkin berevolusi. DESI telah menjadikannya soalan yang patut ditanya dengan tepat — belum lagi soalan yang telah dijawabnya.

## Sumber

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