

pointait vers une zone particulière du ciel pour une durée d'exposition de une heure, l'extrémité de la fibre à l'intérieur de chaque trou s'alignait parfaitement avec le centre de la galaxie ou du quasar cible.

Toutes les nuits entre décembre 2009 et mars 2019 où la Lune n'était pas trop brillante, le télescope a observé une zone du ciel et les fibres ont transmis la lumière des galaxies aux deux spectrographes. Ces instruments ont mesuré l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde et nous avons calculé le décalage vers le rouge de chaque galaxie.

Au cours des dix années pendant lesquelles BOSS et eBOSS ont recueilli des données, nous avons mesuré la position et le décalage vers le rouge de plus de deux millions de galaxies. Comme la lumière des galaxies lointaines met beaucoup de temps à atteindre le télescope, les cartes de BOSS et eBOSS permettent de voir loin et ainsi de remonter le temps, pour couvrir près de 11 milliards d'années de l'histoire de l'Univers.

## SONDER L'ÉNERGIE SOMBRE

En combinant nos mesures de décalage vers le rouge avec nos estimations de distance à partir de l'étalon standard des BAO, nous avons étudié la vitesse d'expansion de l'Univers et ses variations au cours du temps. Ces informations nous permettent de mieux comprendre l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie: l'énergie sombre.

En 1998, deux équipes d'astrophysiciens ont découvert que l'expansion de l'Univers accélérât. L'explication la plus probable était que l'Univers contenait un ingrédient dont la nature exacte reste à préciser, l'énergie sombre (ou noire). Le modèle mathématique le plus simple pour décrire l'action de l'énergie sombre est celui de la constante cosmologique, un terme qui correspond à l'énergie présente dans l'espace vide. Dans les équations de la théorie de la relativité générale d'Einstein, ce terme agit comme une force répulsive qui augmente la vitesse d'expansion de l'Univers, et s'oppose à l'effet gravitationnel de la matière, qui ralentit l'expansion. Au cours des vingt dernières années, le modèle cosmologique noté  $\Lambda$ CDM (avec une constante cosmologique, notée  $\Lambda$ , et de la matière noire dite «froide», *cold dark matter*) a résisté à de nombreux tests. Bien que nous ne le comprenions pas entièrement, il s'agit du modèle qui rend le mieux compte des observations à ce jour.

Trois observations récentes laissent entrevoir des failles dans le modèle  $\Lambda$ CDM. La première concerne la constante de Hubble, qui est le taux actuel d'expansion de l'espace. La deuxième suggère que l'espace serait légèrement plus courbé que ne le prévoit la théorie de l'inflation. Enfin, la troisième est liée à la

vitesse de formation des grandes structures. Le temps nous dira si ces tensions entre théorie et observations sont les premiers signes qu'un nouveau modèle cosmologique est nécessaire ou si elles reflètent simplement des imprécisions dans les mesures. Quoi qu'il en soit, les observations d'eBOSS contribuent à cette réflexion en apportant leur lot de contraintes très précises.

Elles montrent par exemple qu'une transition s'est produite lorsque l'Univers avait 60% de sa taille actuelle: l'expansion de l'espace a cessé de décélérer et a commencé à s'accélérer. Ces résultats sont en accord avec le modèle  $\Lambda$ CDM, qui suggère que c'est à ce moment-là que l'énergie sombre l'a emporté sur l'effet gravitationnel de la matière.

La géométrie de l'espace est un autre élément crucial du modèle cosmologique. La théorie de l'inflation prédit que l'Univers est quasiment «plat», c'est-à-dire doté d'une géométrie euclidienne dans laquelle, par exemple, la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés. Mais certaines données du satellite *Planck* sur le fond diffus cosmologique sug-



# Les résultats d'eBOSS sont en accord avec le modèle standard de la cosmologie



gèrent que l'espace est légèrement courbé. Grâce aux cartes d'eBOSS, nous avons amélioré la précision des mesures de la géométrie spatiale d'un facteur dix par rapport aux observations précédentes. Nous n'avons trouvé aucune preuve que l'Univers est courbé, ce qui conforte l'image standard de l'inflation.

Nous avons aussi testé les modèles cosmologiques en examinant la rapidité avec laquelle les structures – amas et filaments de galaxies – se sont formées. Les décalages vers le rouge que nous avons mesurés dans notre étude indiquent la vitesse relative des galaxies par rapport à nous, les observateurs. Une grande partie de ces décalages est due à l'expansion cosmique, c'est-à-dire au fait que tous les objets de l'espace s'éloignent les uns des autres, mais une petite partie est aussi liée à la croissance des structures. Au fur et à mesure que les galaxies se regroupent en amas et s'éloignent des vides, leurs vitesses, et donc leurs décalages vers le rouge, changent.

Les vitesses affectées par la croissance des structures sont identifiables lorsque nous comparons les motifs de galaxies observés le long et perpendiculairement à la ligne de visée. Ces mesures nous permettent alors d'estimer la rapidité à laquelle les structures se sont formées. En utilisant les données d'eBOSS et de ses prédécesseurs, nous avons calculé ce taux de croissance avec une précision d'environ 3,5%, et le résultat est compatible avec les prédictions de la relativité générale.

Dans l'ensemble, l'étude des BAO avec BOSS et eBOSS semble conforter le modèle standard du Big Bang avec constante cosmologique. Nous ne voyons aucune surprise dans la croissance des structures, la dynamique de l'énergie sombre ou la géométrie de l'espace. La seule situation qui reste vraiment problématique est celle qui concerne la constante de Hubble. À partir des mesures du fond diffus cosmologique, notamment grâce au satellite *Planck*, l'estimation du taux d'expansion est de  $67,28 \pm 0,61$  kilomètres par seconde et par mégaparsec (1 mégaparsec correspond à environ 3,26 millions d'années-lumière). Mais si les astrophysiciens évaluent la constante de Hubble en utilisant des «chandelles standard» comme les étoiles céphéides et les supernovæ de type Ia, les valeurs sont 10% plus élevées. Et les incertitudes sur les mesures sont trop petites pour justifier un tel écart.

En utilisant nos mesures sur les BAO, nous estimons la constante de Hubble à environ 67 kilomètres par seconde et par mégaparsec, que nous combinions ou non nos chiffres avec les données du fond diffus cosmologique. Comment comprendre l'écart entre les deux mesures cosmologiques (BAO et fond diffus cosmologique) et les mesures astrophysiques (chandelles standard)? La différence est assez importante pour remettre en question les hypothèses de base de notre modèle cosmologique. Il se peut qu'il y ait encore un problème avec une ou plusieurs des mesures qui alimentent ces calculs, mais il est au moins aussi probable que nous devions réviser le modèle de l'expansion précoce de l'Univers et de l'horizon sonore comobile. Nous devons peut-être introduire un nouveau type de particule, de champ ou d'interaction pour expliquer le désaccord.

## PLUS GRAND, PLUS FORT

Au cours des vingt dernières années, le programme SDSS et ses spectrographes ont été à la pointe dans l'étude des décalages vers le rouge des galaxies, notamment grâce à eBOSS. Le programme se poursuit afin d'obtenir des cartes d'étoiles et de quasars toujours plus vastes et précises. Sa réussite a suscité le développement de nouveaux projets pour



À partir de 2000, le télescope de 2,5 mètres de la fondation Sloan, situé au Nouveau-Mexique, a été au cœur d'un ambitieux programme de cartographie de l'Univers, le SDSS (Sloan Digital Sky Survey).

comprendre l'histoire cosmique. L'un de ceux-ci, qui a commencé ses premières opérations scientifiques, se nomme *DESI* (Dark energy spectroscopic instrument, instrument spectroscopique pour l'étude de l'énergie sombre). Il utilisera un spectrographe à 5 000 fibres optiques installé sur le télescope *Mayall* de l'observatoire national de Kitt Peak, en Arizona. Ce nouveau spectrographe, capable d'observer 5 000 cibles simultanément, est placé sur un télescope dont le miroir primaire a un diamètre environ deux fois plus grand que celui du télescope *Sloan*. Plutôt que de faire appel à des humains, chacune des 5 000 fibres sera positionnée grâce à un robot dédié. Dans cinq ans, *DESI* sera en mesure de produire une carte des galaxies qui sera plus de dix fois plus grande que celle de SDSS.

Prévu pour être lancé en 2022, le satellite *Euclid*, dirigé par l'Agence spatiale européenne, effectuera aussi un grand relevé des décalages vers le rouge des galaxies. Grâce à sa position dans l'espace, qui lui évite les perturbations dues aux turbulences de l'atmosphère terrestre, *Euclid* examinera des décalages vers le rouge plus importants (c'est-à-dire à des distances plus grandes) que ceux que l'on peut voir clairement depuis le sol. Il mesurera les décalages vers le rouge d'environ 35 millions de galaxies. Outre *DESI* et *Euclid*, d'autres projets de grands spectrographes multiobjets sur des télescopes plus grands, d'environ 10 mètres de diamètre, sont à l'étude. De quoi faire un grand pas en avant dans notre compréhension de l'Univers. ■

## BIBLIOGRAPHIE

S. Alam *et al.*, **Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory**, *Physical Review D*, vol. 103, article 083533, 2021.

B. W. Lyke *et al.*, **The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog : Sixteenth data release**, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 250(1), article 8, 2020.

A. J. Ross *et al.*, **The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Large-scale structure catalogues for cosmological analysis**, *MNRAS*, vol. 498(2), pp. 2354-2371, 2020.

M. Aubert *et al.*, **The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Growth rate of structure measurement from cosmic voids**, en ligne sur arXiv.org, 17 juillet 2020.

J. Frieman, **Le projet DES à la poursuite de l'énergie sombre**, *Pour la Science*, n° 467, septembre 2016.