



The CLEAN PAPER

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

DESI の最も鋭い宇宙のものさしと、ダークエネルギーをめぐる慎重な「かもしれない」

DESI は、これまでに築かれたなかで最も精密なバリオン音響ものさしを用いて、600 万個の天体から宇宙の膨張の歴史を測定した。それ単独では、そのものさしはダークエネルギーが定数である標準モデルと一致する。進化するダークエネルギーへの選好が現れるのは、*DESI* を宇宙マイクロ波背景放射と超新星サンプルと組み合わせたときだけであり——どの超新星を加えるかに応じて 2.6σ から 3.9σ 、発見のために物理学者が求める閾値を下回り、組み合わせるデータに敏感だ。精密に問われた本物の問いであって、答えではない。

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

音でできたものさし

宇宙の初期、まだ星が存在しなかったころ、通常物質と光からなる高温のプラズマは鳴り響いていた。圧力波は光速の半分を超える速さでその中を駆けめぐり、やがて宇宙が十分に冷えて原子が形成されると、その鳴動は止んだ——そして物質の分布のなかに、かすかな特定の距離を凍りつかせて残した。その距離、すなわち音の地平線は、今日ではおよそ 150 メガパーセク (およそ 4 億 9000 万光年) であり、あらゆる方向、あらゆる時代において、その間隔だけ離れた銀河がわずかに過剰に見られるという形で現れる。宇宙論の研究者はこれをバリオン音響振動、略して BAO と呼び、標準ものさしとして用いる——この凍りついたスケールが、異なる距離で天空上でどれほど大きく見えるかを測れば、宇宙がその歴史を通じてどれほどの速さで膨張してきたかを描き出せるのだ。

ダーク・エネルギー・スペクトロスコピック・インストゥルメント (DESI) は、このものさしを誰よりも精密に測るために建造された。その最初のデータ公開は、銀河、クエーサー、そして遠方のガス雲のライマンアルファの森における BAO スケールを地図化する——600 万個を超える天体を、赤方偏移 0.1 から 4.2 までの七つの赤方偏移区間に広げてとらえたものだ。人間の期待を結果から締め出すため、チームは解析をブラインドで行い、手法が確定するまで宇宙論的な答えを自分たち自身に隠していた。これは、群を抜いて、これまでに行われたなかで最も精密な BAO 測定である。



DESI は、アリゾナ州キットピークにあるニコラス・U・メイオール 4 メートル望遠鏡に搭載されている。この装置は数千本の光ファイバーを分光器へと導き、天空上の位置を、数百万個の銀河やクエーサーのスペクトルと赤方偏移へと変換する。

DESI とは何か

ダーク・エネルギー・スペクトロスコピック・インストゥルメントは、アリゾナ州キットピークのニコラス・U・メイオール4メートル望遠鏡に取り付けられた分光器である。それはダークエネルギーを直接見るわけではない——ダークエネルギーは光を発しないため、いかなる装置にもそれはできない。代わりにこの装置は、約 5,000 個の銀河やクエーサーのスペクトルを一度に記録し、膨張する宇宙がそれぞれの天体の光をどれだけ引き延ばしたかから赤方偏移を読み取り、数百万個の天体からなる三次元地図を築く。ダークエネルギーは、その地図が宇宙膨張の時間的な変化をどう示すかから推定される。ロボットのファイバーから音響のものさしまで——その全体の連鎖については、DESI の仕組みを参照。

そこから広まった見出しは、ダークエネルギーは定数ではないかもしれない——宇宙の膨張を加速させているその謎めいた何かが、時間とともに弱まっていき、標準宇宙論モデルにひびを入れているのかもしれない、というものだった。その主張はでっち上げではないが、読み過ぎるのは容易だ。誠実な言い方はもっと限定的で、そしてもっと興味深い。DESI 自身のものさは、それ単独では、ごく標準的なモデルと一致している。新しい何かの兆しが現れるのは、DESI を他のデータと組み合わせただけであり——そしてその兆しがどれほど強く見えるかは、どの他データを選ぶかによって変わる。

DESI のバリオン音響ものさは、それ単独では定数のダークエネルギー (宇宙定数) と矛盾しない。進化するダークエネルギーへの選好が浮かび上がるのは、DESI を宇宙マイクロ波背景放射と超新星サンプルと組み合わせただけであり——そしてその強さは、どの超新星サンプルを用いるかで変わる。

標準ものさしと、ダークエネルギーが変化する二つのしかた

BAO スケールは標準ものさしである。その真の長さが初期宇宙の物理から分かっているため、真の長さ、ある距離での見かけの大きさを比べれば、その時点までに宇宙がどれだけ膨張していたかが分かる。多くの距離にわたって測れば、このものさは膨張の歴史全体をたどる——それこそがダークエネルギーが支配するものだ。

標準モデル、すなわち Λ CDM では、ダークエネルギーは宇宙定数である。すなわち、けっして変わらない、真空の固定されたエネルギー密度だ。物理学者はその振る舞いを「状態方程式」パラメータ w で表す。真の宇宙定数であれば、 w はどこでもいつでも正確に -1 になる。これを検証するには、二通りに緩められる。より単純なのは、 w を別の定数 (依然として時間的には固定) にすることだ——これが「 w CDM」である。より豊かなのは、宇宙の膨張とともに w が変化するのを許すことで、これは二つの数で記述される。 w_0 は今日の値、 w_a はそれがどれだけ速く漂うかだ。この「 w_0w_a CDM」モデルは、 $w_0 = -1$ 、 $w_a = 0$ という一点で Λ CDM に帰着する。 w_0 が -1 より大きく、 w_a が負であることへの選好が、ここでいう「進化するダークエネルギー」を意味する。すなわち、過去にはより斥力的で、今はその力を緩めつつあるダークエネルギーだ。

著者たちが行ったこと

- DESI の最初の 1 年分のデータ——銀河、クエーサー、ライマンアルファの森——から、 $0.1 < z < 4.2$ に及ぶ七つの赤方偏移区間の 600 万個を超える天体について、BAO スケールを測定した。
- 確証バイアスを防ぐため、方法論が確定するまで宇宙論的な結果を隠したまま、解析を**ブラインド**で行った。
- 標準的な平坦 Λ CDM モデルを、まず DESI の BAO 単独に、次いでビッグバン元素合成の事前分布とプランクおよび ACT による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を組み合わせたものに、当てはめた。
- モデルを二通りに拡張した。定数のダークエネルギー $w(w\text{CDM})$ と、時間変化する $w_0w_a(w_0w_a\text{CDM})$ である。
- 時間変化モデルを、一つだけ選ぶのではなく、DESI+CMB を三つの異なる Ia 型超新星コンパイル——Pantheon+、Union3、DES-SN5YR——と順に組み合わせて検証した。
- ニュートリノの総質量に上限を課し、ダークエネルギーの背景が変化するのを許した場合にその上限がどう動くかを調べた。

著者たちが見出したこと

- **DESI の BAO は単独では標準モデルと矛盾しない。**それらは物質密度 $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ を与え、ダークエネルギーに定数の w を許した場合は $w = -0.99(+0.15/-0.13)$ ——宇宙定数の値である -1 のちょうど真上に位置する。
- CMB およびその重力レンズ効果と組み合わせると、DESI は $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$ とハッブル定数 $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を与える (元素合成と CMB の音響スケールと組み合わせた場合は代わりに 68.52 ± 0.62)。
- **時間変化モデルでは、組み合わせは進化するダークエネルギーを選好する—— $w_0 > -1$ かつ $w_a < 0$ である。**この選好は DESI+CMB で 2.6σ であり、超新星サンプルを加えると Pantheon+、Union3、DES-SN5YR についてそれぞれ 2.5σ 、 3.5σ 、 3.9σ になる (シグマは、結果が標準モデルの期待からどれだけ離れているかを測る指標であり、 5σ が発見を主張するときの通例の閾値である。それは解釈が正しいという表明ではない——ガイド)。
- 自由にとすると、ニュートリノの総質量はきつく制限される——DESI+CMB で 0.072 eV 未満 (信頼度 95%)——が、ダークエネルギーの背景が Λ CDM から外れるのを許すと、この上限は大幅に緩むと論文は明言している。

この研究からは言えないこと

- これはダークエネルギーが進化していることを示していない。DESI 自身のものさしは宇宙定数と矛盾しない。進化の兆しは組み合わせたフィットのなかにだけ、しかもより豊かな二パラメータモデルのなかにだけ現れる。
- これは「 Λ CDM は死んだ」とか「アインシュタインは間違っていた」を意味していない。最も強い数字である 3.9σ は、物理学者が何かを発見と呼ぶ前に求める 5σ の慣例を下回っており——標

準モデルは DESI 単独に対しては依然として良い当てはまりのままである。

- 結果はサンプルに依存しないわけではない。超新星コンパイルを取り替えると、有意性は 2.5σ から 3.9σ へと動く——1 シグマを超える幅だ。外部のどのデータセットを継ぎ足すかによってその大きさがそれほど変わる信号は、追究すべき兆しであって、当てにしてよい測定ではない。
- DESI 単独の $w_0 > -1$ への傾きは、**一部は単一の異常な点によって引き起こされている**——赤方偏移 0.51 の銀河区間で、 Λ CDM に対してわずかに高い位置にある。だが論文が丹念な仕事をするのはまさにここだ。論文はこの点を統計的なゆらぎとして扱い、DESI の低赤方偏移 ($z < 0.6$) の測定をすべて古い SDSS のものに置き換えても、ダークエネルギーの結果は変わらないことを示す。この奇妙な点は DESI 単独を引っぱり、組み合わせた兆しを支えているわけではない。(独立した研究グループはその後、その役割をより厳しく調べている。) したがってこの但し書きは、しばしば語られるのとは逆向きに働く。結果は最も異常なデータに対して負荷試験にかけられ、そして持ちこたえたのだ。
- ニュートリノ質量の上限は、モデルに依存しない判定ではない。それがきついのは背景の膨張が Λ CDM に固定されている場合だけであり、それを緩めれば、上限もそれとともに緩む。

証拠をどう評価するか

- 距離測定としては非常に強い。BAO ものさしは宇宙論で最も清潔な道具の一つであり、DESI のものはこれまで最も精密であり、そしてブラインド解析は、望んだ答えをデータに読み込んでしまうことへの、まさにあってほしい防護策だ。
- **ダークエネルギーの主張としては、真に興味をそそるが、決定的ではない。** DESI+CMB による 2.6σ の選好は、最も制約の強い超新星セットで 3.9σ まで上がるが、これはより多くの望遠鏡時間を得るたぐいの結果であって、モデルを覆すたぐいの結果ではない。慎重さを保つべき誠実な理由は、超新星サンプル間のばらつきにある。彼らの功績として、著者たちは単一の最も異常な BAO 点が結果を左右していないことも確認した——まさにこの種の主張に必要な宿題である。
- 論文はそれ自身に対して慎重だ。最大の値を引くのではなく有意性を三通りで報告し、ニュートリノの結果のモデル依存性を注記している。行き過ぎは、あるとすれば、論文にではなく語り直しのなかにある。

なぜ重要か

四半世紀のあいだ、「ダークエネルギー」と「宇宙定数」はほとんど互換的に使われてきた。あらゆる測定が w をちょうど -1 とすることと矛盾しなかったからだ。DESI は、他のデータと組み合わせれば、その -1 が漂うのかどうかを問うことすらできるほど精密な、最初のデータセットである——そして、そっけない否ではない答えを得る。それはデータにできることの本当の転換であり、この結果が注目に値する理由だ。だが、同じ精密さこそが、その兆しがいかに条件付きであるかを見せてくれる。あるデータの組み合わせでは生き、別のものでは静かで、そして何よりも DESI とどの超新星カタログを組み合わせるかに敏感なのだ。正しい構えは、退けることでも、革命を早まって告げることでもない。次の、より大規模な DESI の公開——DR2 は 2025 年にすでに出ている——と、独立した超新星サンプルを見守り、この漂いが固まるのか薄れるのかを確かめることだ。これが宇宙論における本物の「かもしれない」の姿であり、それは「かもしれない」として報じる価値がある。

要点

DESI は、これまでに築かれたなかで最良のバリオン音響ものさしを用いて、600 万個の天体から宇宙の膨張の歴史を測定した。それ単独では、そのものさしはダークエネルギーが定数である標準モデルと一致する。宇宙マイクロ波背景放射と超新星サンプルと組み合わせると、時間とともに変化するダークエネルギーへの選好が浮かび上がる——どの超新星を加えるかに応じて、 2.6σ から 3.9σ だ。それは本物で興味深い兆しであって、発見ではない。物理学者が求める閾値を下回ったままであり、組み合わせる超新星データによって動く。ダークエネルギーは進化しているのかもしれない。DESI はそれを、精密に問う価値のある問いにした——まだそれが答えた問いではない。

出典

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>