

distances à la Terre. Le premier jeu d'images révélait un supervide approximativement sphérique et plus poussé près du centre. Ce vide géant se cache très près de nous, à environ trois milliards d'années-lumière, ce qui explique pourquoi il a été si difficile à mettre en évidence lors de nos premiers essais de détection.

Après plusieurs mois d'analyse, nous étions convaincus d'avoir des preuves solides de l'existence du supervide. En d'autres termes, nous étions certains de l'existence d'une région de basse densité dans la direction du point froid. Ce supervide est même énorme ; avec 1,8 milliard d'années-lumière de diamètre, c'est peut-être la plus grande structure jamais identifiée. L'objet est probablement très rare : les théories cosmologiques suggèrent qu'il n'y en aurait tout au plus que quelques autres dans tout l'Univers observable.

Nous avons enfin trouvé notre supervide aligné avec la plus grande anomalie du fond diffus cosmologique, le point froid. L'énigme était-elle donc résolue ? Pas tout à fait. Le supervide et le point froid pouvaient être alignés par hasard, sans lien de cause à effet, même si, d'après nos calculs, une telle coïncidence était 20 000 fois moins probable que la possibilité que le supervide ait créé le point froid.

Un supervide pas encore assez grand ?

Cependant, nous avons un problème plus sérieux. Bien que le supervide soit au bon endroit pour expliquer le point froid, il n'a pas exactement la bonne taille. Pour rendre compte de la température du point froid, bien plus basse que la température moyenne du fond diffus, le supervide devrait être encore plus grand qu'il ne semble l'être, peut-être d'un facteur deux à quatre. Ce désaccord entre la théorie et les observations est si important que certains chercheurs pensent que le chevauchement du supervide avec la région du point froid est un pur hasard. Et que d'autres explications sont donc à chercher, comme la possibilité que les galaxies émettent moins de rayonnement dans l'espace que nous ne le supposons, ce qui crée des biais dans

Le supervide nous permettrait de tester

des théories alternatives à la relativité générale

la carte du fond diffus cosmologique – un phénomène qui pourrait, dans une certaine mesure, imiter l'effet Sachs-Wolfe intégré. Par ailleurs, même si nos observations prouvent l'existence du supervide, nous ne pouvons pas connaître sa taille, sa forme et sa position avec assez de précision pour calculer en détail les effets qu'il devrait avoir sur le fond diffus. En particulier, le supervide pourrait être allongé dans notre direction, ou composé de plusieurs vides sphériques juxtaposés et alignés dans la direction du point froid (comme un bonhomme de neige) – autant de configurations qui influent sur l'effet Sachs-Wolfe intégré. Ainsi, nous ne savons pas encore dans quelle mesure la taille du supervide met en difficulté notre théorie.

Nous avons déjà prévu de recommencer notre étude avec les nouvelles données de PS1, plus complètes que celles que nous avons utilisées précédemment, et en utilisant des observations que les astronomes ont encore affinées. Nous pourrions alors quantifier l'écart entre les mesures et la théorie afin de déterminer si l'hypothèse de l'effet Sachs-Wolfe intégré et du supervide est à écarter définitivement. Une étude menée par Seshadri Nadathur et Robert Crittenden, de l'université de Portsmouth, en Angleterre, suggère, grâce à des données récentes du *Sloan Digital Sky Survey*, que notre supervide ne peut pas expliquer le point froid.

Si le désaccord devait persister, il pourrait être révélateur d'un phénomène d'une autre nature. Par exemple, il existe des théories alternatives à la relativité générale d'Einstein dont certaines se manifestent par une signature unique qui n'apparaîtrait que dans les vides. Si l'une de ces théories est celle qui décrit correctement la force gravitationnelle, le mécanisme Sachs-Wolfe intégré pourrait opérer différemment. Notre supervide nous offrirait un indice allant dans le sens de ces théories. Nous aurions là une piste passionnante pour comprendre l'Univers à un niveau plus profond qu'il n'est possible aujourd'hui.

Dans tous les cas, la découverte des supervides est cruciale. Et les prochaines années devraient nous en apprendre encore davantage sur eux – et donc sur la nature de l'Univers. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

I. Szapudi et al., *Detection of a supervoid aligned with the cold spot of the cosmic microwave background*, *MNRAS*, vol. 450, n° 1, pp. 288-294, 2015.

C. Deffayet, *Énergie sombre ou gravité modifiée ?*, *Pour la Science*, n° 443, septembre 2014.

G. Starkman et D. Schwartz, *L'Univers est-il désaccordé ?*, *Pour la Science*, n° 335, septembre 2005.

« Avec les vides cosmiques, nous testerons bientôt divers modèles d'énergie sombre »

Les régions les plus vides de l'Univers cachent de nombreuses informations sur l'évolution du cosmos et sur l'énergie sombre. Stéphanie Escoffier nous explique comment les catalogues les plus récents de galaxies commencent à ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers.



Stéphanie ESCOFFIER est chargée de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille et membre de la collaboration BOSS.

POUR LA SCIENCE

Pour commencer, qu'est-ce qu'un vide cosmique et comment se forme-t-il ?

STÉPHANIE ESCOFFIER : En vertu du principe cosmologique, l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire identique quel que soit l'endroit où l'on se place ou la direction dans laquelle on regarde. Si on regarde de plus près, ce n'est pas le cas, l'Univers semble composé de grandes structures : les galaxies se regroupent en amas et superamas, formant eux-mêmes de grands filaments. Entre ces structures, on trouve les « vides » cosmiques, d'immenses espaces pratiquement déserts où la densité en galaxies est très faible. La taille des vides est variable, du supervide énorme de plus d'un milliard d'années-lumière de rayon, à des tout petits. Je travaille principalement sur des vides de 50 à 400 millions d'années-lumière de rayon.

L'origine des vides se cache dans le plasma de l'Univers primordial. Des fluctuations quantiques qui s'y manifestaient ont créé des zones de surdensité de matière, où la matière ordinaire et la matière noire (dont la nature est encore inconnue) se sont accumulées et ont donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Les zones de sous-densité de matière ont formé les vides cosmiques.

PLS

Comment les détecte-t-on ?

S. E. : Les premiers ont été découverts en 1978 par Stephen Gregory et Laird Thompson, de l'observatoire américain de Kitt Peak. Les vides sont définis à partir des amas et des filaments qui les cloisonnent, donc nous avons besoin de catalogues de galaxies relevées sur un vaste champ du ciel. Nous appliquons alors un algorithme qui isole et recense les vides. Mon équipe utilise la carte tridimensionnelle la plus riche en galaxies, qui est celle du programme BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*) lié au relevé SDSS III (*Sloan Digital Sky Survey*), réalisé avec un télescope de 2,5 mètres de diamètre situé au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Le relevé a été effectué entre 2009 et 2014 et comprend 1,5 million de galaxies. Nous y avons détecté plusieurs centaines de vides.

PLS

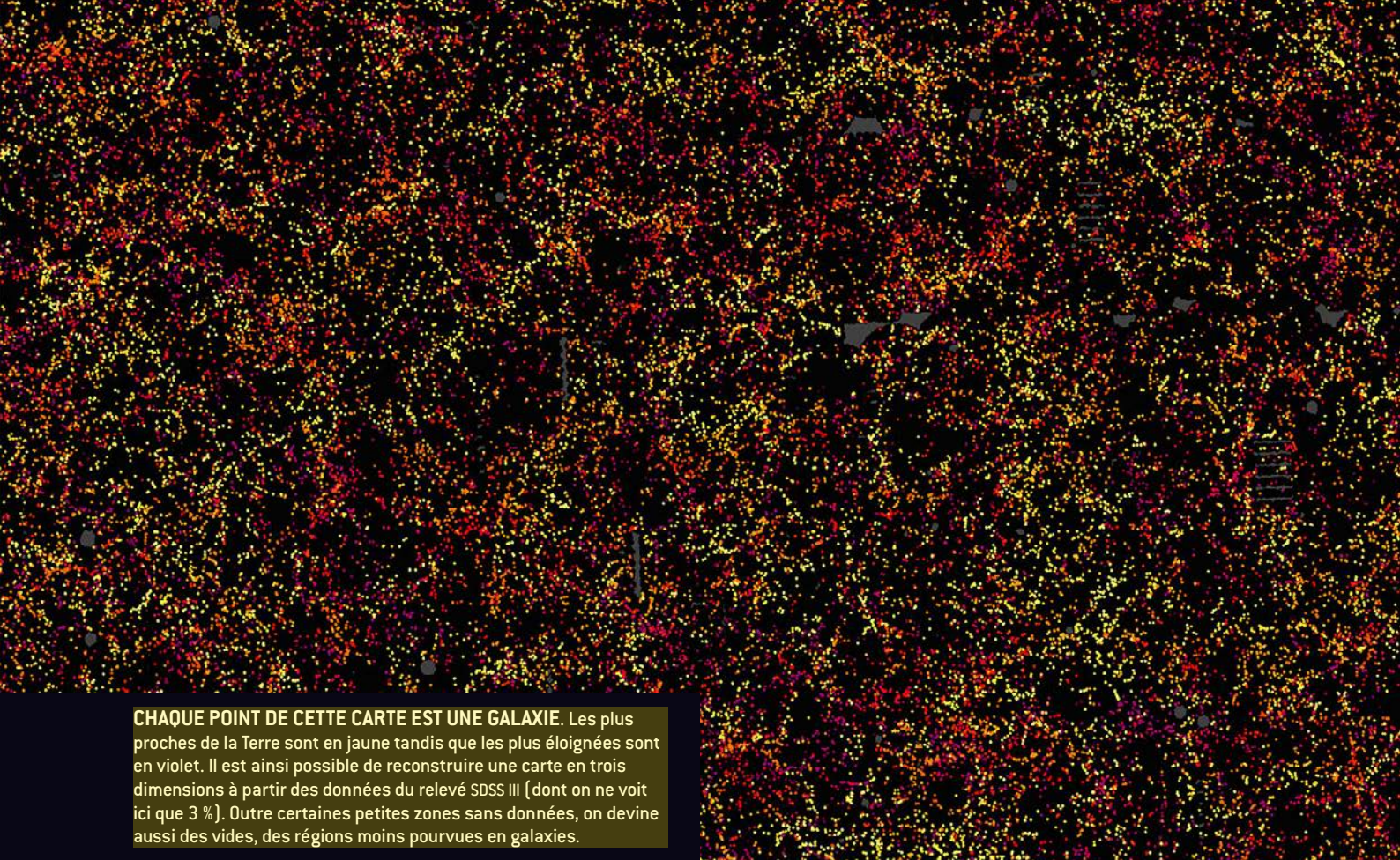
Quelles informations les vides cosmiques apportent-ils dans l'étude de l'Univers ?

S. E. : Les vides nous renseignent sur de nombreux aspects de l'Univers : le processus de formation des grandes structures, des effets de lentille gravitationnelle en champ faible ou certaines anomalies du

fond diffus cosmologique, tel le point froid (voir l'article d'István Szapudi, pages 24 à 31).

Les vides nous permettent aussi d'étudier l'expansion accélérée de l'Univers. En 1998, en utilisant des supernovæ de type Ia, plusieurs équipes ont montré que l'expansion du cosmos accélère depuis environ 7 milliards d'années. Pour expliquer cette dynamique, il faut supposer que l'Univers contient de l'énergie sombre ou qu'il faut modifier les lois de la relativité générale d'Einstein. La nature de l'énergie sombre reste inconnue, mais, si elle existe, elle représenterait près de 70 % du contenu de l'Univers.

Avec les vides cosmiques, nous commençons depuis peu à tester les modèles d'énergie sombre et de gravité modifiée. L'idée d'utiliser les vides pour répondre à ces questions n'est pas nouvelle, mais cette approche était confrontée à un obstacle expérimental important : la difficulté de sonder de grandes portions du ciel profondément, avec une bonne précision sur les mesures de distance des galaxies. L'avènement des grands sondages cosmologiques tels que le programme BOSS ont stimulé l'intérêt des vides pour la cosmologie. En effet, les vides cosmiques, qui remplissent la majeure partie de l'Univers, contiennent très peu de matière, et pourraient être composés principalement d'énergie sombre. Ces régions



CHAQUE POINT DE CETTE CARTE EST UNE GALAXIE. Les plus proches de la Terre sont en jaune tandis que les plus éloignées sont en violet. Il est ainsi possible de reconstruire une carte en trois dimensions à partir des données du relevé SDSS III (dont on ne voit ici que 3 %). Outre certaines petites zones sans données, on devine aussi des vides, des régions moins pourvues en galaxies.

se présentent donc comme un laboratoire idéal pour tester les scénarios d'énergie sombre ou les théories de gravité modifiée, des alternatives à la relativité générale.

PLS

Les vides commencent-ils à révéler leurs secrets ?

S.E.: Petit à petit. Une étude récente menée par Nico Hamaus, de l'université de Munich, et à laquelle j'ai participé, s'est concentrée sur la vitesse des galaxies au sein des vides. Cette démarche présente une difficulté observationnelle, car la vitesse que nous mesurons pour une galaxie donnée a deux composantes difficiles à dissocier. La première est liée à l'expansion de l'Univers, le fameux décalage vers le rouge, qui conduit toutes les galaxies à s'éloigner de la Voie lactée. La seconde provient du fait que les galaxies sont dotées d'une vitesse propre au sein d'un vide. En moyenne, elles devraient se déplacer dans toutes les directions. Cependant, les régions denses en matière, qui bordent les vides, attirent les galaxies du vide. En isolant cette dernière composante de vitesse, Nico Hamaus et son équipe ont estimé avec une bonne précision la densité moyenne de matière dans l'Univers et ils ont évalué le taux de croissance des grandes structures.

Cette approche permet aussi de mettre à l'épreuve la relativité générale d'Einstein dans les vides, ces régions de faible densité. Une déviation des observations par rapport aux calculs théoriques serait un indice qu'il faut modifier les lois de la gravitation. Pour l'instant, la conclusion est que la relativité générale tient bon.

PLS

Vous vous intéressez aussi à un autre aspect des vides cosmiques, leur forme. En quoi consiste cette approche ?

S.E.: Avec ma post-doctorante Alice Pisani (qui a récemment obtenu une bourse « L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science »), nous nous intéressons à l'effet Alcock-Paczynski appliqué aux vides cosmiques. Ceux-ci n'ont pas de raison particulière d'être de forme sphérique. Cependant, si l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle, et que nous regardons un grand nombre de vides, leur forme moyenne doit être sphérique, dans l'espace réel. Or, lorsque nous construisons une carte tridimensionnelle des galaxies, nous ne mesurons pas directement leur position, nous enregistrons le décalage vers le rouge de leur spectre lumineux. Pour effectuer la conversion en distance et revenir dans l'espace réel, nous devons choisir un modèle

cosmologique. Et si le modèle choisi n'est pas correct, la forme moyenne des vides ne sera pas sphérique. Nous avons là un moyen de tester un grand nombre de modèles, c'est le test d'Alcock-Paczynski. Cette approche est prometteuse et devrait bientôt donner ses premiers résultats.

PLS

Quelles sont les perspectives dans le domaine des vides cosmiques ?

S.E.: Depuis 2014, le programme BOSS est devenu *eBOSS* (*e* pour *extended*). L'idée est de chercher des galaxies à plus grande distance que BOSS. C'est très excitant pour nous car, en étudiant des vides plus lointains, nous regardons l'Univers plus jeune et nous pouvons voir si la dynamique de l'énergie sombre a changé au cours du temps. Cela permettra de mettre à l'épreuve les prévisions de certains modèles d'énergie sombre.

Un autre programme très attendu est *Euclid*, un satellite européen prévu pour 2020. L'objectif est d'observer plus de 10 milliards d'objets dont 50 millions de galaxies très précisément. Avec un aussi vaste catalogue, les vides auront encore beaucoup de choses à nous révéler. ■

Propos recueillis par Sean Bailly