



The CLEAN PAPER

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

La règle cosmique la plus précise de DESI et un prudent « peut-être » sur l'énergie sombre

DESI a mesuré l'histoire de l'expansion de l'Univers avec la règle des oscillations acoustiques des baryons la plus précise jamais construite, à partir de six millions d'objets. Prise isolément, cette règle est compatible avec le modèle standard où l'énergie sombre est constante. Une préférence pour une énergie sombre évolutive n'apparaît que lorsque DESI est combiné au fond diffus cosmologique et à un échantillon de supernovas — entre $2,6\sigma$ et $3,9\sigma$ selon les supernovas ajoutées, sous le seuil exigé pour une découverte et avec une sensibilité aux données associées. Une vraie question posée avec précision, pas une réponse.

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

Une règle faite de son

Aux débuts de l'Univers, avant l'apparition des étoiles, le plasma brûlant de matière ordinaire et de lumière résonnait. Des ondes de pression le parcouraient à plus de la moitié de la vitesse de la lumière, jusqu'à ce que l'Univers se refroidisse suffisamment pour permettre la formation des atomes et que ces oscillations cessent — imprimant une faible distance préférentielle dans la répartition de la matière. Cette distance, l'*horizon sonore*, mesuré aujourd'hui environ 150 mégaparsecs — soit quelque 490 millions d'années-lumière — et se manifeste par un léger excès de paires de galaxies séparées par cet intervalle, dans toutes les directions et à toutes les époques. Les cosmologues l'appellent oscillation acoustique des baryons, ou BAO, et s'en servent comme d'une règle étalon : mesurer la taille apparente de cette échelle figée dans le ciel à différentes distances permet de retracer la vitesse d'expansion de l'Univers au fil de son histoire.

Le Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) a été conçu pour mesurer cette règle avec une précision inégalée. Sa première publication de données cartographie l'échelle BAO dans les galaxies, les quasars et la forêt Lyman-alpha de nuages de gaz lointains — plus de six millions d'objets répartis dans sept tranches de décalage vers le rouge, de 0,1 à 4,2. Pour soustraire le résultat aux attentes humaines, l'équipe a mené l'analyse *en aveugle*, sans connaître la réponse cosmologique jusqu'au verrouillage des méthodes. Il s'agit, de très loin, de la mesure de BAO la plus précise jamais réalisée.



DESI est installé sur le télescope Nicholas U. Mayall de 4 mètres à Kitt Peak, en Arizona. L'instrument achemine la lumière de milliers de fibres optiques vers des spectrographes, transformant les positions dans le ciel en spectres et en décalages vers le rouge pour des millions de galaxies et de quasars.

Qu'est-ce que DESI ?

Le **Dark Energy Spectroscopic Instrument** est un spectrographe installé sur le télescope Nicholas U. Mayall de 4 mètres à Kitt Peak, en Arizona. Il ne voit pas directement l'énergie sombre — aucun instrument ne le peut, puisque celle-ci n'émet pas de lumière. Il enregistre plutôt les spectres d'environ 5 000 galaxies et quasars à la fois, détermine le décalage vers le rouge de chaque objet d'après l'étirement de sa lumière par l'expansion de l'Univers, et construit ainsi une carte tridimensionnelle de millions d'entre eux. L'énergie sombre est ensuite déduite de la façon dont cette carte révèle l'évolution de l'expansion cosmique au cours du temps. Pour suivre toute la chaîne — des fibres robotisées à la règle acoustique — voir Comment fonctionne DESI.

Le message qui s'est diffusé est que l'énergie sombre pourrait ne pas être constante — que cette entité mystérieuse qui accélère l'expansion de l'Univers pourrait *s'affaiblir* avec le temps, fissurant le modèle cosmologique standard. Cette affirmation n'est pas inventée, mais il est facile de lui faire dire trop. La version rigoureuse est plus précise, et plus intéressante : prise isolément, la règle de DESI est compatible avec le modèle le plus simple. L'indice d'une nouveauté n'apparaît que lorsque DESI est combiné à d'autres données — et sa force dépend des autres données choisies.

La règle des oscillations acoustiques des baryons mesurée par DESI est, à elle seule, compatible avec une énergie sombre constante — une constante cosmologique. La préférence pour une énergie sombre *évolutive* n'émerge que lorsque les données de DESI sont combinées au fond diffus cosmologique et à un échantillon de supernovas, et son intensité varie selon l'échantillon retenu.

La règle étalon et les deux manières dont l'énergie sombre peut varier

L'échelle BAO est une *règle étalon* : puisque sa longueur réelle est connue grâce à la physique de l'Univers primordial, la comparaison entre cette longueur et sa taille apparente à une distance donnée indique dans quelle mesure l'Univers s'était alors dilaté. Mesurée à de nombreuses distances, cette règle retrace toute l'histoire de l'expansion — celle que gouverne l'énergie sombre.

Dans le modèle standard, appelé Λ CDM, l'énergie sombre est une *constante cosmologique* : une densité d'énergie fixe du vide, qui ne change jamais. Les physiciens décrivent son comportement à l'aide d'un paramètre d'« équation d'état », w , qui vaut exactement -1 pour une véritable constante cosmologique, partout et à tout moment.

Pour tester cette hypothèse, on peut l'assouplir de deux manières. La plus simple consiste à permettre à w de prendre une autre valeur constante — toujours fixe dans le temps : c'est le modèle « w CDM ». La plus riche permet à w de varier avec l'expansion de l'Univers, au moyen de deux nombres : w_0 , sa valeur actuelle, et w_a , la vitesse à laquelle elle dérive. Ce modèle « $w_0 w_a$ CDM » se réduit à Λ CDM au point unique $w_0 = -1$, $w_a = 0$. Une préférence pour w_0 supérieur à -1 et w_a négatif correspond ici à une « énergie sombre évolutive » : une énergie sombre qui était plus répulsive dans le passé et dont l'effet s'atténue aujourd'hui.

Ce que les auteurs ont fait

- Ils ont mesuré l'échelle BAO à partir de la première année de données de DESI — galaxies, quasars et forêt Lyman-alpha — sur plus de six millions d'objets répartis dans sept tranches couvrant $0,1 < z < 4,2$.
- Ils ont mené l'analyse **en aveugle**, en masquant le résultat cosmologique jusqu'à la fixation de la méthodologie, afin de limiter le biais de confirmation.
- Ils ont ajusté le modèle Λ CDM plat standard aux seules BAO de DESI, puis à une combinaison incluant un a priori issu de la nucléosynthèse primordiale et le fond diffus cosmologique (CMB) mesuré par Planck et ACT.
- Ils ont étendu le modèle de deux façons : un w constant pour l'énergie sombre (w CDM), puis un $w_0 w_a$ variable dans le temps ($w_0 w_a$ CDM).
- Ils ont testé le modèle variable dans le temps en combinant à tour de rôle DESI+CMB avec trois compilations différentes de supernovas de type Ia — Pantheon+, Union3 et DES-SN5YR — plutôt que d'en sélectionner une seule.
- Ils ont établi des limites sur la masse totale des neutrinos et vérifié comment celles-ci évoluent lorsque le cadre de l'énergie sombre est autorisé à s'écarter de Λ CDM.

Ce qu'ils ont constaté

- **Les BAO de DESI prises isolément sont compatibles avec le modèle standard.** Elles donnent une densité de matière $\Omega_m = 0,295 \pm 0,015$ et, lorsqu'une constante w distincte est autorisée pour l'énergie sombre, $w = -0,99 (+0,15/-0,13)$ — exactement au voisinage de la valeur -1 de la constante cosmologique.
- Combiné au CMB et à son effet de lentille, DESI donne $\Omega_m = 0,307 \pm 0,005$ et une constante de Hubble $H_0 = 67,97 \pm 0,38 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ — ou $68,52 \pm 0,62$ avec la nucléosynthèse et l'échelle acoustique du CMB.
- **Dans le modèle variable dans le temps, les combinaisons de données privilégient une énergie sombre évolutive** — $w_0 > -1$ et $w_a < 0$. Cette préférence atteint $2,6\sigma$ pour DESI+CMB ; avec l'ajout d'un échantillon de supernovas, elle passe respectivement à $2,5\sigma$, $3,5\sigma$ ou $3,9\sigma$ pour Pantheon+, Union3 ou DES-SN5YR. Sigma mesure l'écart d'un résultat par rapport à l'attente du modèle standard ; 5σ est le seuil habituellement exigé pour annoncer une découverte et ne signifie pas que l'interprétation est correcte — guide.
- Lorsqu'elle est laissée libre, la masse totale des neutrinos est étroitement bornée — à moins de $0,072 \text{ eV}$ avec un niveau de confiance de 95 % pour DESI+CMB — mais l'article précise que cette borne se relâche considérablement si le cadre de l'énergie sombre peut s'écarter de Λ CDM.

Ce que cela ne démontre pas

- Cela ne montre **pas** que l'énergie sombre évolue. La règle propre à DESI est compatible avec une constante cosmologique ; l'indice d'une évolution n'apparaît que dans des ajustements *combinés* et uniquement dans le modèle plus riche à deux paramètres.
- Cela ne signifie **pas** que « Λ CDM est mort » ou qu'« Einstein avait tort ». Le chiffre le plus élevé, $3,9\sigma$, reste inférieur au seuil conventionnel de 5σ que les physiciens exigent avant de parler de découverte — et le modèle standard demeure un bon ajustement aux seules données de DESI.
- Le résultat n'est **pas** indépendant de l'échantillon. Changer de compilation de supernovas fait varier la significativité de $2,5\sigma$ à $3,9\sigma$ — soit plus d'un sigma. Un signal dont l'ampleur dépend autant du jeu de données externe qu'on lui adjoint est un indice à approfondir, pas une mesure sur laquelle tabler.
- La préférence des données de DESI *seules* pour $w_0 > -1$ tient **en partie à un unique point atypique** — la tranche de galaxies à $z = 0,51$, légèrement élevée par rapport à Λ CDM. Mais c'est précisément là que l'article procède aux vérifications nécessaires : il traite ce point comme une fluctuation statistique et montre que remplacer *toutes* les mesures de DESI à faible décalage vers le rouge ($z < 0,6$) par celles, plus anciennes, du SDSS ne change pas le résultat sur l'énergie sombre. Ce point étrange infléchit les données de DESI prises isolément ; il ne **soutient pas à lui seul** l'indice combiné. Des groupes indépendants ont depuis étudié son rôle de plus près. Cette réserve joue donc dans le sens opposé à certains récits : le résultat a été soumis à un test de robustesse face à sa donnée la plus anormale, et il a tenu.
- La limite sur la masse des neutrinos n'est **pas** un verdict indépendant du modèle. Elle n'est stricte que si l'expansion de fond est contrainte à suivre Λ CDM ; lorsque cette hypothèse est relâchée, la borne l'est aussi.

Quelle est la solidité des éléments probants ?

- Ils sont **très solides en tant que mesuré de distance**. La règle BAO est l'un des outils les plus fiables de la cosmologie, celle de DESI est la plus précise à ce jour, et l'analyse en aveugle constitue exactement la protection souhaitable contre la tentation de lire dans les données la réponse espérée.
- Ils sont **véritablement intrigants, mais non décisifs, quant à l'énergie sombre**. Une préférence de $2,6\sigma$ pour DESI+CMB, qui atteint $3,9\sigma$ avec l'ensemble de supernovas le plus contraignant, mérite du temps de télescope supplémentaire — elle ne suffit pas à renverser un modèle. La variation entre les échantillons de supernovas est la raison légitime de rester prudent ; les auteurs ont également vérifié, à leur crédit, que le point BAO le plus atypique ne commande pas le résultat — exactement le contrôle qu'exige une affirmation de ce type.
- L'article se montre prudent : il rapporte la significativité de trois façons au lieu de ne citer que la plus élevée, et signalé la dépendance au modèle de son résultat sur les neutrinos. Les exagérations, lorsqu'il y en a, se trouvent dans les récits ultérieurs, pas dans l'article.

Pourquoi c'est important

Depuis un quart de siècle, « énergie sombre » et « constante cosmologique » sont presque devenus synonymes, car toutes les mesures étaient compatibles avec une valeur de w exactement égale à -1 . DESI est le premier jeu de données assez précis pour pouvoir réellement *demandar*, en combinaison avec d'autres, si ce -1 dérive — et obtenir autre chose qu'un non catégorique. C'est un véritable changement dans ce que les données permettent de faire, et la raison pour laquelle le résultat mérite l'attention. Mais cette même précision révèle aussi combien l'indice est conditionnel : présent dans certaines combinaisons de données, discret dans d'autres et surtout sensible au catalogue de supernovas associé à DESI. La juste attitude n'est ni le rejet ni l'annonce prématurée d'une révolution. Il faut observer la prochaine publication, plus vaste, de DESI — DR2, déjà parue en 2025 — ainsi que les échantillons indépendants de supernovas, et voir si la dérive se confirme ou s'efface. Voilà à quoi ressemble un véritable « peut-être » en cosmologie, et c'est comme tel qu'il mérite d'être rapporté.

Résumé clair

DESI a mesuré l'histoire de l'expansion de l'Univers à l'aide de la règle des oscillations acoustiques des baryons la plus précise jamais construite, à partir de six millions d'objets. Prise isolément, cette règle est compatible avec le modèle standard dans lequel l'énergie sombre est constante. Lorsqu'on la combine au fond diffus cosmologique et à un échantillon de supernovas, une préférence pour une énergie sombre variable au cours du temps apparaît — entre $2,6\sigma$ et $3,9\sigma$ selon les supernovas ajoutées. C'est un indice réel et intéressant, pas une découverte : il reste sous le seuil exigé par les physiciens et varie en fonction des données associées. L'énergie sombre évolue peut-être. DESI a permis de poser cette question avec précision ; il n'y a pas encore répondu.

Sources

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>