Nouvelle ère d'observation en cosmologie avec les relevés DESI et Euclid

Nathalie Palanque-Delabrouille (npalanque-delabrouille@lbl.gov)
IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette
Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

Stéphanie Escoffier (escoffier@cppm.in2p3.fr)
Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM), CNRS/IN2P3, Aix Marseille Université, Case 902, 163 avenue de Luminy, 13288 Marseille cedex 09

La cosmologie a vécu une véritable révolution en 1998 avec la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Impossible dans un Univers composé uniquement de matière et de rayonnements, cette accélération nécessite une nouvelle composante, baptisée énergie noire.
De nombreux projets ont vu le jour dans l'objectif de caractériser cette mystérieuse énergie noire au moyen de grands relevés spectroscopiques de galaxies, comme le projet au sol DESI *(Dark Energy Spectroscopic Instrument)* et la mission spatiale Euclid. Par des approches différentes mais complémentaires, ces deux expériences devraient apporter des résultats cruciaux sur l'évolution de l'Univers et la nature de ses constituants.

Expansion de l'Univers, énergie noire et alternatives

L'association des travaux d'Alexander Friedmann et de Edwin Hubble a conduit à l'une des découvertes les plus fondamentales en faveur du modèle du Big Bang : l'Univers est en expansion. Friedmann, en 1922, a établi la description mathématique de l'expansion de l'Univers au cours du temps à partir des équations de la relativité générale d'Einstein, tandis que Hubble, en 1929, a constaté que les galaxies semblent s'éloigner de nous d'autant plus vite qu'elles sont lointaines. Cette simple relation entre distance et vitesse de récession des galaxies est un outil précieux de la cosmologie, car elle démontre non pas un réel déplacement des galaxies, mais l'expansion de l'Univers lui-même. Sous l'effet de cette expansion, la distance entre deux galaxies croît au cours du temps. Deux points séparés par 450 000 années-lumière lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans, par exemple, sont aujourd'hui, 13,8 milliards d'années plus tard, distants de 450 millions d'années-lumière.

L'histoire de l'expansion de l'Univers est ainsi encodée dans son taux d'expansion à travers les âges cosmiques. Ce taux d'expansion dépend de la composition de l'Univers, et n'évolue pas au même rythme selon les proportions respectives de ses divers constituants. Une conclusion ferme, toutefois, est que pour un Univers constitué exclusivement de matière et de rayonnements (sous forme de photons ou de particules relativistes), l'expansion ne peut que ralentir, en raison de l'effet attractif de la gravité. En 1998, deux équipes ont mesuré cette expansion en utilisant les supernovæ de type 1a comme chandelles standard. Ces supernovæ ont la particularité (propre aux 1a uniquement) de toujours exploser à une masse stellaire bien déterminée, ce qui permet d'en déduire leur distance. Quelle ne fut pas leur surprise lorsque les deux équipes de chercheurs ont découvert que l'expansion de l'Univers n'était pas en ralentissement, comme on s'y attendait… mais en accélération ! Impossible à expliquer avec les constituants ordinaires, cette accélération de l'expansion de l'Univers nécessite d'invoquer une nouvelle composante, baptisée énergie noire.

L'énergie noire est encore aujourd'hui l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie. Ce terme générique englobe toutefois plusieurs interprétations possibles que les projets actuels et futurs cherchent à départager.

L'interprétation la plus simple consiste à considérer que l'énergie noire intervient comme une constante cosmologique, dénotée Λ, ajoutée aux équations d'Einstein. Cette constante agit comme une forme de gravité répulsive, lui permettant d'accélérer l'expansion.

Par ailleurs, l'énergie noire peut être introduite sous la forme d'une nouvelle composante w, caractérisée par la relation (appelée équation d'état) reliant sa densité ρ à sa pression p : $w = p/\rho$. La constante cosmologique est alors décrite dans ce cadre comme une composante régie par l'équation d'état $w = -1$, invariable dans le temps, et exprimant un fluide de pression négative opposée à sa densité. Les modèles plus complexes proposent une évolution

>>>

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202683011

> **La combinaison des résultats de DESI et d'Euclid avec ceux issus d'autres sondes cosmologiques indépendantes [...] est cruciale pour [...] tester la cohérence du modèle standard.**

>>>

au cours des âges cosmiques. De tels modèles d'énergie noire dynamique présentent l'avantage de laisser ouverte la possibilité d'un destin moins tragique à notre Univers que celui prévu dans le cadre d'une constante cosmologique où une expansion de plus en plus rapide éloignerait inexorablement les galaxies, et même les étoiles, voire ultimement les atomes, les uns des autres.

Une autre interprétation, enfin, consiste à chercher l'explication à l'accélération de l'expansion de l'Univers non pas du côté de sa composition mais de celui des lois de la gravité qui régissent la géométrie de l'espace-temps. C'est ce que résume si bien cette citation du physicien John Archibald Wheeler: "*Spacetime grips mass, telling it how to move… Mass grips spacetime, telling it how to curve*[(a)]." La gravité, aux échelles cosmologiques, pourrait s'éloigner des lois de la relativité générale, et reproduire l'expansion observée.

Seules de nouvelles observations permettront de trancher entre ces différentes hypothèses.

DESI et la cartographie de l'Univers

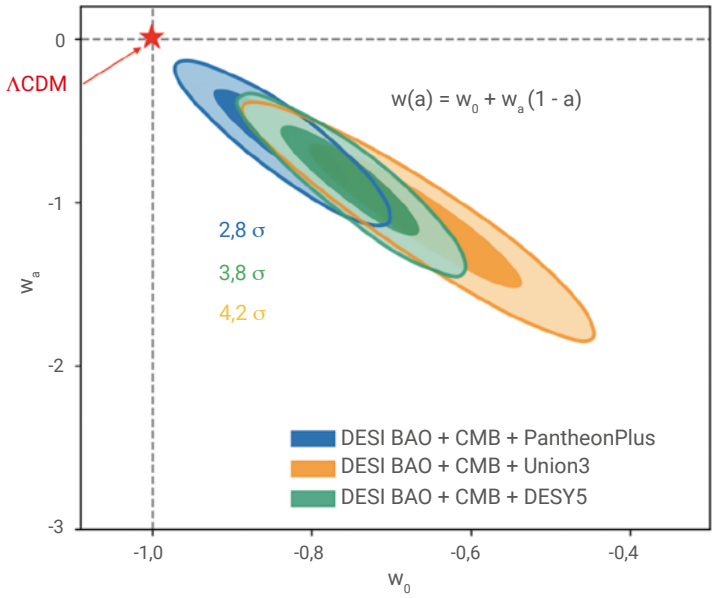
Le *Dark Energy Spectroscopic Instrument*, ou DESI, est dédié à la traque de l'énergie noire en cartographiant l'Univers en trois dimensions. Tandis que les deux dimensions transverses proviennent d'observations photométriques, la profondeur ne peut être obtenue précisément que par spectroscopie, et c'est là la mission de DESI. En mesurant le spectre de plus de 40 millions de galaxies et de quasars – objets extragalactiques super-lumineux permettant d'étudier l'Univers lointain – répartis sur des époques couvrant plus de 12 milliards d'années, soit l'essentiel de l'histoire de l'Univers, DESI va pouvoir déterminer leur décalage vers le rouge (*redshift* en anglais), un effet comparable à l'effet Doppler, causé par l'expansion de l'Univers. Au moyen d'un modèle cosmologique, le *redshift* permet de déterminer la distance de l'objet étudié.

L'intérêt de cette carte 3D est d'y rechercher une distance caractéristique séparant les galaxies. L'Univers primordial est un plasma de baryons et de photons dans lequel des ondes se propagent, à l'instar des ondes acoustiques dans un plasma en laboratoire. 380 000 ans après le Big Bang, la température de l'Univers a suffisamment décru pour permettre aux électrons et protons de se combiner en atomes d'hydrogène neutres. Les photons sont alors libres de se propager, formant le rayonnement micro-onde communément appelé fond diffus cosmologique (ou CMB, pour *Cosmic Microwave Background*). À cet instant, le plasma étant devenu optiquement mince, les ondes acoustiques se retrouvent subitement figées à la distance maximale qu'elles ont eu le temps de parcourir. De son côté, la matière peut commencer à s'agglomérer sous l'effet de la gravité pour donner naissance aux grandes structures de galaxies, amas de galaxies et filaments cosmiques que l'on observe aujourd'hui. Les galaxies se forment préférentiellement dans les régions les plus denses de l'Univers. Par conséquent, l'empreinte des ondes acoustiques de l'Univers primordial se retrouve ultérieurement dans la répartition des galaxies ! Par rapport à une distribution uniforme, statistiquement, on note un excès de probabilité que deux galaxies soient distantes aujourd'hui de 450 millions d'années-lumière, correspondant au rayon de l'onde acoustique imprimée dans la trame cosmique, plutôt que de toute autre distance. Mesurée à diverses époques cosmiques, cette distance caractéristique peut être utilisée comme une règle-étalon permettant de suivre l'évolution du taux d'expansion de l'Univers à travers les âges.

Constante cosmologique ou énergie noire dynamique ?

Le projet DESI, mené à l'aide du télescope Mayall situé au sommet de l'observatoire de Kitt Peak en Arizona, a entamé son relevé en mai 2021. Initialement prévu pour une durée de cinq ans, celui-ci a depuis été prolongé jusqu'à fin 2028. Les premières analyses de DESI ont été présentées en avril 2024, avec des échos étourdissants auprès de la communauté scientifique et de la presse internationale. Les résultats ont été cités comme l'une des « meilleures découvertes » de l'année 2024 par *Time Magazine* et l'une des plus grandes percées de 2024 en physique par *Quanta Magazine*, tandis que l'article de la collaboration DESI dans lequel ils ont été annoncés est le plus cité de l'année 2024 en physique des hautes énergie et cosmologie.

En quoi ces résultats sont-ils si révolutionnaires ? Alors que jusqu'ici toutes les expériences expliquaient l'accélération de l'expansion de l'Univers par une constante cosmologique, les résultats de DESI indiquent une préférence pour un modèle d'énergie noire variable dans le temps. Certes, l'effet reste faible, mais ce résultat est presque aussi révolutionnaire que celui de la découverte de l'énergie noire elle-même ! Combinant les mesures de trois années d'observation de DESI avec celles provenant du fond diffus cosmologique mesurées avec précision par le satellite Planck, la préférence pour une énergie noire dynamique par rapport à une constante cosmologique est de 3,1 sigmas, soit une probabilité de 0,5% qu'il s'agisse d'une fluctuation statistique dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne [3]. D'autres sondes permettent d'apporter des informations complémentaires sur le taux d'expansion de l'Univers. Les mesures portant sur les supernovæ de type 1a, rapportées par trois expériences indépendantes, affinent ce résultat, et la préférence pour une énergie noire variant dans le temps est alors de 2,8 à 4,2 sigmas, selon la combinaison d'expériences prise en considération (voir figure 1).



1. L'énergie noire peut être décrite par son équation d'état w(a), qui caractérise son évolution au cours du temps. Une des paramétrisations les plus couramment utilisées est celle dite de Chevallier–Polarski–Linder (CPL), pour laquelle $w(a) = w_0 + w_a (1 - a)$, où a est le facteur d'échelle de l'Univers (lié au *redshift* par a=1/(1+z)). Le paramètre w_0 correspond à la valeur de w aujourd'hui (à z = 0 donc a = 1), tandis que w_a décrit sa variation au cours du temps. La constante cosmologique Λ correspond à un cas particulier de cette paramétrisation, avec $w_0 = -1$ et $w_a = 0$. Les résultats de DESI obtenus à partir de l'analyse des oscillations acoustiques des baryons (BAO) sur les données du Data Release 2, combinés aux observations du Fond Diffus Cosmologique (CMB) et aux données des supernovæ de type 1a (PantheonPlus, Union3 ou DESY5) sont en tension avec le modèle ΛCDM (voir encadré) indiqué par une étoile rouge.

Ces résultats indiquent que les caractéristiques de l'énergie noire semblent varier au cours de l'histoire cosmique. Alors qu'une constante cosmologique s'apparente à un fluide dont l'équation d'état serait à toute époque exprimée par w = -1, les analyses menées par DESI indiquent au contraire que l'énergie noire aurait évolué d'une phase décrite par w = -1 voire plus négative encore, à une phase ultérieure où w > -1 [4]. L'accélération de l'expansion de l'Univers est ainsi, aujourd'hui, moins rapide que celle qu'une constante cosmologique aurait engendrée. Si la tendance actuelle se poursuit, elle pourrait même conduire à un nouveau ralentissement de l'expansion. Avant d'en arriver à une telle conclusion, toutefois, des données plus précises seront nécessaires afin de déterminer plus finement les caractéristiques de l'énergie noire.

Une alternative à l'énergie noire dynamique est-elle plausible ? La déviation observée par rapport à une interprétation en termes de constante cosmologique peut-elle être causée par notre connaissance imparfaite des lois de la gravitation ? Au-delà des études portant sur la mesure de la distance caractéristique des oscillations baryoniques acoustiques, DESI apporte également des informations fondamentales sur la façon dont la toile cosmique se forme à toute échelle et, par conséquent, sur les lois de la physique qui peuvent influencer cette structuration. La seule interaction ayant une influence notable à grande échelle est la gravité. Les soupçons se portent donc sur la théorie de la relativité générale, et la possible nécessité d'une théorie plus complète. La relativité générale est remarquablement en accord avec les observations à l'échelle du système solaire, mais des tests au niveau cosmologique apportent un regard différent. Les modifications théoriques considérées se résument souvent à deux termes supplémentaires dans les équations qui régissent les trajectoires des particules dans le champ gravitationnel : l'un pour les particules massives, et l'autre pour les particules sans masse, autrement dit les photons. Les observations de DESI ne portant que sur des objets massifs (galaxies ou quasars), elles ne peuvent pas contraindre ce second terme. D'autres approches, toutefois, peuvent apporter les mesures nécessaires. C'est le cas, notamment, des relevés de lentilles gravitationnelles du satellite Euclid ou du futur observatoire Vera Rubin[(b)], qui étudient les déformations de la forme apparente des galaxies dans le champ gravitationnel d'objets massifs le long de la ligne de visée. Les résultats de DESI publiés fin 2024 n'indiquent aucune déviation suggérant la nécessité d'introduire des modifications aux lois de la relativité générale. À ce jour, les analyses de DESI sont en accord avec la théorie d'Einstein, et l'explication de l'accélération de l'expansion cosmique semble demeurer du côté d'une composante « énergie sombre ».

Euclid et les lentilles gravitationnelles

Parallèlement à DESI, la communauté européenne s'est lancée dans la programmation de la mission spatiale Euclid. Adopté par l'ESA dès 2011, Euclid a la spécificité d'être constitué de deux instruments permettant un relevé spectroscopique et un relevé photométrique sur les mêmes champs de vue. Le relevé spectroscopique fournit la distribution 3D des galaxies dans l'Univers, nécessaire pour caractériser l'évolution du taux d'expansion de l'Univers et donc l'énergie noire à travers les temps cosmiques. Le relevé photométrique, quant à lui, opère dans le domaine visible et le proche infrarouge, il permet la cartographie de la matière noire, l'autre composante sombre de l'Univers (voir encadré), grâce à l'effet de lentille gravitationnelle.

L'effet de lentille gravitationnelle est produit par la présence d'un corps massif entre l'objet observé, les galaxies lointaines et l'observateur, nous. La gravité de l'objet massif courbe l'espace-temps, déformant l'image de la galaxie située en arrière-plan. Dans le cas d'un alignement parfait, dit régime fort, l'objet massif intermédiaire agit comme une lentille qui va grossir, magnifier et générer plusieurs images du même objet d'arrière-plan, qui seront alors visibles sous forme d'arcs ou d'anneaux. Mais la plupart du temps, l'alignement est imparfait : c'est ce qu'on appelle le régime faible, ou cisaillement gravitationnel. Dans ce cas, les

>>>

>>>

galaxies sont très légèrement étirées, et il faut analyser des millions d'images pour en extraire une information statistique utile pour la cosmologie et déterminer la répartition de matière totale, et donc la matière noire dans l'Univers, invisible mais omniprésente.

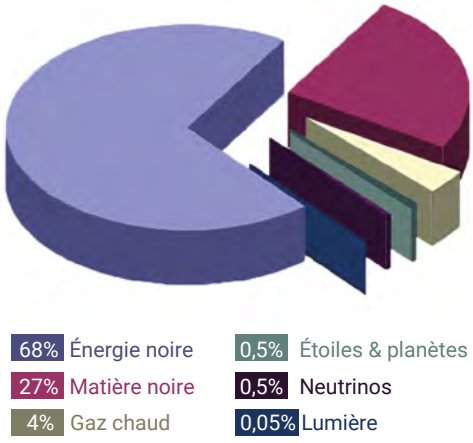
Euclid a été lancé le 1er juillet 2023 et a atteint le point de Lagrange L2 un mois plus tard. Cette orbite quasi-stable, située à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, offre des conditions optimales pour l'observation du ciel extragalactique. Après une phase de mise en service et de validation scientifique des instruments, le relevé nominal a démarré le 14 février 2024, pour six années d'observation [5].

Les premières images d'Euclid ont été dévoilées publiquement dès novembre 2023. Ces premiers clichés, connus sous le nom d'ERO pour *Early Release Observations*, ont mis en lumière la capacité d'Euclid à capturer de vastes portions du ciel avec une résolution impressionnante. Puis en mars 2025, Euclid a franchi une étape majeure avec la publication de son premier jeu de données scientifiques, dit Q1 (*Quick Release 1*). Ces premières données, qui couvrent moins de 0,5% du relevé final d'Euclid de 14 000 degrés carrés, ont déjà permis d'identifier plusieurs centaines de lentilles fortes, dont plusieurs nouveaux arcs gravitationnels spectaculaires [6] (voir figure 2). Ces phénomènes rares sont extrêmement utiles pour décrire et comprendre la matière sombre. D'ici à la fin de la mission, on s'attend à environ 100 000 lentilles fortes, soit environ 100 fois plus que ce que l'on connait actuellement. Ce premier jeu de données inclut également un catalogue inédit de plus de 380 000 galaxies, offrant des détails morphologiques précieux pour comprendre comment les galaxies se forment et évoluent, et comment naissent les trous noirs supermassifs.

Ces premières données relèvent de ce que l'on appelle la science "*legacy*", en contraste avec la science principale, dédiée à la cosmologie, pour laquelle la mission a été initialement conçue. Elles ne représentent qu'un avant-gout de l'ambition d'Euclid : réaliser une cartographie cosmique sans précédent pour répondre aux grandes questions ouvertes de la cosmologie moderne. Au cours des prochaines années, Euclid sera en mesure de déterminer, de façon complémentaire à DESI, la distribution spatiale de plus de 35 millions de galaxies, sensible au taux d'expansion de l'Univers. En parallèle, Euclid détectera un grand nombre de lentilles faibles de galaxies, dont les déformations sont si subtiles qu'elles ne peuvent être décelées qu'en analysant un très grand nombre de galaxies de manière statistique. Euclid mesurera le cisaillement cosmique de quelques milliards de galaxies sur 10 milliards d'années d'histoire cosmique, fournissant ainsi une vue en trois dimensions de la distribution de la matière noire dans notre Univers. En exploitant la combinaison de ces deux types de mesure, Euclid permettra de contraindre avec une précision inédite les propriétés de la gravité à grande échelle et la croissance des structures de l'Univers.

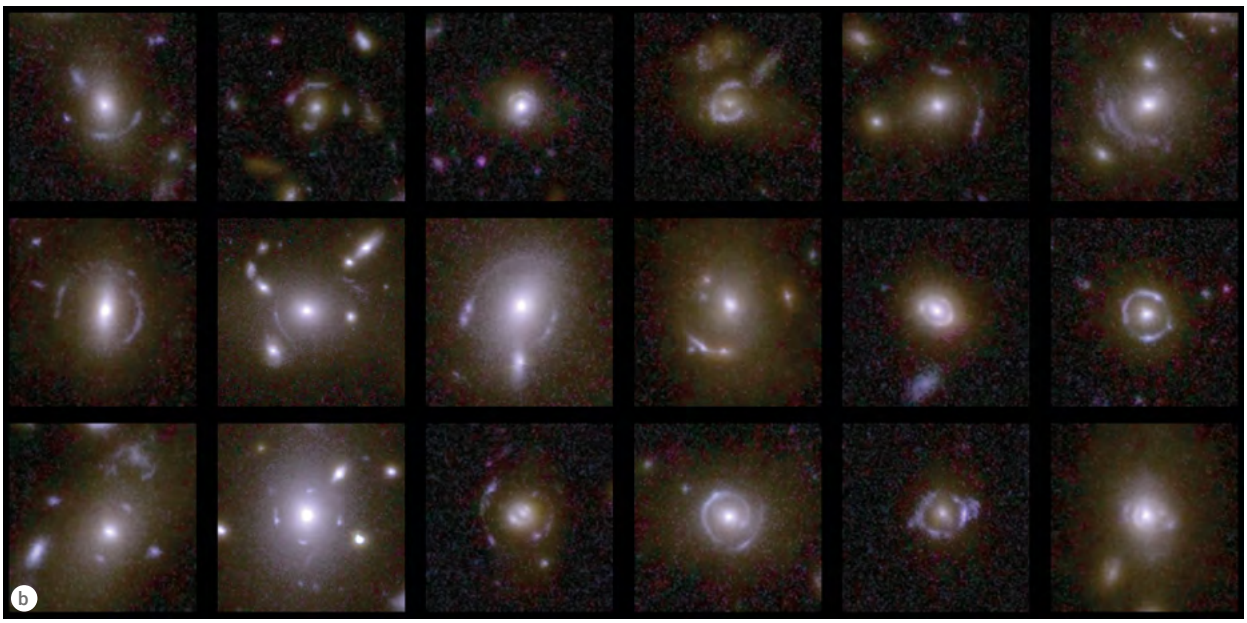
LE MODÈLE STANDARD DE LA COSMOLOGIE ET LES COMPOSANTES DE L'UNIVERS

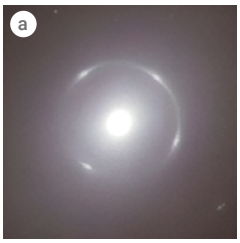
Le modèle cosmologique actuellement accepté, dit modèle ΛCDM (*Lambda Cold Dark Matter*), décrit l'évolution de l'Univers à grande échelle depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Il repose sur la relativité générale d'Einstein. Selon les dernières mesures, notamment celles du satellite Planck, l'Univers est constitué d'environ 68 % d'énergie noire, une forme d'énergie mystérieuse responsable de l'accélération de l'expansion cosmique. Vient ensuite la matière noire froide (*Cold Dark Matter*), qui représente environ 27 % du contenu de l'Univers. Bien qu'invisible, elle joue un rôle clé dans la formation des structures, comme les galaxies et les amas de galaxies, via ses effets gravitationnels. Enfin, seule une petite fraction — environ 5 % — est constituée de matière ordinaire, c'est-à-dire celle que l'on observe directement : étoiles, planètes, gaz intergalactique et tout ce qui compose les atomes.



Cette composition change au cours du temps du fait des différentes propriétés de ses constituants, notamment leur pression. Dominé par le rayonnement dans les premiers instants du cosmos, l'Univers entre dans une ère de domination de la matière, durant laquelle matières noire et ordinaire contrôlent l'expansion et favorisent la formation des grandes structures. Cette phase dure plusieurs milliards d'années, jusqu'à ce que l'énergie noire prenne le dessus, devenant le moteur principal de l'accélération de l'expansion.

Si l'énergie noire est décrite par une constante cosmologique (Λ), son influence reste inchangée au cours du temps. Mais si elle était dynamique, c'est-à-dire si sa densité variait avec le temps, cela pourrait profondément modifier notre compréhension de l'évolution de l'Univers passée et future. Mesurer cette évolution avec précision constitue l'un des objectifs fondamentaux des grandes missions cosmologiques actuelles, comme Euclid ou DESI.





2. Exemples de lentilles gravitationnelles fortes capturées par Euclid lors de ses premières observations (données Q1). Dans certains cas rares, la déformation de la lumière en provenance de galaxies lointaines forme un anneau complet, appelé anneau d'Einstein.
a) Un exemple particulièrement spectaculaire observé autour de NGC 6505
b) Autres exemples de lentilles gravitationnelles fortes. Quatre de ces images (les 4 en bas à droite dans la mosaïque) révèlent des lentilles à double plan source, un phénomène où plusieurs sources situées à des *redshifts* différents se trouvent alignées derrière une même lentille gravitationnelle. Cela produit plusieurs anneaux d'Einstein concentriques, chacun correspondant à une source située à une distance différente. [ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, traitement d'image par M. Walmsley, M. Huertas-Company et J.-C. Cuillandre].

Perspectives futures

Les prochaines années s'annoncent particulièrement passionnantes, car elles permettront de confronter les résultats de la mission Euclid aux premières mesures issues de DESI. L'enjeu est de taille, d'autant plus que les deux projets auront des incertitudes systématiques différentes : techniques spectroscopiques distinctes (spectroscopie multi-objets pour DESI et spectrométrie sans fente pour Euclid), types de cibles différents et, dans le cas d'Euclid, l'opportunité d'exploiter à la fois les données spectroscopiques et photométriques. Ces différences rendent la comparaison particulièrement riche pour identifier d'éventuels biais systématiques et renforcer la robustesse des résultats.

La combinaison des résultats de DESI et d'Euclid avec ceux issus d'autres sondes cosmologiques indépendantes — telles que les supernovæ de type 1a et le fond diffus cosmologique — est cruciale pour briser les dégénérescences entre paramètres cosmologiques et tester la cohérence du modèle standard. Les dernières cartes du CMB obtenues par les expériences du *Atacama Cosmology Telescope* (ACT) et du *South Pole Telescope* (SPT), ainsi que l'arrivée imminente du *Simons Observatory*, permettront une caractérisation fine des conditions initiales de l'Univers. Côté supernovæ, les données à bas *redshift* de *Zwicky Transient Facility* (ZTF) compléteront les mesures actuelles, en attendant l'apport massif de l'observatoire Vera Rubin, dont le relevé commencera fin 2025.

À plus long terme, les futures générations de relevés spectroscopiques se préparent. DESI-2, successeur naturel de l'expérience DESI, permettra de prolonger et d'affiner les mesures actuelles de regroupement des galaxies sur une gamme de *redshifts* étendue. À plus long terme, les projets Spec-S5 aux États-Unis et *Wide-Field Spectroscopic Telescope* (WST) en Europe sont déjà à l'étude. Leur objectif est de marquer une nouvelle étape dans la cartographie 3D de l'Univers, en combinant une très haute densité de cibles, une large couverture du ciel et une spectroscopie de précision. ▮

(a) « L'espace-temps indique à la matière comment se déplacer, la matière indique à l'espace-temps comment se courber. »

1• S. Perlmutter *et al.* (Supernova Cosmology Project Collaboration), "Measurements of Ω and Λ from 42 High Redshift Supernovae", *Astrophys. J.* **517** (1999) 565-586, arXiv:astro-ph/9812133

2• A.G. Riess *et al.* (Supernova Search Team), "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", *Astron. J.* **116** (1998) 1009-1038, arXiv:astro-ph/9805201

3• M. Abdul-Karim *et al.* (DESI Collaboration), "DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints", arXiv:2503.14738

4• A.G. Adame *et al.* (DESI Collaboration), "DESI 2024 VII: Cosmological constraints from the full-shape modeling of clustering measurements", arXiv:2411.12022

5• Y. Mellier *et al.* (Euclid Collaboration), "Euclid. I. Overview of the Euclid mission", A&A special issue Euclid on Sky, DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450810, arXiv:2405.13491

6• M. Walmsley *et al.* (Euclid Collaboration), "Euclid Quick Data Release (Q1): The Strong Lensing Discovery Engine A – System overview and lens catalogue", arXiv:2503.15324