

insuffisantes, car le cerveau cherche souvent des formes là où elles n'existent pas. Pourtant, ici, l'analyse statistique confirme l'existence de regroupements.

On quantifie cette notion de regroupement à l'aide de fonctions de corrélations, qui représentent le nombre de paires d'objets en fonction de la distance qui les sépare. Avant d'examiner l'application de ces fonctions, considérons le cas plus simple de cerfs dans une forêt. Si l'on trouve un cerf au hasard dans une forêt, on trouvera plus probablement un autre cerf à quelques mètres de lui plutôt qu'à quelques centaines de mètres. La fonction de corrélation prend, dans ce cas, une grande valeur pour des distances de quelques dizaines de mètres et une faible valeur pour des distances de quelques centaines de mètres. Elle décrit mathématiquement le fait que les cerfs voyagent en petits groupes.

Pour les galaxies, on fait une analyse similaire, mais des difficultés surgissent : si l'analyse fonctionne bien pour des échelles bien inférieures à la taille du sondage, elle échoue lorsque l'échelle devient comparable. En effet, le nombre de galaxies – et, par conséquent, le nombre de paires de galaxies – est limité ; un excès de paires à de petites distances est nécessairement compensé par un déficit de paires à des distances supérieures, puisque le total est fixé. Ce jeu de bilan nul contamine le signal de regroupement aux échelles plus grandes.

Heureusement, une autre technique vient aider les astronomes pour l'analyse des regroupements à grande échelle : l'analyse harmonique, ou analyse du spectre de puissance. L'analyse harmonique, comme son nom l'indique, est étroitement liée à l'étude du son. En fait, l'analyse mathématique de la répartition des galaxies est identique à celle du bruit aléatoire.

On décrit de nombreux phénomènes physiques, telles les vagues à la surface de l'océan ou les fluctuations de la pression de l'air dans une pièce, par leur spectre de puissance. De même, l'oreille humaine analyse le son en analysant le spectre de puissance des fluctuations de pression de l'air. Ces fluctuations peuvent être considérées comme un

mélange d'ondes ayant chacune une fréquence et une intensité spécifiques. Nos oreilles décomposent les fluctuations en leurs fréquences constitutives, envoyant au cerveau des signaux qui décrivent l'intensité (ou l'amplitude) de chaque fréquence.

Le spectre de puissance mesure l'intensité des fluctuations de pression en fonction de la fréquence. C'est ce qu'indique l'égaliseur d'une chaîne haute-fidélité. Les gros instruments de musique, tels la contrebasse ou le tuba, émettent une grande partie de leur puissance à de grandes longueurs d'onde, qui correspondent à des basses fréquences. Inversement, le son d'un verre qui se brise se compose principalement d'ondes de hautes fréquences.

Le bruit aléatoire est particulier, parce qu'il peut être complètement décrit par son spectre de puissance. Considérons deux personnes qui visitent à quelques minutes d'intervalle la même chute d'eau (un phénomène qui émet un bruit aléatoire) et qui enregistrent chacune le son pendant plusieurs minutes. Bien que les enregistrements ne soient pas identiques (le son de la cascade change en permanence), les deux enregistrements peuvent décrire le son caractéristique de la chute : en les analysant, on trouve le même spectre de puissance. Les propriétés statistiques des deux enregistrements sont identiques.

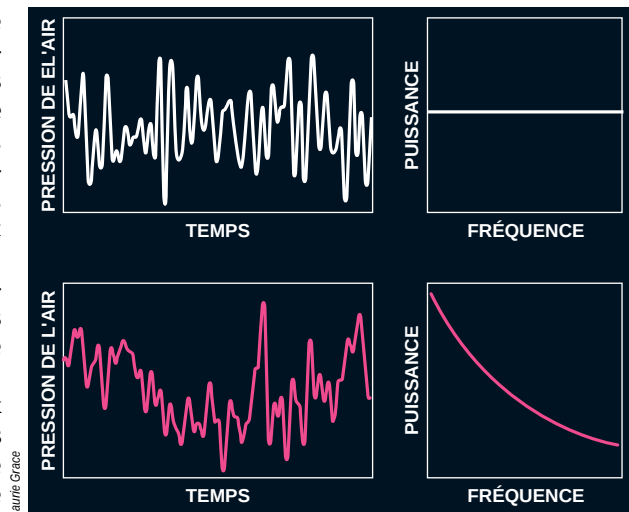
La couleur du son

Un bruit dont le spectre de puissance est plat, ce qui correspond à une puissance identique pour toutes les fréquences, est un bruit blanc. Un tel bruit ressemble à une teinte blanche, car la lumière blanche s'obtient en mélangeant également toutes les couleurs (caractérisées chacune par une longueur d'onde). Le bruit blanc est le grésillement que l'on entend lorsqu'on règle un poste de radio à une fréquence intermédiaire entre celles de deux stations. Ce son est parfaitement aléatoire : à chaque instant, le son est indépendant du son qui l'a précédé (on dit que ces sons sont décorrélés). Un autre spectre de puissance particulier est celui du bruit rose, où chaque octave (entre une fréquence et son double) émet la même puissance (voir la figure 3). Une cascade engendre un bruit rose.

L'analyse harmonique peut réconcilier le principe cosmologique avec l'hétérogénéité des galaxies. Si l'Univers est homogène et isotrope, les observateurs situés dans des galaxies distinctes devraient mesurer les mêmes propriétés de l'Univers aux échelles les plus grandes. Naturellement, ils verraient des répartitions différentes des galaxies, mais, pour un nombre suffisant de sondages, ou pour un sondage de taille suffisante, les deux observateurs mesureraient les mêmes fluctuations statistiques. Ces fluctuations, comme celles du son de la cascade, peuvent être décrites par un spectre de puissance.

Lorsque l'Univers se dilate et évolue, divers mécanismes physiques modifient le spectre de puissance de ses structures à grande échelle. Très peu de temps après le Big Bang, des fluctuations quantiques ont conféré à l'Univers un spectre de puissance. Edward Harrison et Yakov Zel'dovich ont calculé ce spectre primordial vers la fin des années 1960 : c'est une loi de puissance en inverse de la racine cubique de la fréquence, un spectre de bruit rose à trois dimensions.

E. Harrison et Y. Zel'dovich ont obtenu ce résultat en supposant que la plupart des forces naturelles, y compris la gravité, ne possèdent pas d'échelle de longueur intrinsèque ; ce sont des lois



3. NOUS BAIGNONS DANS LES BRUITS BLANCS ET ROSES. Le bruit blanc, analogue aux crépitements d'un récepteur de radio ou à la «neige» d'un téléviseur mal réglé, est complètement aléatoire. Le son fluctue sans cesse, sans régularité (en haut). Le bruit rose, analogue au son d'une cascade ou des vagues qui se brisent sur la plage, est fractal. Cette distinction se retrouve dans les spectres de puissance : le bruit blanc a une puissance égale à toutes les fréquences, tandis que le bruit rose a plus de puissance dans les basses que dans les aigus ; il varie en raison inverse de la fréquence.

de puissance. Dès lors, le spectre de puissance initial devait être une certaine forme de loi de puissance en fonction de la fréquence, de sorte qu'aucune échelle de longueur particulière ne soit privilégiée. Les deux physiciens ont aussi compris le rôle joué par la taille de l'horizon dans l'évolution de l'Univers. Cette taille de l'horizon est la distance qu'un faisceau lumineux a parcourue dans l'Univers depuis le Big Bang. Deux points de l'Univers ne peuvent interagir gravitationnellement que s'ils sont séparés d'une distance inférieure ou égale à la taille de l'horizon, parce que les forces de gravitation se propagent aussi à la vitesse de la lumière. Progressivement, à mesure que le temps passe, l'Univers grossit, et la taille de l'horizon augmente. Ainsi, la taille de l'horizon définit une échelle de longueur naturelle sur laquelle la gravité peut opérer.

Que se serait-il passé si le spectre de puissance initial ne dépendait pas exactement de l'inverse de la racine cubique de la fréquence? Si la loi de puissance avait été plus raide (par exemple, l'inverse de la puissance quatrième de la fréquence), alors les fluctuations aux très petites échelles auraient été supérieures par le passé. En calculant les fluctuations de densité dans la prime histoire de l'Univers, lorsque la taille de l'horizon était petite, les deux physiciens ont trouvé que de nombreuses régions auraient contenu une densité de matière si élevée qu'elles se seraient rapidement effondrées, peuplant l'Univers de trous noirs. Notre existence même prouve que l'hypothèse d'une loi en inverse de la puissance quatrième est exclue. Inversement, si la loi de puissance était plus plate, alors la densité aux grandes échelles fluctuerait considérablement après les débuts de l'Univers. Or, on n'observe pas de telles fluctuations.

Ce raisonnement convaincant justifie le spectre de puissance, mais il ne l'explique pas. En revanche, la théorie de l'inflation cosmologique propose une explication intéressante, en même temps qu'elle conduit à des conséquences vérifiables (voir *L'Univers inflatoire*, par Alan Guth et Paul Steinhardt, in *Pour la Science*, juillet 1984).

Beaucoup de grandes murailles

Le spectre de puissance de l'Univers actuel est très différent du spectre primordial : la gravité a amplifié les fluctuations initiales et engendré des structures comme les amas de galaxies. Jadis, la croissance des fluctuations à des échelles spécifiques fut amplifiée ou retardée, selon que l'Univers était dominé par la matière ou par le rayonnement et selon que les particules élémentaires étaient légères et rapides, ou massives et lentes. La cosmologie moderne s'efforce de comprendre l'évolution du spectre de puissance. Ces dernières années, les observations, telles celles de la répartition des galaxies et du rayonnement de fond diffus cosmologique, ont fourni assez de données pour que l'on teste enfin les théories.

Le modèle de matière sombre froide est aujourd'hui l'une des hypothèses qui explique le mieux la croissance des structures de l'Univers. Selon cette théorie, la plus grande partie de la masse de l'Univers est sous la forme de particules massives et invisibles (d'où le terme «sombre»). Cette matière est «froide» parce que, en raison de sa masse, elle se meut lentement. La matière sombre froide, qui interagirait avec la matière ordinaire uniquement par des forces de gravité, serait la masse manquante dans les galaxies et dans les amas de galaxies (voir *La matière sombre dans l'Univers*, par Lawrence Krauss, in *Pour la Science*, février 1987).

Toutefois, notre sondage montre notamment que la théorie de la matière

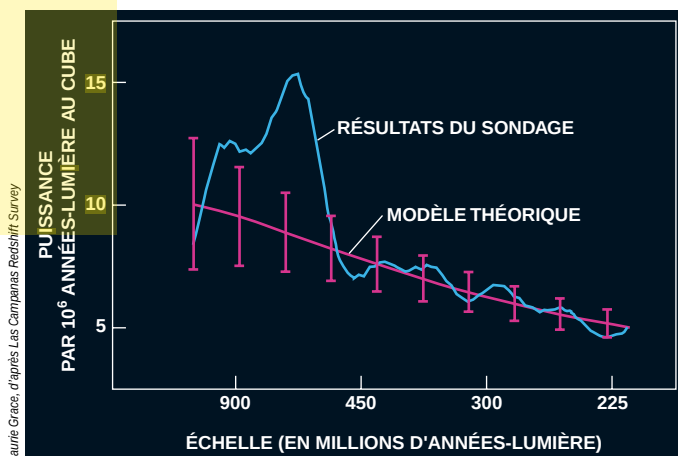
sombre froide n'est plus vérifiée aux grandes échelles (600 millions d'années-lumière) (voir la figure 5). Des sondages antérieurs avaient déjà indiqué ce défaut de la théorie, mais nous l'avons confirmé : en considérant l'ampleur de l'écart entre les prévisions du modèle de matière sombre froide et nos observations, ainsi que la taille de l'échantillon de galaxies étudiées, nous évaluons que la probabilité d'observer une telle déviation par pur hasard est de une sur plusieurs milliers.

Les gigantesques structures observées dans la répartition des galaxies (voir la figure 5) sont la cause essentielle des différences entre la théorie et les observations. Ces structures sont définies par des frontières nettes, par des filaments et par des vides sur les cartes. La taille des plus grandes structures approche trois milliards d'années-lumière, soit plusieurs fois la dimension de la Grande muraille. La découverte de ces structures et de ses conséquences sur le spectre de puissance est un résultat important du sondage de Las Campanas : aux grandes échelles, la répartition des galaxies n'est plus associée à un bruit aléatoire ; un mécanisme physique doit avoir agi pour donner aux fluctuations de densité cette dimension caractéristique.

Si la formation des structures résultait d'un bruit statistique, quelques murailles et vides apparaîtraient par hasard, mais ils seraient beaucoup plus rares. Ce seraient des fluctuations statistiques plutôt que des structures réelles.

Pourquoi observe-t-on les murailles et les vides? Ont-ils été créés par les forces de gravitation? Peut-être, mais

celles-ci déclenchent plus rapidement la formation des petites fluctuations, parce qu'elles mettent moins de temps à attirer la matière aux petites échelles. Si la gravité était en cause, l'agglomération des galaxies aurait dû commencer à petite échelle et s'étendre progressivement aux échelles supérieures. Au cours des 20 dernières années, les cosmologistes ont retenu ce «regroupement hiérarchique» pour expliquer les structures à des échelles inférieures à environ 150 millions d'années-lumière. Toutefois, les analyses de nos sondages montrent que les structures commencent à



4. LE SPECTRE DE PUISSANCE DE L'UNIVERS, mesuré par le sondage de Las Campanas (courbe en bleu), ne correspond pas aux prévisions de la théorie de la matière sombre froide (en rouge). La puissance augmente fortement à des échelles de 600 millions à 900 millions d'années-lumière. Ce désaccord entre modèle et observation signifie que l'Univers est plus structuré à ces échelles que ne l'expliquent les théories actuelles.