

LES OBSERVATOIRES DE L'UNIVERS LOINTAIN

Les années à venir promettent de resserrer l'état autour de la nature de la matière noire et de l'énergie sombre. Nous entrons dans l'ère des grands sondages de galaxies qui vont révolutionner notre vision de l'Univers tant le nombre d'objets observés va augmenter et profiter de l'amélioration des techniques de traitement des données.

D'abord, dans la lignée du projet DES à qui il succédera, le *Large synoptic survey telescope* (LSST) entamera ses observations en 2022. Ce télescope, installé au Chili sur la montagne du Cerro Pachón, est doté d'un miroir primaire de 8,40 mètres associé à une caméra de 3,2 milliards de pixels, ce qui en fera le plus gros appareil photo jamais construit. Le LSST prendra des photos du ciel à une cadence infernale : un champ d'observation équivalent à 40 pleines lunes en un temps de pose de 15 secondes, produisant un cliché de tout le ciel austral en un peu plus de trois jours ! En dix ans, LSST observera ainsi près de 800 fois la voûte céleste. Cette stratégie d'observation est optimisée pour la détection des phénomènes transitoires et les objets variables. En particulier le LSST observera 300 000 supernovæ de type Ia et 10 milliards de galaxies, soit 100 fois plus d'objets que dans le relevé DES. Les supernovæ permettront de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers en remontant le temps jusqu'à 8 milliards d'années, tandis que la forme des galaxies sera étudiée pour en déduire la distribution de matière noire dans l'Univers.

La difficulté à laquelle les cosmologistes sont confrontés lors des analyses cosmologiques est l'estimation de la distance des objets. En effet nous ne mesurons pas directement les distances des galaxies ou des supernovæ, mais leur décalage spectral. Dans le cas du LSST, ce décalage spectral est mesuré grâce à six bandes photométriques, c'est-à-dire une observation du ciel dans six couleurs, amenant à une précision de l'ordre de 1 % caractéristique des sondages photométriques. De façon complémentaire aux relevés photométriques, comme DES et LSST, vont se déployer les grands relevés spectroscopiques de galaxies comme *Dark energy spectroscopic instrument* (DESI) et *Euclid*. Les sondages spectroscopiques ont la particularité de pouvoir mesurer l'ensemble du spectre des galaxies observées, ce qui fournit une précision sur les mesures de distances de l'ordre de 1 % ; c'est dix fois mieux. Mais le prix à payer est cher, avec des durées d'observation de plusieurs minutes, et donc un nombre d'objets observés plus faible.

Ainsi le DESI, installé sur le télescope Mayall de 4 mètres, sur le pic Kitt, en Arizona, est conçu pour mesurer le spectre de 5 000 objets célestes simultanément toutes les 20 minutes. En cinq années d'observation, DESI mesurera la position et la distance de 35 millions de galaxies et de 2,4 millions de quasars, soit 15 fois plus que les meilleurs instruments actuels. Ces observations couvriront soit un tiers du ciel, et seront réalisées grâce à des spectrographes qui enregistrent les spectres dans l'ultraviolet,

le visible et l'infrarouge à la fois, permettant de sonder l'Univers jusqu'à 11,5 milliards d'années. L'instrument DESI a ouvert pour la première ses 5 000 « yeux » à fibre optique à l'automne 2019 pour sa campagne de caractérisation, et démarrera ses observations scientifiques à partir de mi-2020.

Dans le même registre, l'Agence spatiale européenne (ESA) a sélectionné en 2011 la mission spatiale *Euclid*. Avec un lancement prévu en 2022, le satellite *Euclid* sera mis en orbite à 1,5 million de kilomètres de la Terre, pour une campagne d'observation d'au moins six ans. *Euclid* est doté d'un miroir de 1,2 mètre et de deux instruments, une caméra (VIS) de 600 millions de pixels observant dans le domaine visible et pour laquelle l'observation de milliards de galaxies est attendue, et un spectro-imageur dans l'infrarouge (NISP) qui fournira le spectre de près de 50 millions de galaxies. Avec un temps de pose de 15 minutes, la stratégie d'observation est optimisée pour observer chaque recoin d'une région du ciel (presque la moitié) en une seule fois, exception faite de quelques régions particulières, où le satellite fera une quarantaine de relevés.

L'excellente précision sur la mesure des distances permettra à DESI et à *Euclid* de dresser la carte en trois dimensions la plus dense et la plus détaillée de l'Univers sur la plus grande étendue jamais observée. En analysant soigneusement l'espacement entre galaxies, et en comparant à l'échelle des oscillations acoustiques des baryons, cette carte renseignera sur l'histoire de l'expansion cosmique et l'évolution de l'énergie sombre. Mais la mesure très précise du décalage spectral des galaxies procure aussi une estimation du mouvement propre des galaxies qui résulte de l'attraction gravitationnelle des structures à grande échelle avoisinantes. L'étude de ces mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière est un outil fabuleux pour tester les prédictions de la relativité générale d'Albert Einstein. La mise à l'épreuve de cette théorie sur ces échelles colossales est essentielle car elle pourrait révéler des explications alternatives à l'énergie sombre.

Ces trois projets futurs, LSST, DESI et *Euclid*, sont tous très ambitieux, et posent des questions au-delà de l'énergie sombre, comme la masse des neutrinos, les propriétés et la démographie des galaxies et des amas de galaxies, ou encore la physique stellaire. La France est très engagée dans la construction de ces instruments, notamment la caméra et le changeur de filtres de LSST, la réalisation et la caractérisation des dix spectrographes de DESI et les deux instruments d'*Euclid*, le VIS et le NISP.

Ces trois projets ont aussi un défi de taille : l'énorme quantité de données à traiter. Par exemple LSST produira plus de 200 pétaoctets de données sur dix ans (à comparer aux 25 pétaoctets traités par an au LHC). Ces données, ainsi que celles d'*Euclid*, seront en partie hébergées en France au Centre de calcul de Lyon (CC-IN2P3). Les techniques de traitement des données requièrent également la production de simulations numériques gigantesques, et l'application de méthodes d'apprentissage automatique.

Le CNRS, le CEA et de nombreuses universités françaises sont engagés plus que jamais dans la course à la compréhension du côté sombre de l'Univers. L'enjeu sera aussi de combiner les observations de ces différents instruments pour confronter de façon robuste les observations aux prédictions théoriques.

STÉPHANIE ESCOFFIER

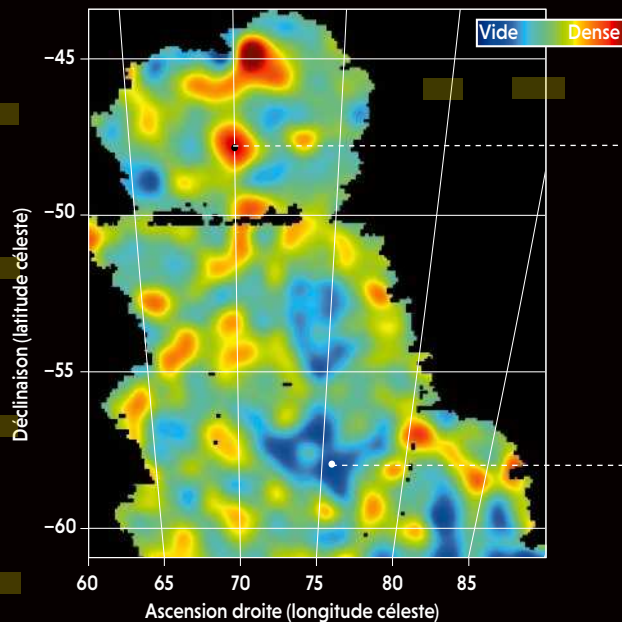
Cosmologiste, directrice de recherche CNRS
au Centre de physique des particules
de Marseille

Le futur satellite *Euclid* sera lancé en 2022 pour dresser la carte tridimensionnelle de l'Univers avec une précision jamais atteinte jusque-là.



CARTOGRAPHIE DE LA MATIÈRE COSMIQUE

La carte ci-contre montre la répartition à grande échelle de la matière sur environ 139 degrés carrés du ciel, une zone correspondant à 650 fois la taille angulaire de la pleine lune. Les régions en rouge sont des zones où la densité de matière est supérieure à la moyenne, tandis que le bleu représente des zones moins denses. Cette carte résulte des données du relevé DES sur les lentilles gravitationnelles faibles (la légère déformation de l'image d'une galaxie provoquée par la déviation des rayons lumineux lors de leur passage à proximité d'objets massifs tels que des amas de galaxies, contenant de la matière ordinaire et de la matière noire). Les photographies en médaillon, prises par l'instrument *Dark Energy Camera*, montrent une région de surdensité (avec un grand nombre de galaxies brillantes) et une zone où apparaissent relativement peu de galaxies, conformément à la densité comparativement faible de la région.



BIBLIOGRAPHIE

T. ABBOTT ET AL., Cosmological constraints from multiple probes in the Dark Energy Survey, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122(17), art. 171301, 2019.

S. ALAM ET AL., The clustering of galaxies in the completed SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: Cosmological analysis of the DR12 galaxy sample, <https://arxiv.org/abs/1607.03155>, 2016.

K. BECHTOL ET AL., Eight new Milky Way companions discovered in first-year Dark Energy Survey data, *Astrophysical Journal*, vol. 807, art. 50, 2015.

C. CHANG ET AL., Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 051301, 2015.

➤ Enfin, DES traquera les amas de galaxies pour reconstituer d'une autre façon l'évolution de l'hétérogénéité cosmique. Les amas, dont les masses peuvent atteindre plus de 10^{15} fois celle du Soleil, sont les plus gros objets de l'Univers liés par la gravitation. Des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous seront pris en compte.

Les cosmologistes compareront alors le nombre d'amas présents près de la Terre (correspondant à l'époque récente) et loin dans le passé. Comme pour les effets de l'hétérogénéité de la matière mis en évidence par les lentilles gravitationnelles faibles, nous nous attendons à voir davantage d'amas dans l'Univers jeune si c'est la quintessence, plutôt que l'énergie du vide, qui est à l'œuvre. Et nous devrions observer une tendance fort différente et plus compliquée dans l'hypothèse d'une gravité modifiée.

UN AVANT-GOÛT PROMETTEUR

Le relevé s'est achevé en janvier 2019, l'analyse des données est en cours. Des résultats préliminaires ont été publiés en mai 2019, incluant l'analyse de 207 supernovæ de type Ia confirmées spectroscopiquement. D'abord, l'étude confirme l'existence d'une énergie sombre. Elle donne également une mesure de la constante de Hubble H_0 (67,8 kilomètres par seconde par mégaparsec) compatible avec les mesures du

fonds diffus cosmologique, en plein débat sur un apparent désaccord de la valeur de cette constante déduite des mesures des céphéides (voir *Un problème de vitesse*, par N. Wolchover, page 78). Or la constante de Hubble n'est autre que le taux d'expansion actuel de notre Univers, son inverse nous renseignant sur son âge. Autre enseignement de l'étude, l'Univers serait géométriquement euclidien, c'est-à-dire « plat ».

L'ensemble concourt à valider le principe du DES et plaide pour un renforcement des investigations de ce type. C'est exactement ce qu'entendent faire les projets DESI, déjà en cours, ainsi que LSST et *Euclid* prévus en 2022.

DES a également obtenu des résultats intéressants d'une tout autre nature, telle la découverte à confirmer de 16 galaxies naines ultrapâles dans le voisinage de la Voie lactée. Ces galaxies très proches ne contiennent, pour certaines, pas plus de quelques dizaines d'étoiles et sont parmi les objets les plus riches en matière noire que l'on connaisse. Peu lumineuses, leur détection est difficile, mais elles sont cruciales pour comprendre la formation des galaxies telles que la Voie lactée.

Que ce soit DES, DESI, LSST ou *Euclid*, la course à l'énergie sombre n'a jamais été aussi effrénée. Qui l'emportera? L'énergie du vide? La quintessence? La gravité modifiée? Ou bien une tout autre forme d'énergie sombre surgie du diable vauvert? ■