

Comme Douglas Adams l'écrivait dans *Le Guide du routard galactique*, « L'espace est immense. Vraiment immense. On n'a franchement pas idée de sa stupéfiante et considérablement gigantesque immensité. » Malgré l'ampleur de ce défi, à l'instar de nombreux astronomes, nous avons consacré notre carrière à explorer l'Univers aux plus grandes échelles possibles, afin d'en estimer la taille et d'étudier la physique qui régit son évolution.

En juillet 2020, avec nos collègues, nous avons produit la plus vaste carte du cosmos jamais réalisée à ce jour. Elle s'appuie sur les données du relevé du ciel SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) démarré il y a près de vingt ans. Elle comprend le voisinage de la Voie lactée, mais aussi les confins de l'espace et tout ce qui se trouve entre les deux. Cette carte tridimensionnelle contient les positions de quatre millions de galaxies réparties, telles des bornes kilométriques, sur plusieurs milliards d'années-lumière, remontant ainsi dans le temps jusqu'à certaines des époques les plus reculées de l'Univers.

La carte montre que les galaxies ne sont pas distribuées au hasard. Au contraire, elles se regroupent selon des motifs particuliers: de longs filaments et des murs bidimensionnels. Ces structures délimitent des régions relativement vides et sombres. Les scientifiques pensent que ces motifs sont apparus avant même la naissance des galaxies, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. En cartographiant le plus loin possible l'histoire cosmique, nous pouvons retracer la croissance de ces structures et en déduire certaines des lois fondamentales qui ont guidé leur évolution. Cet atlas des galaxies fournit des informations cruciales pour comprendre certaines des grandes énigmes de la physique, telles que la géométrie de l'Univers et la nature de l'énergie « sombre » (ou « noire ») à l'origine de l'expansion accélérée de l'espace.

DES NOYAUX DE SURDENSITÉ ET DES COQUILLES

Le programme SDSS, dont la cinquième campagne vient tout juste de démarrer, utilise le télescope de la fondation Sloan installé sur l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique. Parmi les différents volets du programme, le projet BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*, ou Suivi spectroscopique des oscillations baryoniques) et son successeur eBOSS ont mesuré la distribution des galaxies afin d'étudier l'histoire de l'Univers. L'idée est d'utiliser une propriété dans la répartition spatiale des galaxies qui est issue du phénomène dit d'« oscillations acoustiques baryoniques » (BAO).

Pour comprendre de quoi il s'agit, il faut s'intéresser à l'évolution du cosmos au cours de ses 380 000 premières années, en commençant une fraction de seconde après le Big Bang. À cette époque, l'Univers a connu une période d'expansion rapide et extrême (l'inflation), durant laquelle il s'est développé si vite que les échelles typiques du monde subatomique ont enflé d'un facteur gigantesque (la taille de l'Univers a été multipliée par 10^{26}) en seulement 10^{-32} seconde. Ainsi, de minuscules fluctuations quantiques dans la distribution de l'énergie ont été amplifiées jusqu'à des dimensions macroscopiques (de l'ordre de la taille d'une balle de golf).

Ces fluctuations ont donné naissance à des régions présentant des surdensités d'énergie et de matière. Ces zones ont alors grandi en attirant toujours davantage de matière, laissant vides les autres. Au cours des 13,7 milliards d'années qui ont suivi, ces régions denses de matière ont évolué et formé les vastes structures hébergeant de nombreuses galaxies: les filaments, les murs et les amas que nous observons aujourd'hui.



Cette carte tridimensionnelle contient les positions de quatre millions de galaxies

Les motifs des BAO sont dus à la façon dont la lumière et la matière ont interagi, notamment dans l'Univers jeune après l'inflation. Le cosmos contient deux types de matière: la matière ordinaire (aussi nommée « matière baryonique », composée d'atomes que nous avons l'habitude de côtoyer dans notre vie quotidienne), qui interagit avec la lumière, et la matière noire, sans interaction avec les photons (les particules de lumière) et donc transparente. Dans l'Univers primitif chaud et dense, les atomes étaient sous forme ionisée, les noyaux atomiques étant séparés des électrons. Les photons étaient piégés au sein de ce plasma du fait de leurs fréquentes interactions avec les particules chargées. Sous l'influence de la gravité, cette matière baryonique et les photons ont été attirés par les régions de

surdensités de matière noire. Mais leur accumulation au centre de ces surdensités a créé une pression des photons qui s'est opposée à la gravité, et a entraîné la matière ordinaire et les photons en dehors de ces zones, qui se sont propagés sous forme d'ondes acoustiques (comme le son dans l'air ou les ondes sismiques à travers le manteau terrestre).

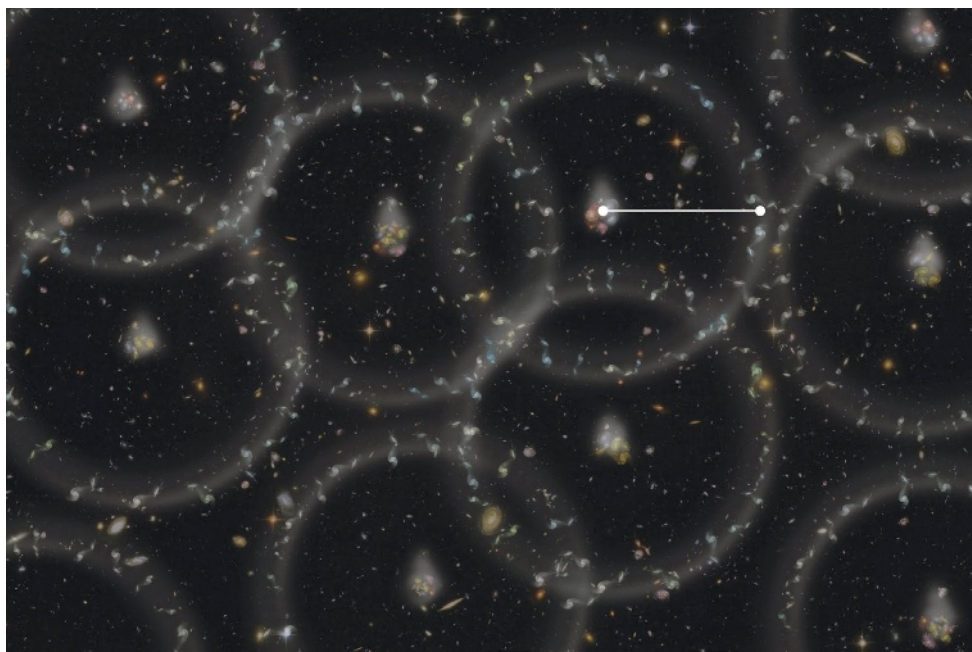
Vers 380 000 ans après le Big Bang, quand l'Univers s'est assez refroidi, le plasma a subi une transformation: les noyaux atomiques et les électrons se sont combinés, formant un gaz d'atomes neutres. Les photons n'ont alors plus interagi avec la matière ordinaire et se sont propagés librement dans l'espace. Cette première émission de lumière est encore visible dans le ciel sous la forme du fond diffus cosmologique. Une fois que la lumière et la matière n'étaient plus liées, la distribution de gaz s'est figée à une certaine distance des surdensités de matière noire, donnant ainsi naissance à des coquilles sphériques de matière baryonique. Et bien que la gravité ait continué d'attirer la matière ordinaire vers les régions les plus denses, c'est-à-dire vers les noyaux de matière noire, l'Univers a conservé une empreinte de cette époque, avec des surdensités de matière dans les régions initiales et sur le bord des coquilles de matière baryonique.

C'est ce motif dans la distribution de la matière qui est connu sous le nom d'«oscillations acoustiques des baryons». Comme ce motif s'est figé partout au même moment et de la même façon, les rayons des coquilles ont tous à peu près la même taille intrinsèque, environ 500 millions d'années-lumière. On parle d'«horizon sonore comobile» (ce dernier terme signifie que l'on fait abstraction de l'expansion de l'Univers).

Il est possible de retrouver la trace des BAO en établissant une carte de la distribution des galaxies dans le cosmos, car les galaxies sont issues des surdensités de matière baryonique. L'horizon sonore peut alors servir d'étalon pour mesurer les distances cosmiques. Lorsque nous voyons ces motifs sur nos cartes, ils apparaissent plus ou moins grands selon la distance à laquelle ils se trouvent (un objet proche semble plus grand qu'un objet de même taille, mais plus lointain). Ainsi, si nous évaluons leur diamètre apparent dans le ciel nocturne et que nous le comparons à leur taille intrinsèque, nous pouvons déterminer leur distance par rapport à la Terre.

UNE QUESTION DE VITESSE

L'étude des BAO nous permet d'estimer la distance moyenne d'un ensemble de galaxies, mais elle ne suffit pas pour retracer l'histoire de l'expansion de l'Univers. Pour cela, nous avons aussi besoin d'informations sur la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous. En



plus d'enregistrer des images profondes d'un tiers du ciel, SDSS a réalisé une analyse spectroscopique de deux millions de galaxies et de quasars (un type de galaxies très brillantes). Cette technique isole les différentes longueurs d'onde de la lumière provenant d'un objet, ce qui permet de mesurer la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous du seul fait de l'expansion de l'Univers entre le moment où la lumière a été émise et celui où elle a été observée. En effet, à cause de l'expansion, les longueurs d'onde sont étirées, la lumière devient plus rouge; c'est le phénomène de «décalage vers le rouge» (*redshift* en anglais).

Chaque observation des projets BOSS et eBOSS a enregistré simultanément les spectres lumineux de 1 000 objets. Une plaque d'aluminium percée de 1 000 trous était placée au niveau du plan focal du télescope. Et chaque trou était relié par une fibre optique aux instruments de mesure. En prévision d'une nuit d'observation, les équipes préparaient huit de ces plaques dans des cartouches spécialement conçues à cet effet. Il fallait environ une demi-heure à deux membres du personnel technique pour brancher une seule plaque. Lors du mois le plus productif du programme SDSS, nous avons analysé quelque 103 000 spectres à l'aide de ces plaques.

Les trous des plaques n'étaient pas percés au hasard. Nous sélectionnions des galaxies à observer dans une région du ciel à partir de données d'imagerie obtenues précédemment par des télescopes du monde entier. Les techniciens de l'université de Washington foraient alors les trous dans les plaques d'aluminium à l'aide d'une machine commandée par ordinateur, de sorte que lorsque le télescope

Les fluctuations quantiques primordiales ont donné naissance à des zones de surdensité où se sont formées de nombreuses galaxies. Une partie du gaz s'est retrouvée à une distance caractéristique dans des coquilles où sont nées d'autres galaxies. Dans cette vue d'artiste, le contraste entre les différentes régions, riches et pauvres en matière, a été très accentué. Mais grâce à des analyses statistiques, il est néanmoins possible de reconstruire ces motifs (en particulier le rayon des coquilles indiqué par un trait blanc) prédits par le modèle du Big Bang.