



The CLEAN PAPER

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

DESI의 가장 정밀한 우주 표준자, 그리고 암흑에너지에 대한 신중한‘어쩌면’

DESI는 600만 개 천체를 이용해 지금까지 가장 정밀한 바리온 음향 표준자로 우주의 팽창 역사를 측정했다. DESI 단독은 암흑에너지가 일정한 표준모형과 일치한다. 시간에 따라 변하는 암흑에너지에 대한 선호는 우주배경복사와 초신성 표본을 결합할 때만 나타나며, 어떤 초신성을 쓰느냐에 따라 $2.6\sigma \sim 3.9\sigma$ 로 달라진다. 물리학의 발견 기준보다 낮고 결합 데이터에 민감하다. 답이 아니라 정밀해진 진짜 질문이다.

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

소리로 만든 자

별이 생기기 전의 초기 우주에서 보통 물질과 빛으로 이루어진 뜨거운 플라스마는 울리고 있었다. 압력과 빛의 절반이 넘는 속도로 퍼졌고, 우주가 충분히 식어 원자가 만들어지자 그 울림이 멈추면서 물질 분포에 희미하게 선호되는 거리 하나가 얼어붙었다. 그 거리인 음향지평선 (*sound horizon*) 은 오늘날 약 150 메가파섹 (약 4 억 9 천만 광년) 이며, 모든 방향과 시대에서 그만큼 떨어진 은하 쌍이 조금 더 많이 나타나는 흔적으로 보인다. 우주론자들은 이를 바리온 음향진동 (BAO) 이라고 부르고 표준자로 사용한다. 얼어붙은 이 눈금이 서로 다른 거리에서 하늘에 얼마나 크게 보이는지 측정하면 우주가 역사 전체에 걸쳐 얼마나 빠르게 팽창했는지 그릴 수 있다.

Dark Energy Spectroscopic Instrument(DESI) 는 이 자를 누구보다 정밀하게 재기 위해 만들어졌다. 첫 데이터 릴리스는 은하, 퀘이사, 먼 가스 구름의 라이먼-알파 숲에서 BAO 눈금을 측정한다. 적색편이 0.1~4.2 의 일곱 구간에 걸친 600 만 개가 넘는 천체다. 사람의 기대가 결과에 끼어들지 않도록 연구팀은 방법을 확정할 때까지 우주론적 답을 스스로 보지 못하게 하는 **블라인드 분석**을 했다. 큰 차이로 지금까지 가장 정밀한 BAO 측정이다.



DESI 는 미국 애리조나 키트피크의 Nicholas U. Mayall 4 미터 망원경에 설치돼 있다. 수천 개의 광섬유가 빛을 분광기로 보내 하늘의 위치를 수백만 은하와 퀘이사의 스펙트럼·적색편이로 바꾼다.

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

DESI 란 무엇인가

Dark Energy Spectroscopic Instrument 는 애리조나 키트피크의 Nicholas U. Mayall 4 미터 망원경에 설치된 분광기다. 암흑에너지가 빛을 내지 않으므로 이를 직접 보는 장비는 아니다. 대신 한 번에 약 5,000 개의 은하와 퀘이사 스펙트럼을 기록하고, 팽창하는 우주가 빛을 얼마나 늘였는지에 따라 각 천체의 적색편이를 읽어 수백만 천체의 3 차원 지도를 만든다. 암흑에너지는 그 지도에 나타나는 우주 팽창의 시간적 변화에서 추론한다. 로봇 광섬유부터 음향 표준자까지 전체 과정은 DESI 작동 원리를 참고하면 된다.

이 결과에서 널리 퍼진 제목은 암흑에너지가 일정하지 않을 수 있다는 것이었다. 우주의 가속팽창을 만드는 미지의 무언가가 시간이 지나며 약해지고 있어 표준 우주론 모형에 금이 갈 수 있다는 이야기다. 완전히 지어낸 주장은 아니지만 과대해석하기 쉽다. 더 정직한 버전은 더 구체적이고 더 흥미롭다. **DESI 의 표준자만 보면 평범한 표준모형과 잘 맞는다.** 새로운 물리의 힌트는 DESI 를 다른 데이터와 결합할 때만 나타나고, 그 힌트의 세기는 어떤 데이터를 결합하느냐에 따라 달라진다.

DESI 의 BAO 만으로는 일정한 암흑에너지, 즉 우주상수와 일치한다. 시간에 따라 변하는 암흑에너지에 대한 선호는 DESI 를 우주배경복사와 초신성 표본과 결합했을 때만 나오며, 사용하는 초신성 표본에 따라 강도가 움직인다.

표준자와 암흑에너지가 변할 수 있는 두 방식

BAO 눈금은 표준자다. 초기 우주 물리에서 실제 길이를 알고 있으므로 그 실제 길이와 특정 거리에서 보이는 겉보기 크기를 비교하면 그때까지 우주가 얼마나 팽창했는지 알 수 있다. 여러 거리에서 측정하면 우주의 전체 팽창 역사를 추적하고, 바로 그것이 암흑에너지가 지배하는 양이다.

Λ CDM 이라 부르는 표준모형에서 암흑에너지는 우주상수다. 빈 공간의 에너지 밀도가 항상 일정하다. 물리학자는 그 행동을 상태방정식 매개변수 w 로 표시하며 진짜 우주상수라면 언제 어디서나 정확히 -1 이다.

이를 시험하는 방법은 두 가지다. 간단한 방식은 w 가 -1 과 다른 어떤 상수일 수 있게 하는 것으로 w CDM 이라 부른다. 더 풍부한 방식은 우주 팽창에 따라 w 가 변하게 하는 것이다. 오늘의 값 w_0 와 변화율을 나타내는 w_a 라는 두 수로 기술하는 w_0w_a CDM 이다. 이 모형은 $w_0 = -1$, $w_a = 0$ 인 한 점에서 Λ CDM 과 같다. 여기서 '진화하는 암흑에너지'란 w_0 가 -1 보다 크고 w_a 가 음수인 쪽을 선호한다는 뜻이다. 과거에는 더 강하게 반발했고 지금은 약해지는 암흑에너지를 뜻한다.

연구진이 한 일

- DESI 첫해 자료의 은하·퀘이사·라이먼-알파 숲에서 BAO 눈금을 측정했다. $0.1 < z < 4.2$ 의 일곱 적색편이 구간, 600 만 개가 넘는 천체다.
- 확증편향을 막기 위해 방법론을 확정할 때까지 우주론적 결과를 감추는 **블라인드 분석**을 수행했다.
- 먼저 평평한 표준 Λ CDM 모형을 DESI BAO 단독에 맞추고, 이후 빅뱅 핵합성 사전정보와 Planck·ACT 의 우주배경복사 (CMB) 를 결합했다.
- 암흑에너지 w 를 시간에 무관한 상수로 두는 w CDM 과, 시간에 따라 변하는 w_0w_a 모형 (w_0w_a CDM) 두 방식으로 확장했다.

- DESI+CMB 에 Ia 형 초신성 편집본 세 가지, Pantheon+, Union3, DES-SN5YR 를 각각 결합해 시간가변 모형을 시험했다. 하나만 고르지 않았다.
- 중성미자의 총질량 상한을 구하고, 암흑에너지 배경이 변할 수 있게 했을 때 그 상한이 어떻게 달라지는지 확인했다.

무엇을 발견했나

- **DESI BAO 만 보면 표준모형과 일치한다.** 물질밀도는 $\Omega_m = 0.295 \pm 0.015$ 이고, 암흑에너지의 상수 w 를 자유롭게 두면 $w = -0.99^{+0.15}_{-0.13}$ 으로 우주상수 값 -1 에 정확히 걸쳐 있다.
- CMB 및 CMB 렌즈효과와 결합하면 $\Omega_m = 0.307 \pm 0.005$, 허블상수는 $H_0 = 67.97 \pm 0.38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 이다 (핵합성과 CMB 음향눈금을 조합하면 68.52 ± 0.62).
- **시간가변 모형에서는 조합 데이터가 진화하는 암흑에너지를 선호한다.** 즉 $w_0 > -1$, $w_a < 0$ 쪽이다. 선호도는 DESI+CMB 에서 2.6σ , 초신성을 더하면 Pantheon+, Union3, DES-SN5YR 에 따라 각각 2.5σ , 3.5σ , 3.9σ 다. 시그마는 표준모형 기대에서 결과가 얼마나 떨어져 있는지를 나타내며, 물리학에서 발견을 주장할 때 흔히 쓰는 기준은 5σ 다. 또한 통계 유의도가 해석이 맞다는 뜻은 아니다 (가이드).
- 중성미자 총질량을 자유롭게 두면 DESI+CMB 에서 95% 신뢰 수준 상한이 0.072 eV 로 매우 뽁뽁하다. 하지만 암흑에너지 배경이 ΛCDM 을 벗어날 수 있게 하면 이 한계가 크게 느슨해진다고 논문은 명시한다.

이 연구가 증명하지 않는 것

- 암흑에너지가 변한다고 보여주지 않는다. DESI 자체의 표준자는 우주상수와 일치한다. 진화의 힌트는 결합 적합, 그것도 두 매개변수의 더 풍부한 모형에서만 나타난다.
- ‘ ΛCDM 은 죽었다’거나 ‘아인슈타인이 틀렸다’는 뜻이 **아니다**. 가장 큰 값인 3.9σ 도 물리학에서 발견을 말할 때 관례적으로 요구하는 5σ 보다 낮고, DESI 단독에는 표준모형이 여전히 잘 맞는다.
- 결과는 **표본 독립적이지 않다**. 초신성 편집본을 바꾸면 유의도가 2.5σ 에서 3.9σ 까지 움직인다. 외부 데이터셋을 무엇을 붙이느냐에 따라 신호 크기가 이렇게 달라진다면 추적할 가치가 있는 힌트이지 확정해 둘 측정은 아니다.
- DESI 단독에서 $w_0 > -1$ 쪽으로 기우는 현상은 **부분적으로 하나의 이상점**, 적색편이 0.51 은하 구간에 의해 생긴다. 이 점은 ΛCDM 대비 조금 높다. 하지만 논문은 이 문제를 제대로 점검한다. 해당 점을 통계적 요동으로 취급하고, DESI 의 저적색편이 ($z < 0.6$) 측정 전체를 더 오래된 SDSS 값으로 바꿔도 암흑에너지 결과가 변하지 않음을 보여준다. 이상점은 DESI 단독에는 영향을 주지만 결합 힌트를 지탱하지 않는다. 따라서 이 주의점은 종종 전해지는 방향과 반대다. 가장 이상한 데이터를 제거하는 스트레스 테스트에서도 결과가 유지됐다.
- 중성미자 질량 상한도 **모형 독립적인 판결이 아니다**. 배경 팽창을 ΛCDM 으로 고정할 때만 매우 뽁뽁하며, 이를 완화하면 상한도 함께 느슨해진다.

근거는 얼마나 탄탄한가?

- **거리 측정으로서는 매우 강하다.** BAO 표준자는 우주론에서 가장 깨끗한 도구 가운데 하나이고, DESI 측정은 지금까지 가장 정밀하며, 블라인드 분석은 연구자가 기대한 답을 데이터에서 읽어내는 것을 막는 적절한 안전장치다.
- **암흑에너지 주장으로서는 진짜 흥미롭지만 결정적이지 않다.** DESI+CMB 에서 2.6σ , 가장 제약이 강한 초신성 세트와 합치면 3.9σ 까지 가는 결과는 관측을 더 해야 할 이유이지 모형을 뒤집을 이유는 아니다. 가장 중요한 주의점은 초신성 표본에 따라 값이 달라진다는 것이다. 저자들은 가장 이상한 BAO 데이터 한 점이 결과를 주도하지 않는지도 확인했다. 이런 주장에 필요한 숙제를 한 셈이다.
- 논문은 스스로 조심스럽다. 가장 큰 수치 하나만 골라 쓰지 않고 유의도를 세 가지로 보고하며, 중성미자 결과의 모형 의존성도 명시한다. 과장은 논문보다 재전달 과정에서 생긴다.

왜 중요한가

지난 25 년 동안 ‘암흑에너지’ 와 ‘우주상수’ 는 거의 같은 말처럼 쓰였다. 모든 측정이 $w = -1$ 과 일치했기 때문이다. DESI 는 다른 데이터와 결합했을 때 그 -1 이 시간에 따라 움직이는지 **정밀하게 질문할 수 있을 정도로** 처음 강력해진 데이터셋이고, 답이 완전히 ‘아니다’ 로만 나오지 않는다. 데이터가 할 수 있는 일의 실제 변화이며 관심을 받을 이유가 있다. 동시에 바로 그 정밀도 덕분에 힌트가 얼마나 조건부인지도 보인다. 어떤 데이터 조합에서는 살아 있고 다른 조합에서는 조용하며, 특히 어떤 초신성 목록과 결합하느냐에 민감하다. 적절한 태도는 무시도 조기 혁명 선언도 아니다. 더 큰 다음 DESI 릴리스와 독립 초신성 표본에서 이 드리프트가 강해지는지 사라지는지 보는 것이다. 우주론에서 진짜 ‘어쩌면’ 은 이런 모습이며, 어쩌면으로 보도할 가치가 있다.

핵심 요약

DESI 는 600 만 개 천체를 이용해 지금까지 가장 정밀한 바리온 음향 표준자로 우주의 팽창 역사를 측정했다. DESI 만 보면 암흑에너지가 일정한 표준모형과 일치한다. 이를 우주배경복사와 초신성 표본에 결합하면 시간에 따라 변하는 암흑에너지에 대한 선호가 나타나지만, 어떤 초신성 자료를 더하느냐에 따라 2.6σ 에서 3.9σ 수준이다. 실제로 흥미로운 힌트이지만 발견은 아니다. 물리학의 관례적 발견 문턱보다 낮고, 결합 데이터에 민감하다. 암흑에너지가 진화할 수도 있다. DESI 는 그 질문을 정밀하게 물을 가치가 있는 질문으로 만들었지만 아직 답하지는 않았다.

출처

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>