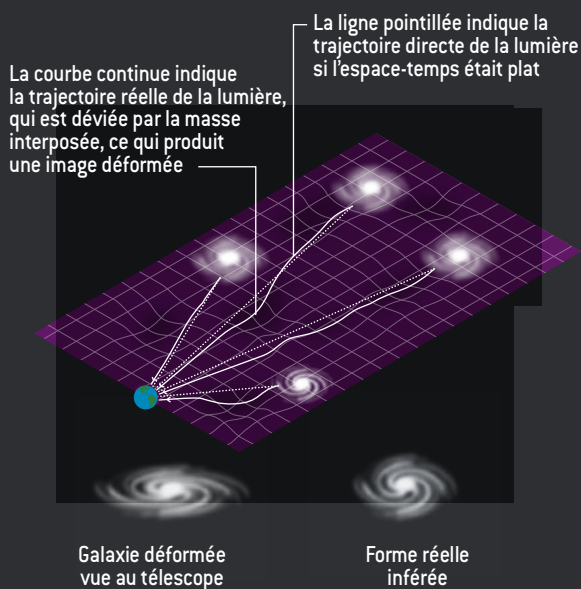


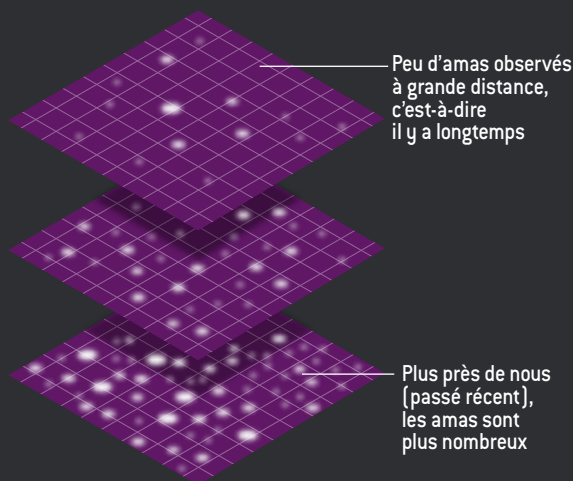
LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

La lumière des galaxies lointaines est déviée quand elle passe à côté d'objets massifs (tels les amas de galaxies) lors de son trajet vers l'observateur. À cause de cet effet dit de lentille gravitationnelle, l'image des galaxies lointaines apparaît déformée au télescope. L'expérience DES mesurera les légères distorsions de nombreuses galaxies pour en déduire une carte de la répartition de la masse dans l'Univers. Cela permettra de mettre en évidence l'hétérogénéité de la matière aux différentes époques cosmiques.



LES AMAS DE GALAXIES

Au cours du temps, la gravité rassemble les galaxies en amas, malgré l'effet opposé de l'énergie sombre. Le relevé DES traquera des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous pour comparer le nombre d'amas observés dans un passé récent et plus ancien. Cela nous renseignera sur le rythme auquel les galaxies se sont regroupées.



primordial pour étudier l'histoire de son expansion : les oscillations acoustiques des baryons (les baryons sont la famille de particules à laquelle appartiennent les protons et les neutrons, qui composent les noyaux atomiques). L'Univers jeune était empli d'un plasma de matière ionisée (noyaux atomiques et électrons) et de photons en interaction. Deux forces s'opposaient. La gravité tendait à agglomérer la matière dans des zones de surdensité, tandis que la lumière prisonnière exerçait une pression qui s'y opposait. Cette concurrence a engendré dans le plasma des vibrations, comparables à des ondes sonores. Celles-ci ont formé des zones plus ou moins denses de matière qui suivent une distribution particulière, que l'on nomme oscillations acoustiques des baryons.

Vers 380 000 ans après le Big Bang, la matière s'est assez refroidie pour que les noyaux atomiques et les électrons se combinent et forment des atomes neutres. La lumière interagissant alors peu avec la matière, l'opposition des forces a pris fin. La distance parcourue par les ondes acoustiques jusqu'à cet instant correspond aujourd'hui à une échelle d'environ 480 millions d'années-lumière. Les astronomes la retrouvent imprimée dans la répartition spatiale des galaxies sous la forme d'une légère tendance statistique des galaxies à être séparées de cette distance typique plutôt que d'une autre.

Cette échelle des oscillations acoustiques des baryons fournit un étalon de distance qui peut être mesuré à différentes époques dans l'histoire de l'Univers. Le relevé DES mesurera cette caractéristique des oscillations acoustiques des baryons à partir d'un catalogue d'environ 200 millions de galaxies. Cela nous permettra de déterminer leurs distances et d'associer cette donnée à leurs décalages vers le rouge, de la même façon que pour les supernovæ. Les galaxies présentant un même décalage vers le rouge seraient plus proches si la quintessence, qui a entraîné un début d'accélération plus tardif, est en jeu, en comparaison avec le scénario où l'énergie du vide serait responsable et où l'accélération aurait commencé plus tôt.

Des galaxies déformées

Quant à la méthode des lentilles gravitationnelles, elle repose sur une propriété de la lumière prédite par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Lors de leur trajet jusqu'à nous, les rayons lumineux en provenance de lointaines galaxies sont courbés par le champ gravitationnel de la matière à proximité de laquelle ils passent. Cette courbure conduit à une distorsion des images des galaxies : c'est l'effet de lentille gravitationnelle. Quand la courbure est importante, les images résultantes sont spectaculaires : des galaxies lointaines présentent l'apparence d'arcs de lumière longs et fins, et l'on peut même voir plusieurs images d'une même galaxie. Mais les rayons lumineux de la plupart des galaxies ne sont que légèrement courbés, et ces très petites distorsions ne sont pas détectables à l'œil nu : c'est le régime des lentilles gravitationnelles faibles.

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.

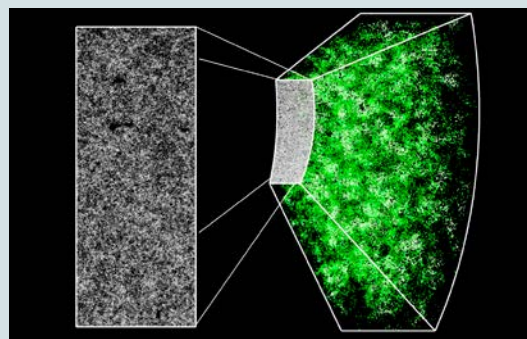
La carte établie par BOSS permet de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers et de déterminer ainsi la quantité de matière et d'énergie noire. Cette carte met aussi en évidence la signature des mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière, telle qu'attendue dans le cadre 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