

BOSS voit l'Univers en trois dimensions

Une équipe d'une centaine de physiciens et d'astronomes a annoncé en juillet 2016 les derniers résultats du plus grand relevé spectrométrique actuel de galaxies, le sondage BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*).

Ce relevé fait partie du programme *Sloan Digital Sky Survey III* (SDSS-III), auquel participent le CNRS et le CEA en France. Il a permis de dresser une carte tridimensionnelle de 1,2 million de galaxies sur plus d'un quart du ciel. Les chercheurs ont alors utilisé cette carte pour effectuer des mesures très précises de l'énergie sombre censée régir l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Pour cela, BOSS compare l'échelle des ondes de densité ou pression primordiales que l'on observe dans le fond diffus cosmologique émis 380 000 ans après le Big Bang à celles qui influent, 7 à 12 milliards d'années plus tard, sur la répartition spatiale des galaxies (les oscillations acoustiques baryoniques, ou BAO, nées de l'opposition entre la gravité, qui fait s'effondrer la matière sur elle-même, et la pression radiative des photons).

Le relevé DES étudie aussi les BAO, mais il s'agit d'un relevé photométrique, tandis que BOSS est un relevé spectrométrique.

La précision inégalée de BOSS sur les mesures de distance est obtenue grâce à un spectrographe composé de 1000 fibres optiques installées sur le télescope SDSS de 2,5 mètres à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Il a fallu près de 2000 nuits d'observation pour mesurer l'ensemble

des spectres des galaxies : la lumière de chaque galaxie passe, via une fibre, à travers un spectrographe, lequel décompose la lumière en différentes longueurs d'onde, à l'instar d'un prisme, qui sépare la lumière selon les couleurs de l'arc-en-ciel.

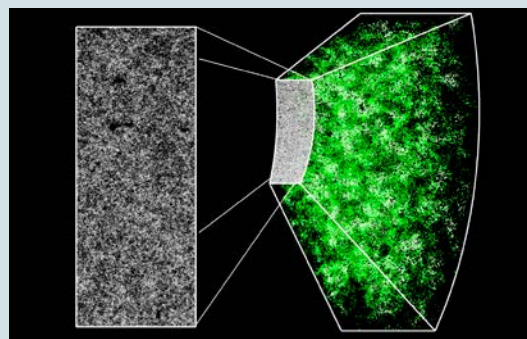
La carte établie par BOSS permet de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers et de déterminer ainsi la quantité de matière et d'énergie noire. Cette carte met aussi en évidence la signature des mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière, telle qu'attendue dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Ces mesures confortent la description d'un Univers spatialement plat contenant un fluide cosmique assimilable à une constante cosmologique, correspondant à l'énergie du vide.

Cependant, les incertitudes sur les mesures ne permettent pas d'écarter d'autres possibilités pour

l'énergie sombre. Et il est probable qu'il faille attendre la prochaine génération de sondages de galaxies pour que les résultats soient sensibles à des extensions du modèle standard de la cosmologie et pour distinguer une éventuelle déviation de la théorie qui décrit les lois de la gravitation aux très grandes échelles.

La France joue un rôle majeur dans les deux grands futurs programmes de cosmologie prévus pour 2020 : le *Large Synoptic Survey Telescope*, télescope au sol de 8 mètres qui sera installé au Chili, et la mission spatiale *Euclid*, qui sera mise en orbite. Cette dernière, conçue par l'Agence spatiale européenne, permettra d'étudier l'Univers sombre grâce à sa spectroscopie ultraprécise, et de tester les différents scénarios de l'énergie sombre en combinant la signature des ondes sonores primordiales avec les lentilles gravitationnelles. L'enjeu du projet *Euclid*, qui regroupe déjà plus d'un millier de chercheurs, est de taille : comprendre 95 % du contenu en énergie de l'Univers !

– **Stéphanie Escoffier**
CPPM, CNRS/université
Aix-Marseille



LE RELEVÉ BOSS a déterminé la position dans l'Univers de près de un million de galaxies (en vert). Cette carte permet d'étudier l'expansion cosmique.

Cet effet est sensible à toute la matière présente, donc principalement à la matière noire, et est un peu moins sensible à la matière ordinaire, composée de baryons. Cette approche est donc très complémentaire de celle fondée sur les oscillations acoustiques de baryons.

En mesurant les formes de nombreuses galaxies sur une petite portion du ciel, on détermine dans quelle mesure les images ont été déformées et on établit ainsi une carte de la matière interposée. En répétant cela dans différentes parties du ciel, on met en évidence la répartition générale hétérogène de la matière dans l'Univers (voir l'encadré ci-contre). L'évolution de cette granulosité au fil du temps, parce qu'elle reflète la compétition entre la gravité et l'énergie sombre, peut aider à déterminer l'origine de l'accélération de l'Univers.

Le relevé DES mesurera la forme de 200 millions de galaxies pour observer cet effet, couvrant ainsi 20 fois plus de galaxies et une plus grande portion du ciel que les précédentes études de lentilles gravitationnelles faibles. La carte obtenue pour diverses régions et à différentes distances de la Terre (donc à différentes époques cosmiques, car plus un objet est lointain, plus la lumière de cet objet met de temps à nous parvenir) dépendrait des facteurs en jeu dans l'expansion de l'Univers. Les simulations montrent que la quintessence entrave plus la formation de grandes structures que l'énergie du vide, par exemple. Connaissant le degré d'hétérogénéité actuel, il s'ensuit que l'Univers jeune devait contenir plus d'hétérogénéité dans l'hypothèse de la quintessence que dans celle de l'énergie du vide.

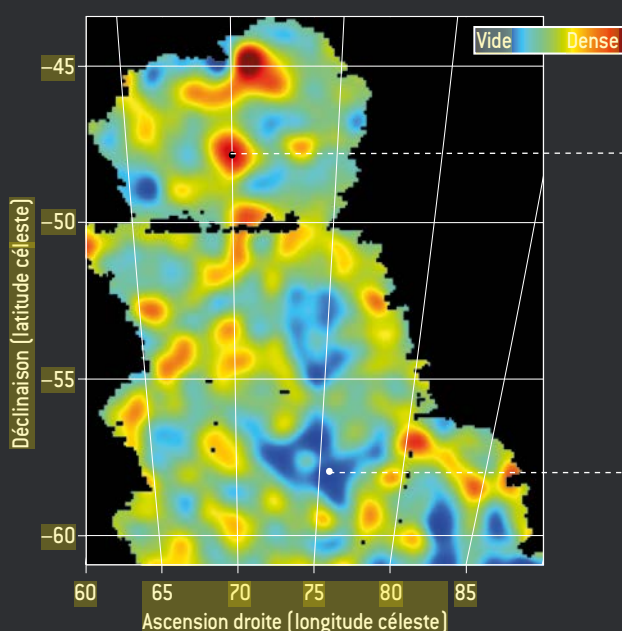
Enfin, le relevé DES traquera les amas de galaxies pour reconstituer d'une autre façon l'évolution de l'hétérogénéité cosmique au fil du temps. Les amas, dont les masses peuvent atteindre plus de 10^{15} fois celle du Soleil, sont les plus gros objets de l'Univers liés par la gravitation. Par rapport aux précédents relevés cosmologiques des amas, qui ont couvert des régions du ciel plus petites, le relevé DES devrait découvrir des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous.

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

CARTOGRAPHIE DE LA MATIÈRE COSMIQUE

La carte ci-dessous 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.



© J. Zuntz, M. Troxel et la collaboration DES

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.

Une riche moisson

Depuis son lancement officiel en août 2013, le relevé DES a couvert près de 5000 degrés carrés du ciel et a livré des images d'une centaine de millions de galaxies. Quant aux supernovæ, plus de 1000 de type Ia ont été relevées. Nous entamons l'analyse de ces données pour déterminer les distances de ces supernovæ et les relier à leur décalage vers le rouge. Nous mesurons aussi les formes des galaxies pour déduire le signal de lentille gravitationnelle faible, la distribution spatiale des galaxies pour traquer la signature des oscillations acoustiques des baryons et la répartition des amas de galaxies. D'ici à la fin de cette année, la première phase de

cette analyse sera à peu près achevée. Nous pourrons alors commencer à chercher des indices sur l'expansion de l'Univers.

En attendant, l'expérience a déjà donné des résultats intéressants et 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.

De nouvelles données de DES arrivent sans cesse. Nous ne savons pas encore si le relevé DES apportera des réponses définitives sur les causes de l'expansion accélérée de l'Univers – l'énergie du vide, la quintessence, une autre forme d'énergie sombre ou la gravité modifiée – mais nous savons qu'il nous fera franchir un grand pas vers la résolution de cette énigme. ■

BIBLIOGRAPHIE

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, article 50, 2015.

C. Chang *et al.*, Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, 051301, 2015.

C. Deffayet, Énergie sombre ou nouvelle gravitation ?, *Pour la Science*, n° 443, septembre 2014.

G. Börner, L'énergie sombre et ses alternatives, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.