

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).

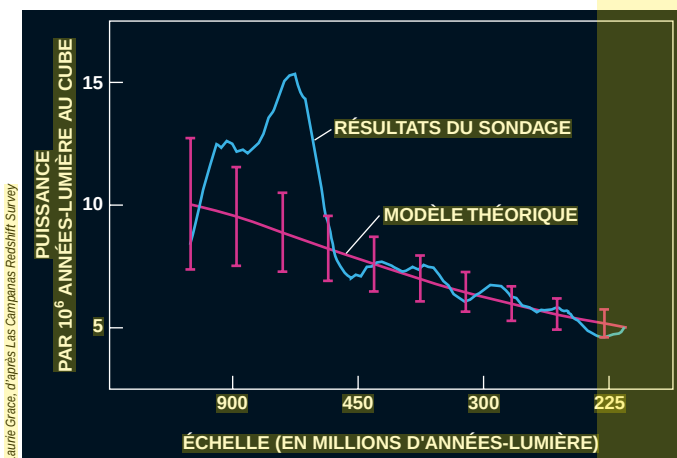
Toutefois, notre sondage montre notamment que la théorie de la matière

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.

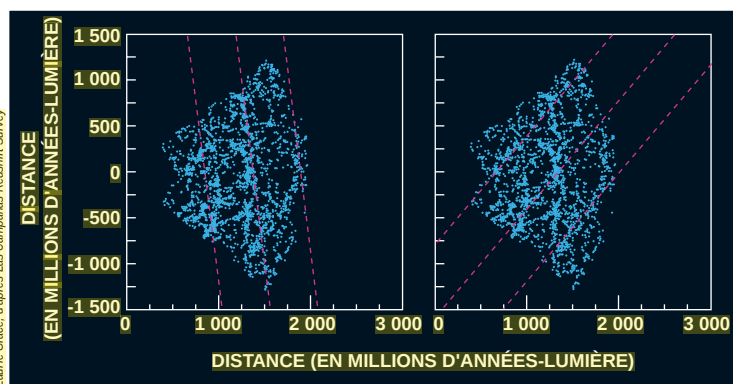
Les gigantesques structures observées dans la répartition des galaxies (voir la figure 5) sont la cause essentielle des différences entre la théorie et les observations. Ces structures sont définies par des frontières nettes, par des filaments et par des vides sur les cartes. La taille des plus grandes 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.

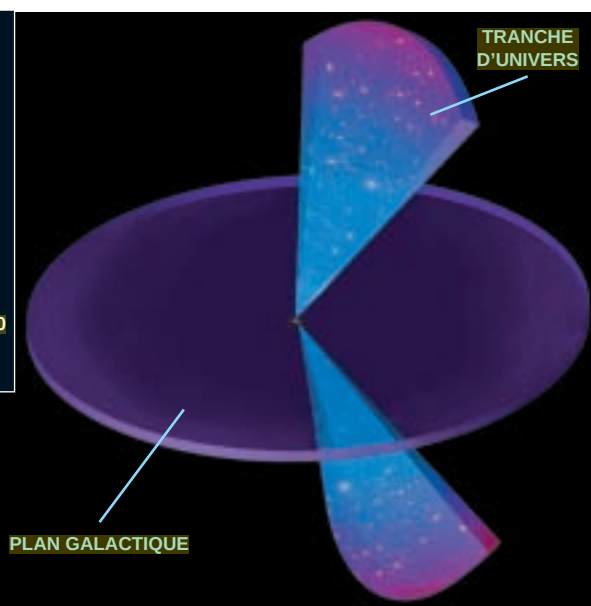
Pourquoi observe-t-on les murailles et les vides? Ont-ils été créés par les forces de gravitation? Peut-être, mais celles-ci déclenchent plus rapidement la formation des petites fluctuations, parce qu'elles mettent moins de temps à attirer la matière aux petites échelles. Si la gravité était en cause, 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.



5. DEUX TRANCHES D'UNIVERS (à droite) ont été observées lors du sondage de Las Campanas. L'Univers est granuleux aux grandes échelles. Les points, qui représentent les milliers de galaxies contenues dans chaque tranche, ne sont pas répartis uniformément : ils se rassemblent en murailles (*pointillés*), créant des vides dans d'autres régions.



apparaître à des échelles bien supérieures. Le regroupement hiérarchique explique peut-être les petites structures, mais pas les murailles et les vides aux échelles supérieures.

Une nouvelle harmonie des sphères

Aucune des nouvelles hypothèses n'explique la totalité des observations. Certains astronomes ont invoqué un scénario de matière sombre chaude, où l'Univers est dominé par des particules légères, analogues aux neutrinos. L'Univers évoluerait alors de haut en bas, les grandes structures commençant à se former avant les petites. Malheureusement, cette théorie explique mal le regroupement des galaxies à petite échelle.

On a également supposé que l'Univers est moins dense qu'on ne le croyait et qu'il contient peu de matière sombre. Les particules ordinaires, tels les protons et les électrons, auraient constitué un fluide visqueux dans l'Univers primordial. Avant que l'Univers se refroidisse assez pour que protons et électrons se combinent en atomes, des ondes de densité (comme des ondes sonores) se seraient propagées. Après la combinaison des protons et des électrons, ces ondes auraient stimulé l'effondrement gravitationnel à certaines échelles. Curieusement, cette hypothèse résoudrait plusieurs énigmes cosmologiques (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, in *Pour la Science*, mars 1999).

Dans une troisième hypothèse, on note que 600 millions d'années-lumière (l'échelle où l'écart entre les observations et la théorie de la matière sombre froide est le plus grand) est environ la distance de l'horizon au moment où la densité moyenne de matière dans l'Univers est devenue supérieure à la densité d'énergie sous la forme de rayonnement. Un changement aussi important a probablement perturbé le spectre de puissance. Quelle que soit l'explication finale, il se peut que nous détectons ici la plus grande échelle de longueur associée à un mécanisme physique dans la nature.

Même un recensement aussi important que celui de Las Campanas ne donne qu'un petit nombre de mesures indépendantes (50 environ) du spectre de puissance aux grandes échelles. D'autres sondages s'imposent, et plusieurs sont en cours. Un groupe anglo-australien, nommé 2DF, est en train de cartographier plus de 250 000 galaxies, et une collaboration américano-japonaise (*Sloan*) devrait ensuite mesurer les spectres de près d'un million de galaxies, sur la moitié du ciel, échantillonnant un volume 20 fois plus important que celui que nous avons analysé.

Au VI^e siècle avant notre ère, Pythagore a, le premier, appliqué l'analyse musicale au mouvement des astres : il supposait que les corps célestes étaient des trous dans des sphères de cristal et que le mouvement de ces sphères engendrait des sons. Les distances et les vitesses des corps célestes devaient être dans des rapports simples, comme

le sont les notes de la gamme occidentale. Pythagore supposait ainsi l'existence d'une «musique des sphères». Au XVII^e siècle, Johannes Kepler pensait que les orbites des planètes pouvaient être décrites comme des sphères célestes inscrites entre les cinq solides platoniciens (les polyèdres réguliers). Il croyait que les rapports harmonieux en musique pouvaient être déduits de ces solides et il légitimait une relation fondamentale entre les orbites des planètes et ces harmonies. Là encore, une musique des sphères était évoquée.

Aujourd'hui, notre notion de l'analyse harmonique est assez différente. Elle se fonde sur l'analyse des composantes harmoniques de répartitions aléatoires, et le son observé ressemble plus à celui d'une cascade qu'à un chant divin. Bien que l'analyse moderne ne soit pas aussi spirituelle que celle du passé, le concept d'un Univers isotrope associé à une compréhension des champs aléatoires nous permet d'entendre à nouveau la musique des sphères.

Stephen LANDY est astronome au Collège William & Mary, en Virginie.

P.J.E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

Stephen A. SHECTMAN et al., *The Las Campanas Redshift Survey*, in *Astrophysical Journal*, vol. 470, pp. 172-188, 10 octobre 1996.

Kelvin K.S. WU, Ofer LAHAV et Martin J. REES, *The Large-Scale Smoothness of the Universe*, vol. 397, pp. 225-230, 21 janvier 1999.