



The CLEAN PAPER

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

Najostrzejsza kosmiczna linijka DESI i ostrożne „być może” dotyczące ciemnej energii

DESI zmierzył historię ekspansji Wszechświata za pomocą najdokładniejszej dotąd linijki barionowo-akustycznej, wykorzystując sześć milionów obiektów. Sama linijka zgadza się z modelem standardowym, w którym ciemna energia jest stała. Preferencja dla ewoluującej ciemnej energii pojawia się dopiero po połączeniu DESI z mikrofalowym promieniowaniem tła i próbą supernowych — na poziomie od $2,6\sigma$ do $3,9\sigma$ zależnie od dodanego zbioru, poniżej progu odkrycia i z wyraźną wrażliwością na zestaw danych. To precyzyjnie postawione prawdziwe pytanie, a nie gotowa odpowiedź.

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

Linijka zbudowana z dźwięku

We wczesnym Wszechświecie, zanim pojawiły się gwiazdy, gorąca plazma zwykłej materii i światła drgała. Fale ciśnienia bieły przez nią z prędkością przekraczającą połowę prędkości światła, aż Wszechświat ochłodził się na tyle, by mogły powstać atomy, a drgania ustały — utrwalając w rozkładzie materii słabo zaznaczoną preferowaną odległość. Ta odległość, *horyzont dźwięku*, wynosi dziś około 150 megaparseków (mniej więcej 490 milionów lat świetlnych) i ujawnia się jako niewielki nadmiar par galaktyk oddzielonych takim właśnie dystansem, we wszystkich kierunkach i epokach. Kosmolodzy nazywają to barionowymi oscylacjami akustycznymi, czyli BAO, i wykorzystują jako linię standardową: mierząc, jak duża wydaje się ta zamrożona skala na niebie w różnych odległościach, odtwarzają tempo ekspansji Wszechświata w całej jego historii.

Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) zbudowano po to, by mierzyć tę linię lepiej niż kiedykolwiek wcześniej. Pierwsza publikacja danych mapuje skalę BAO w galaktykach, kwazarach i lesie Lyman-alfa odległych obłoków gazu — obejmuje ponad sześć milionów obiektów w siedmiu przedziałach przesunięcia ku czerwieni od 0,1 do 4,2. Aby ludzkie oczekiwania nie wpłynęły na wynik, zespół prowadził analizę *na ślepo*, ukrywając przed sobą wynik kosmologiczny do czasu ostatecznego ustalenia metod. Jest to zdecydowanie najdokładniejszy dotąd pomiar BAO.



DESI jest zamontowany na 4-metrowym teleskopie Nicholas U. Mayalla w Kitt Peak w Arizonie. Instrument kieruje światło przez tysiące włókien optycznych do spektrografów, przekształcając położenia na niebie w widma i przesunięcia ku czerwieni milionów galaktyk i kwazarów.

Czym jest DESI

Dark Energy Spectroscopic Instrument to spektrograf na 4-metrowym teleskopie Nicholasa U. Mayalla w Kitt Peak w Arizonie. Nie obserwuje ciemnej energii bezpośrednio — nic nie może tego zrobić, ponieważ ciemna energia nie emituje światła. Zamiast tego rejestruje jednocześnie widma około 5000 galaktyk i kwazarów, odczytuje przesunięcie ku czerwieni każdego obiektu ze stopnia, w jakim rozszerzający się Wszechświat rozciągnął jego światło, i buduje trójwymiarową mapę milionów takich obiektów. Ciemną energię wnioskuje się następnie ze zmian kosmicznej ekspansji widocznych na tej mapie. Cały ciąg — od robotycznych włókien po linijkę akustyczną — opisuje przewodnik Jak działa DESI.

Nagłówek, który obiegił świat, głosił, że ciemna energia może nie być stała — że tajemniczy czynnik przyspieszający ekspansję Wszechświata może z czasem *slabnąć*, naruszając standardowy model kosmologiczny. To twierdzenie nie jest wymyślane, ale łatwo odczytać z niego zbyt wiele. Uczciwa wersja jest bardziej precyzyjna i ciekawsza: sama linijka DESI zgadza się ze zwykłym modelem standardowym. Ślad czegoś nowego pojawia się dopiero po połączeniu DESI z innymi danymi — a jego siła zależy od tego, które dane zostaną wybrane.

Sama linijka barionowo-akustyczna DESI jest zgodna ze stałą ciemną energią, czyli stałą kosmologiczną. Preferencja dla ciemnej energii *zmiennej w czasie* pojawia się dopiero po połączeniu DESI z mikrofalowym promieniowaniem tła i zbiorem supernowych — a jej siła zmienia się zależnie od użytego zbioru supernowych.

Linijka standardowa i dwa sposoby zmienności ciemnej energii

Skala BAO jest *linijką standardową*: znamy jej prawdziwą długość z fizyki wczesnego Wszechświata, więc porównanie tej długości z jej pozornym rozmiarem w danej odległości mówi, jak bardzo Wszechświat zdążył się do tego czasu rozszerzyć. Pomiar na wielu odległościach pozwala prześledzić całą historię ekspansji — czyli proces, którym rządzi ciemna energia.

W modelu standardowym, zwanym Λ CDM, ciemna energia jest *stałą kosmologiczną*: niezmienną gęstością energii pustej przestrzeni. Fizycy opisują jej zachowanie parametrem „równania stanu” w , który dla prawdziwej stałej kosmologicznej wynosi dokładnie -1 , wszędzie i zawsze.

Można to założenie poluzować na dwa sposoby. Prostszy pozwala, by w było inną stałą, ale nadal nie zmieniało się w czasie — to model „wCDM”. Bogatszy pozwala w zmieniać się wraz z ekspansją Wszechświata i opisuje je dwiema liczbami: w_0 , wartością dzisiejszą, oraz w_a , tempem zmiany. Model „ w_0w_a CDM” redukuje się do Λ CDM w jednym punkcie: $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Preferencja dla w_0 większego niż -1 i ujemnego w_a oznacza tu „zmienną ciemną energię”: silniej odpychającą w przeszłości i łagodniejącą obecnie.

Co zrobili autorzy

- Zmierzyli skalę BAO w danych z pierwszego roku DESI — dla galaktyk, kwazarów i lasu Lyman-alfa — obejmujących ponad sześć milionów obiektów w siedmiu przedziałach przesunięcia ku czerwieni, $0,1 < z < 4,2$.
- Przeprowadzili analizę **na ślepo**, ukrywając wynik kosmologiczny do czasu ustalenia metodologii, aby chronić się przed efektem potwierdzenia.
- Dopasowali standardowy płaski model Λ CDM najpierw do samych BAO DESI, a następnie w połączeniu z założeniem z nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu oraz mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB) mierzonym przez Planck i ACT.
- Rozszerzyli model na dwa sposoby: o stałą w ciemnej energii (w CDM) oraz o zmienne w czasie $w_0 w_a$ ($w_0 w_a$ CDM).
- Testowali model zmienny w czasie, łącząc DESI+CMB kolejno z trzema różnymi zestawami supernowych typu Ia — Pantheon+, Union3 i DES-SN5YR — zamiast wybierać tylko jeden.
- Wyznaczyli ograniczenia sumy mas neutrin i sprawdzili, jak zmieniają się one po dopuszczeniu zmienności tła ciemnej energii.

Co odkryli

- **Same BAO DESI są zgodne z modelem standardowym.** Dają gęstość materii $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$, a po dopuszczeniu stałego w ciemnej energii: $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$, czyli dokładnie w pobliżu wartości -1 właściwej stałej kosmologicznej.
- Po połączeniu z CMB i jego soczewkowaniem DESI daje $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ oraz stałą Hubble’a $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ($68,52 \pm 0,62$ po połączeniu zamiast tego z nukleosyntezą i skalą akustyczną CMB).
- **W modelu zmiennym w czasie połączone dane preferują ewoluującą ciemną energię** — $w_0 > -1$ i $w_a < 0$. Preferencja wynosi $2,6\sigma$ dla DESI+CMB, a po dodaniu próby supernowych rośnie odpowiednio do $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ lub $3,9\sigma$ dla Pantheon+, Union3 i DES-SN5YR (sigma mierzy odległość wyniku od oczekiwania modelu standardowego; 5σ jest zwyczajowym progiem ogłoszenia odkrycia i nie oznacza, że interpretacja musi być poprawna — przewodnik).
- Przy swobodnej sumie mas neutrin otrzymano ścisłą granicę — poniżej $0,072 \text{ eV}$ (95% ufności) dla DESI+CMB — lecz praca jasno zaznacza, że ograniczenie znacznie słabnie, jeśli tło ciemnej energii może odbiegać od Λ CDM.

Czego to nie dowodzi

- Wynik **nie** pokazuje, że ciemna energia ewoluuje. Własna linijka DESI jest zgodna ze stałą kosmologiczną; ślad ewolucji pojawia się tylko w dopasowaniach *łączonych* i tylko w bogatszym modelu dwuparametrowym.
- Nie oznacza, że „ Λ CDM umarł” ani że „Einstein się mylił”. Najsilniejszy wynik, $3,9\sigma$, pozostaje

poniżej progu 5σ wymaganego przez fizyków do ogłoszenia odkrycia, a model standardowy nadal dobrze pasuje do samych danych DESI.

- Wynik **zależy od użytej próby**. Zmiana zestawu supernowych przesuwia istotność z $2,5\sigma$ do $3,9\sigma$ — o ponad jedno sigma. Sygnał, którego wielkość tak silnie zależy od dołączonego zewnętrznego zbioru danych, jest wskazówką wartą dalszych badań, a nie pomiarem, który można uznać za ustalony.
- Skłonność samych danych DESI ku $w_0 > -1$ wynika **częściowo z jednego anomального punktu** — przedziału galaktyk o przesunięciu ku czerwieni 0,51, leżącego nieco powyżej przewidywania Λ CDM. W tym miejscu autorzy wykonują jednak należyłą kontrolę: traktują ten punkt jako fluktuację statystyczną i pokazują, że zastąpienie *wszystkich* niskoczerwiennych pomiarów DESI ($z < 0,6$) starszymi pomiarami SDSS nie zmienia wyniku dotyczącego ciemnej energii. Nietypowy punkt wpływa na samo DESI, ale **nie** podtrzymuje łączonego śladu. (Niezależne grupy później dokładnie zbadały jego rolę). To zastrzeżenie działa więc odwrotnie, niż bywa przedstawiane: wynik poddano próbie z użyciem najbardziej anomalnych danych i przetrwał.
- Ograniczenie masy neutrin **nie** jest werdyktem niezależnym od modelu. Jest ściśle tylko przy utrzymaniu ekspansji tła zgodnej z Λ CDM; po poluzowaniu tego założenia granica także się rozluźnia.

Jak silne są dowody

- **Bardzo silne jako pomiar odległości.** Linijka BAO jest jednym z najczystszych narzędzi kosmologii, DESI zapewnia jej najdokładniejszy dotąd pomiar, a analiza na ślepo stanowi właśnie takie zabezpieczenie, jakiego potrzeba, by nie wczytywać oczekiwanego wyniku w dane.
- **Naprawdę intrygujące, ale nierozstrzygające jako twierdzenie o ciemnej energii.** Preferencja $2,6\sigma$ dla DESI+CMB, rosnąca do $3,9\sigma$ po dodaniu najbardziej ograniczającego zbioru supernowych, zasługuje na więcej czasu obserwacyjnego, ale nie na obalenie modelu. Uczciwym powodem ostrożności jest rozrzut między próbami supernowych; na korzyść autorów przemawia też sprawdzenie, że pojedynczy najbardziej anomalny punkt BAO nie napędza wyniku — dokładnie taka kontrola jest potrzebna przy podobnym twierdzeniu.
- Praca zachowuje ostrożność: podaje istotność na trzy sposoby zamiast cytować tylko największą wartość i zaznacza zależność wyniku dla neutrin od modelu. Jeśli pojawia się przesada, to w późniejszych opowieściach, nie w samej pracy.

Dlaczego to ważne

Przez ćwierć wieku „ciemna energia” i „stała kosmologiczna” były używane niemal wymiennie, ponieważ każdy pomiar był zgodny z w równym dokładnie -1 . DESI jest pierwszym zbiorem danych na tyle precyzyjnym, by po połączeniu z innymi można było w ogóle zapytać, czy ta wartość -1 się zmienia — i otrzymać odpowiedź inną niż jednoznaczne „nie”. To realna zmiana możliwości danych i powód, dla którego wynik zasługuje na uwagę. Ta sama precyzja pozwala jednak zobaczyć, jak warunkowy jest ślad: obecny w niektórych kombinacjach danych, cichy w innych i szczególnie

wrażliwy na wybór katalogu supernowych dołączonego do DESI. Właściwą reakcją nie jest ani odrzucenie, ani przedwczesne ogłoszenie rewolucji. Trzeba obserwować kolejny, większy zbiór DESI — DR2, opublikowany już w 2025 roku — oraz niezależne próby supernowych i sprawdzić, czy odchylenie się umocni, czy zniknie. Tak wygląda prawdziwe „być może” w kosmologii i właśnie jako „być może” warto je opisywać.

Zwięzłe podsumowanie

DESI zmierzył historię ekspansji Wszechświata za pomocą najlepszej dotąd liniiki barionowo-akustycznej, wykorzystując sześć milionów obiektów. Sama linijka zgadza się z modelem standardowym, w którym ciemna energia jest stała. Po połączeniu jej z mikrofalowym promieniowaniem tła i próbą supernowych pojawia się preferencja dla ciemnej energii zmieniającej się w czasie — od $2,6\sigma$ do $3,9\sigma$ zależnie od dodanego zbioru supernowych. To rzeczywisty i interesujący ślad, nie odkrycie: pozostaje poniżej wymaganego progu i zmienia się wraz z doborem danych. Ciemna energia może ewoluować. DESI uczynił to pytanie wartym precyzyjnego postawienia — ale jeszcze na nie nie odpowiedział.

Źródła

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>