The Clean Paper

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

Penggaris kosmik DESI yang paling tajam, dan sebuah "mungkin" yang hati-hati tentang energi gelap

DESI mengukur sejarah ekspansi alam semesta dengan penggaris baryon-acoustic paling presisi sejauh ini, dari enam juta objek. Sendiri, penggaris itu sesuai dengan model standar ketika energi gelap adalah konstanta. Hanya ketika DESI digabung dengan cosmic microwave background dan sampel supernova muncul preferensi bagi energi gelap yang berevolusi — pada 2,6σ sampai 3,9σ tergantung supernova yang ditambahkan, masih di bawah ambang penemuan fisika dan sensitif terhadap data yang dipasangkan. Sebuah pertanyaan nyata yang dibuat presisi, bukan jawaban.

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

Penggaris yang terbuat dari suara

Pada awal alam semesta, sebelum ada bintang, plasma panas materi biasa dan cahaya bergetar. Gelombang tekanan merambat melaluinya dengan kecepatan lebih dari separuh kecepatan cahaya, sampai alam semesta cukup dingin agar atom terbentuk dan getaran itu berhenti — membekukan satu jarak pilihan yang samar ke dalam distribusi materi. Jarak itu, *sound horizon*, kini sekitar 150 megaparsec (kira-kira 490 juta tahun cahaya), dan muncul sebagai sedikit kelebihan pasangan galaksi yang terpisah sejauh itu, ke segala arah dan pada setiap zaman. Kosmolog menyebutnya baryon acoustic oscillation, atau BAO, dan memakainya sebagai penggaris standar: ukur seberapa besar skala beku itu tampak di langit pada jarak berbeda, dan kita dapat memetakan seberapa cepat alam semesta mengembang sepanjang sejarahnya.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) dibangun untuk mengukur penggaris itu lebih baik daripada siapa pun sebelumnya. Rilis data pertamanya memetakan skala BAO pada galaksi, quasar, dan hutan Lyman-alpha dari awan gas jauh — lebih dari enam juta objek, tersebar dalam tujuh bin redshift dari 0,1 sampai 4,2. Agar ekspektasi manusia tidak memengaruhi hasil, tim menjalankan analisis secara *blind*, menyembunyikan jawaban kosmologis dari diri mereka sendiri sampai metodenya dikunci. Dengan selisih besar, ini merupakan pengukuran BAO paling presisi yang pernah dibuat.

DESI dipasang pada Teleskop Nicholas U. Mayall 4 meter di Kitt Peak, Arizona. Instrumen memasukkan cahaya dari ribuan serat optik ke spektrograf, mengubah posisi di langit menjadi spektrum dan redshift untuk jutaan galaksi dan quasar.

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

Apa itu DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument adalah spektrograf pada teleskop Nicholas U. Mayall 4 meter di Kitt Peak, Arizona. Ia tidak melihat energi gelap secara langsung — tidak ada instrumen yang dapat melakukannya, karena energi gelap tidak memancarkan cahaya. Sebaliknya, DESI merekam spektrum sekitar 5.000 galaksi dan quasar sekaligus, membaca redshift tiap objek dari bagaimana ekspansi alam semesta meregangkan cahayanya, lalu membangun peta tiga dimensi dari jutaan objek. Energi gelap kemudian diinferensikan dari bagaimana peta tersebut menunjukkan perubahan ekspansi kosmik sepanjang waktu. Untuk rantai lengkap — dari serat robotik sampai penggaris akustik — lihat Cara kerja DESI.

Judul yang paling banyak beredar adalah bahwa energi gelap mungkin bukan konstanta — bahwa sesuatu yang misterius yang mempercepat ekspansi alam semesta mungkin *melemah* seiring waktu, meretakkan model kosmologi standar. Klaim itu tidak dibuat-buat, tetapi mudah dibaca terlalu jauh. Versi jujurnya lebih spesifik, dan lebih menarik: penggaris DESI sendiri, jika berdiri sendiri, sesuai dengan model standar. Petunjuk sesuatu yang baru baru muncul ketika DESI digabung dengan data lain — dan kekuatan petunjuk itu berubah menurut data mana yang dipilih.

BAO DESI sendiri konsisten dengan energi gelap konstan, yaitu konstanta kosmologis. Preferensi bagi energi gelap yang *berevolusi* muncul hanya ketika DESI digabung dengan cosmic microwave background dan sampel supernova — dan kekuatannya berubah tergantung sampel supernova yang digunakan.

Penggaris standar, dan dua cara energi gelap dapat berubah

Skala BAO adalah *penggaris standar*: karena panjang sebenarnya diketahui dari fisika alam semesta awal, membandingkan panjang sejati dengan ukuran tampaknya pada suatu jarak memberi tahu seberapa besar alam semesta telah mengembang saat itu. Diukur pada banyak jarak, penggaris ini melacak seluruh sejarah ekspansi — yang dipengaruhi energi gelap.
Dalam model standar ΛCDM, energi gelap adalah *konstanta kosmologis*: kepadatan energi tetap dari ruang kosong yang tidak pernah berubah. Fisikawan memberi label perilakunya dengan parameter "equation of state", w, yang untuk konstanta kosmologis sejati persis -1, di mana pun dan kapan pun.
Untuk mengujinya, pembatasan itu dapat dilonggarkan dalam dua cara. Yang lebih sederhana adalah membiarkan w menjadi konstanta lain — tetap tidak berubah terhadap waktu — yang disebut "wCDM". Yang lebih kaya adalah membiarkan w berubah ketika alam semesta mengembang, dideskripsikan oleh dua angka: w_0, nilainya hari ini, dan w_a, seberapa cepat ia bergeser. Model "w_0w_aCDM" ini kembali menjadi ΛCDM tepat pada titik $w_0 = -1,\ w_a = 0$. Preferensi bagi w_0 lebih besar daripada -1 dengan w_a negatif adalah yang dimaksud "energi gelap berevolusi" di sini: energi gelap yang lebih repulsif di masa lalu dan kini mereda.

Apa yang dilakukan para penulis

- Mengukur skala BAO dari tahun pertama data DESI — galaksi, quasar, dan hutan Lyman-alpha — pada lebih dari enam juta objek dalam tujuh bin redshift yang mencakup $0.1 < z < 4.2$.
- Menjalankan analisis secara **blind**, menyembunyikan hasil kosmologis sampai metodologi dikunci, untuk mengurangi bias konfirmasi.
- Menyesuaikan model ΛCDM datar standar pada BAO DESI saja, lalu menggabungkannya dengan prior nukleosintesis Big Bang dan cosmic microwave background (CMB) dari Planck dan ACT.
- Memperluas model dalam dua cara: energi gelap dengan w konstan (wCDM), dan $w_0 w_a$ yang berubah terhadap waktu ($w_0 w_a$CDM).
- Menguji model yang berubah terhadap waktu dengan menggabungkan DESI+CMB secara bergantian dengan tiga kompilasi supernova tipe Ia berbeda — Pantheon+, Union3, dan DES-SN5YR — bukan memilih satu.
- Menetapkan batas pada jumlah massa neutrino, lalu memeriksa bagaimana batas itu berubah jika latar belakang energi gelap diizinkan berbeda dari ΛCDM.

Apa yang mereka temukan

- **BAO DESI saja konsisten dengan model standar.** Ia memberi kepadatan materi $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$, dan jika energi gelap diizinkan memiliki w konstan, $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ — tepat di sekitar nilai konstanta kosmologis -1.
- Digabung dengan CMB dan lensing-nya, DESI memberi $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ dan konstanta Hubble $H_0 = 67.97 \pm 0.38$ km s^{-1} Mpc^{-1} (68.52 ± 0.62 jika dipasangkan dengan nukleosintesis dan skala akustik CMB).
- **Dalam model yang berubah terhadap waktu, kombinasi data lebih menyukai energi gelap yang berevolusi** — $w_0 > -1$ dan $w_a < 0$. Preferensinya 2.6σ untuk DESI+CMB, dan ketika satu sampel supernova ditambahkan menjadi 2.5σ, 3.5σ, atau 3.9σ untuk Pantheon+, Union3, atau DES-SN5YR. Sigma mengukur seberapa jauh hasil dari ekspektasi model standar; 5σ adalah ambang umum sebelum fisikawan menyebut suatu hasil penemuan, dan bukan pernyataan bahwa interpretasinya pasti benar — panduan.
- Jika dibiarkan bebas, jumlah massa neutrino dibatasi ketat — di bawah 0,072 eV (kepercayaan 95%) untuk DESI+CMB — tetapi makalah tegas bahwa batas ini mengendur secara substansial jika latar belakang energi gelap boleh menyimpang dari ΛCDM.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Studi ini **tidak** menunjukkan energi gelap sedang berevolusi. Penggaris DESI sendiri konsisten dengan konstanta kosmologis; petunjuk evolusi muncul hanya dalam *fit gabungan*, dan hanya pada model dua-parameter yang lebih kaya.
- Studi ini **tidak** berarti "ΛCDM mati" atau "Einstein salah". Angka terkuat, 3.9σ, masih di bawah

konvensi 5σ yang biasa diminta fisikawan sebelum menyebut penemuan — dan model standar tetap cocok baik dengan DESI saja.

- Hasil ini **tidak** independen dari sampel. Mengganti kompilasi supernova mengubah signifikansi dari 2.5σ menjadi 3.9σ — lebih dari satu sigma penuh. Sinyal yang ukurannya sangat tergantung pada kumpulan data eksternal yang ditempelkan adalah petunjuk untuk dikejar, bukan pengukuran yang boleh dianggap pasti.
- Kecenderungan DESI-*saja* menuju $w_0 > -1$ didorong **sebagian oleh satu titik anomali** — bin galaksi redshift 0,51, yang sedikit tinggi dibanding ΛCDM. Namun di sinilah makalah melakukan pemeriksaan yang perlu: titik itu diperlakukan sebagai fluktuasi statistik, dan mengganti *seluruh* pengukuran DESI redshift rendah ($z < 0.6$) dengan pengukuran SDSS yang lebih lama tidak mengubah hasil energi gelap. Titik aneh itu menarik DESI sendiri; ia **tidak** menopang petunjuk gabungan. (Kelompok independen kemudian memeriksa perannya lebih jauh.) Jadi caveat ini bekerja berlawanan dengan cara ia kadang diceritakan: hasilnya diuji terhadap data paling anomalinya dan tetap bertahan.
- Batas massa neutrino **bukan** vonis yang independen dari model. Ia sangat ketat hanya jika ekspansi latar belakang ditahan pada ΛCDM; longgarkan asumsi itu, dan batasnya ikut longgar.

Seberapa kuat buktinya?

- **Sangat kuat sebagai pengukuran jarak.** Penggaris BAO adalah salah satu alat terbersih dalam kosmologi, DESI adalah yang paling presisi sejauh ini, dan analisis blind adalah perlindungan yang tepat terhadap kecenderungan membaca jawaban yang diharapkan ke dalam data.
- **Benar-benar menarik, tetapi belum menentukan, sebagai klaim energi gelap.** Preferensi 2.6σ dari DESI+CMB yang naik sampai 3.9σ dengan set supernova paling membatasi adalah jenis hasil yang layak mendapat waktu teleskop lebih banyak — bukan hasil yang membalikkan model. Alasan jujur untuk berhati-hati adalah penyebaran antar-sampel supernova; dan para penulis juga memeriksa bahwa satu titik BAO paling anomali tidak menggerakkan hasil — tepat pekerjaan rumah yang harus dilakukan untuk klaim semacam ini.
- Makalah berhati-hati terhadap dirinya sendiri: signifikansi dilaporkan dalam tiga cara alih-alih hanya mengutip yang terbesar, dan ketergantungan model pada hasil neutrino ditandai. Jika ada klaim berlebihan, ia lebih banyak muncul dalam penceritaan ulang daripada makalah.

Mengapa ini penting

Selama seperempat abad, "energi gelap" dan "konstanta kosmologis" hampir digunakan bergantian, karena semua pengukuran konsisten dengan w tepat -1. DESI adalah kumpulan data pertama yang cukup presisi sehingga, ketika digabung dengan data lain, ia dapat benar-benar *menanyakan* apakah -1 itu bergeser — dan mendapat jawaban yang bukan sekadar "tidak". Itu perubahan nyata dalam apa yang mampu dilakukan data, dan alasan hasil ini layak diperhatikan. Namun presisi yang sama juga menunjukkan betapa kondisional petunjuknya: hidup pada beberapa kombinasi data, sunyi pada yang lain, dan terutama sensitif terhadap katalog supernova mana yang dipasangkan dengan

DESI. Sikap yang tepat bukan penolakan maupun revolusi yang diumumkan terlalu dini. Yang tepat adalah melihat rilis DESI lebih besar berikutnya — DR2, yang sudah keluar pada 2025 — dan sampel supernova independen, lalu melihat apakah pergeseran itu menguat atau memudar. Beginilah rupa sebuah "mungkin" yang sungguh-sungguh dalam kosmologi, dan layak dilaporkan sebagai mungkin.

Singkatnya

DESI telah mengukur sejarah ekspansi alam semesta dengan penggaris baryon-acoustic paling presisi sejauh ini, dari enam juta objek. Sendiri, penggaris itu sesuai dengan model standar ketika energi gelap adalah konstanta. Gabungkan dengan cosmic microwave background dan sampel supernova, dan muncul preferensi untuk energi gelap yang berubah seiring waktu — pada 2.6σ hingga 3.9σ, tergantung supernova mana yang ditambahkan. Itu petunjuk yang nyata dan menarik, bukan penemuan: masih di bawah ambang yang diminta fisikawan dan bergeser dengan kumpulan data supernova yang dipasangkan. Energi gelap mungkin berevolusi. DESI telah membuat pertanyaan itu layak diajukan secara presisi — belum menjawabnya.

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