

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).

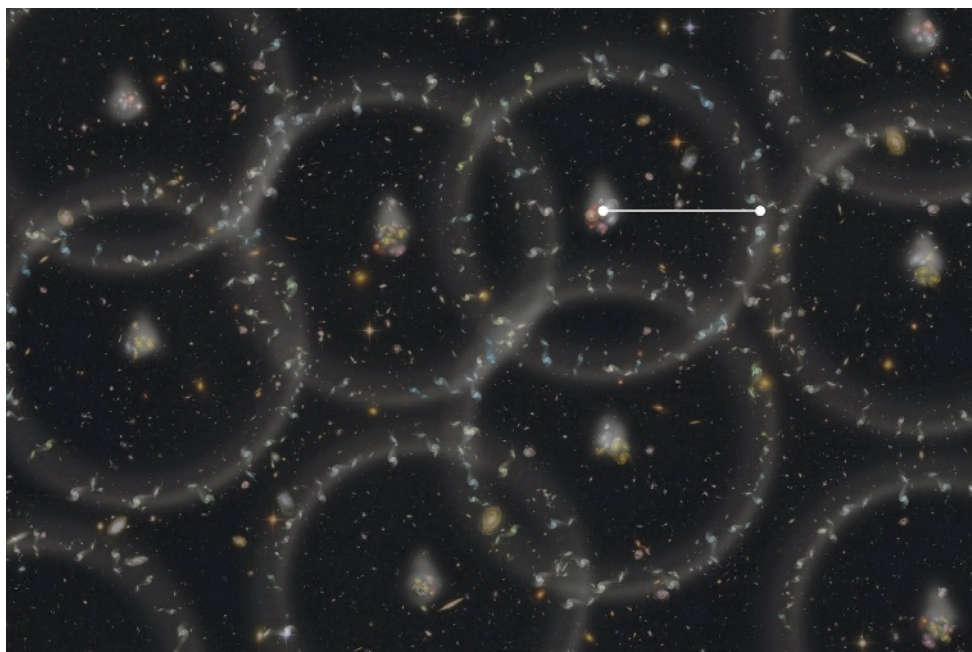
Vers 380 000 ans après le Big Bang, quand l'Univers s'est assez refroidi, le plasma a subi une transformation: les noyaux atomiques et les électrons se sont combinés, formant un gaz d'atomes neutres. Les photons n'ont alors plus interagi avec la matière ordinaire et se sont propagés librement dans l'espace. 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.

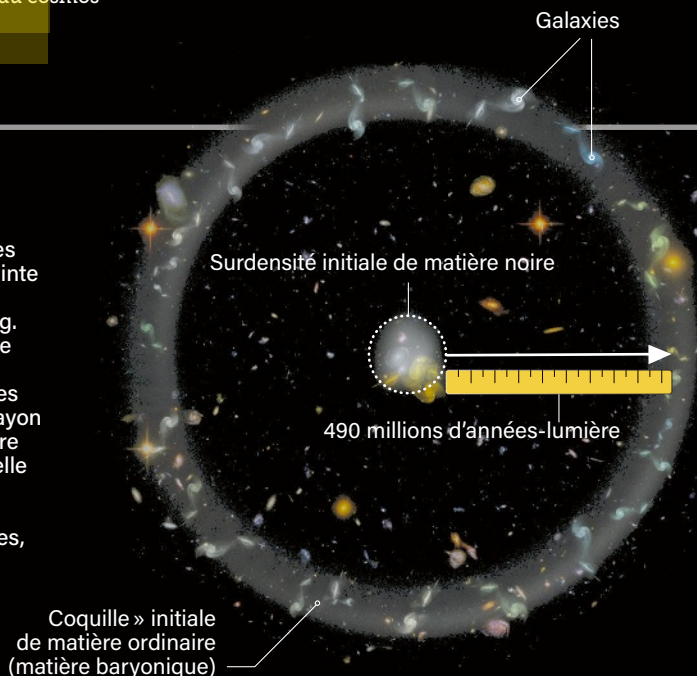
QUELLE EST LA VITESSE D'EXPANSION DE L'UNIVERS?

L'énergie sombre est la force qui conduit l'Univers à grandir de plus en plus vite. Pour identifier la nature de cette composante du cosmos, les astronomes ont utilisé les données du programme de relevé du ciel SDSS collectées depuis vingt ans. Ils ont ainsi dressé plusieurs cartes du cosmos

pour voir comment la vitesse d'expansion a évolué au cours du temps. La carte la plus récente a été réalisée grâce aux mesures d'eBOSS (*extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*), projet du SDSS, qui a opéré de 2014 à 2019.

A Une référence de distance

Le programme eBOSS s'est concentré sur un aspect de la distribution des galaxies dans l'Univers nommé « oscillations acoustiques baryoniques », ou BAO en abrégé. Cette empreinte est née dans de petites fluctuations d'énergie à travers l'espace-temps juste après le Big Bang. À cause de la façon dont la lumière et la matière ont interagi dans l'Univers primordial, ces fluctuations ont mené à la formation de coquilles sphériques de matière et de lumière, avec un rayon de 490 millions autour de surdensités de matière noire. Au cours du temps, la force gravitationnelle a attiré de la matière ordinaire (du gaz) dans les surdensités de matière noire et dans les coquilles. Le gaz a donné naissance aux galaxies, nombreuses dans ces régions. Il en résulte un motif régulier de noyaux et de coquilles que l'on distingue encore aujourd'hui dans la distribution des galaxies.



B Un étalon de distance

Le rayon des coquilles paraît plus ou moins grand selon la distance à laquelle cette structure se trouve par rapport aux astronomes. Les coquilles les plus lointaines paraîtront plus petites que celles plus proches. Mais les chercheurs savent que leur rayon est de 490 millions d'années-lumière. En comparant la taille apparente du motif des BAO avec sa taille intrinsèque, il est possible de déduire sa distance. Cette empreinte est donc un étalon pour mesurer des distances dans l'Univers.

