

électrons du plasma, la valeur de la constante influe sur le fond diffus cosmologique. Les résultats de *Planck* montrent que ce paramètre ne varie pas, dans la limite de précision de l'expérience. De même, parmi les nombreux modèles d'énergie sombre développés par les cosmologistes, certains supposent que cette composante hypothétique de l'Univers a des propriétés qui évoluent avec le temps. Si les données de *Planck* peuvent difficilement préciser les caractéristiques de l'énergie sombre, elles n'indiquent pas que l'énergie sombre varie au cours du temps.

Dans un autre domaine, lié à la physique des particules, les données de *Planck* permettent de tester le nombre de familles de neutrinos. Initialement, ce nombre est fixé à trois comme dans le modèle standard de la physique des particules. Mais certaines expériences qui étudient l'oscillation des neutrinos – la transformation périodique d'un neutrino d'une famille en un repré-

sentant d'une autre famille – présentent des anomalies. Celles-ci suggèrent l'existence possible d'une quatrième famille de neutrinos, nommés neutrinos stériles, car ces particules interagissent avec d'autres particules uniquement *via* les oscillations. Une famille supplémentaire de neutrinos aurait eu une influence sur les fluctuations du fond diffus, mais ce type de modification n'est pas observé dans les résultats. Il n'y aurait bien que trois familles de neutrinos.

Que dire sur la forme globale de l'Univers? L'expérience WMAP avait déjà montré qu'à grande échelle, l'Univers a une géométrie euclidienne ou plate. Cela signifie que les règles usuelles de la géométrie s'appliquent à l'Univers : la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés ou encore deux droites parallèles ne se croisent jamais. On écarte ainsi des géométries sphériques ou hyperboliques. Les observations de *Planck* confirment

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 2 mai 2013 de 14h à 15h, Alain Riazuelo reviendra sur les résultats de *Planck* dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture*. www.franceculture.com

Des fluctuations de température aux grandeurs physiques

La carte du fond diffus cosmologique représente les fluctuations de température des photons autour de la valeur moyenne de 2,7 kelvins (voir la figure 3). Ces variations de température donnent un aperçu de la distribution de la matière au moment de la recombinaison, lorsque les ions et les électrons ont formé les atomes neutres. Les structures observées résultent de l'évolution des fluctuations de densité primordiales issues d'un processus aléatoire plus ancien, qui pourrait être l'inflation.

Pour exploiter cette carte, les cosmologistes vont dans un premier temps reconstituer les propriétés statistiques des structures observées, essentiellement en effectuant une décompo-

sition par échelle et en déterminant pour chacune d'entre elles l'amplitude typique des écarts à la moyenne des fluctuations.

Ce principe d'analyse est très utilisé en traitement du signal, qu'il soit sonore ou électrique. Par exemple, un signal sinusoïdal est caractérisé par la fréquence des oscillations et l'amplitude du signal. Pour un signal quelconque, il est possible de le décomposer comme une somme infinie de sinusoïdes, chacune avec sa fréquence et son amplitude (décomposition de Fourier). Le signal est décrit par l'ensemble des amplitudes et des fréquences, ce qui en facilite l'analyse.

Dans le cas du fond diffus, il s'agit d'un signal en deux dimensions – celles

de la carte – et il correspond à l'enchevêtrement d'ondes tridimensionnelles, les vibrations de la matière ordinaire dans le plasma. Il existe des outils mathématiques adaptés à cette situation, équivalente à la décomposition en une somme infinie de sinusoïdes.

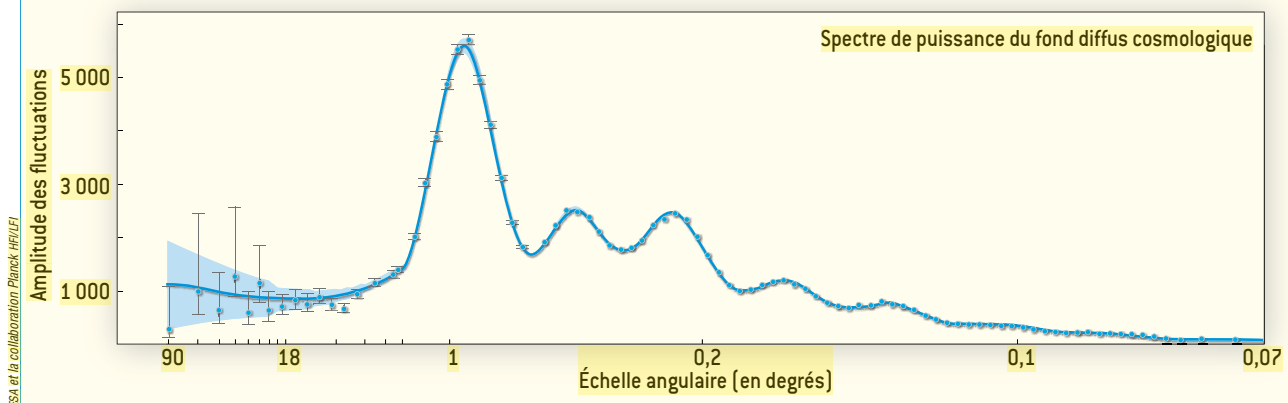
Ce traitement produit le spectre de puissance (voir la figure) qui représente les amplitudes de chaque terme de la décomposition en fonction de l'échelle. Les termes à gauche correspondent à des structures de grande taille dans le ciel, tandis que celles qui sont à droite sont les structures les plus petites. On remarque que ces incertitudes sur les données de *Planck* (points bleus), à l'exception des premiers points (à gauche),

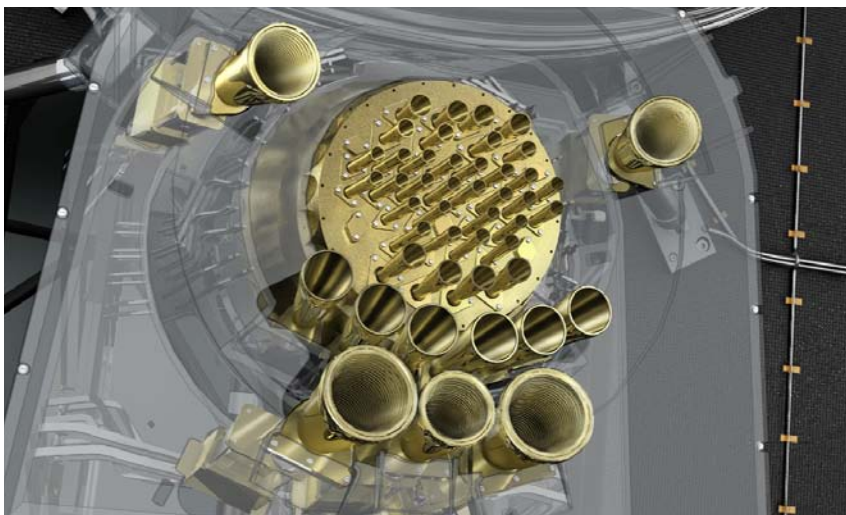
sont très petites, signe de la grande précision des mesures du satellite.

Les cosmologistes confrontent ces données aux spectres théoriques prévus par les différents modèles qu'ils ont imaginés.

En pratique, un modèle donné dépend d'un certain nombre de paramètres, que l'on fait varier afin de déterminer la combinaison qui s'ajuste le mieux aux données. Si le jeu de paramètres est satisfaisant, il permet de donner les valeurs de ces paramètres.

La courbe (en bleu) sur le spectre correspond au choix de paramètres qui restitue au mieux les résultats expérimentaux. On obtient ainsi les valeurs de la densité de matière noire, de matière ordinaire, de rayonnement.





5. LE DÉTECTEUR DE **PLANCK** est composé de neuf groupes de cornets, chaque groupe étant sensible à une fréquence du rayonnement.

LE FOND DIFFUS CACHÉ DERRIÈRE LES AVANT-PLANS

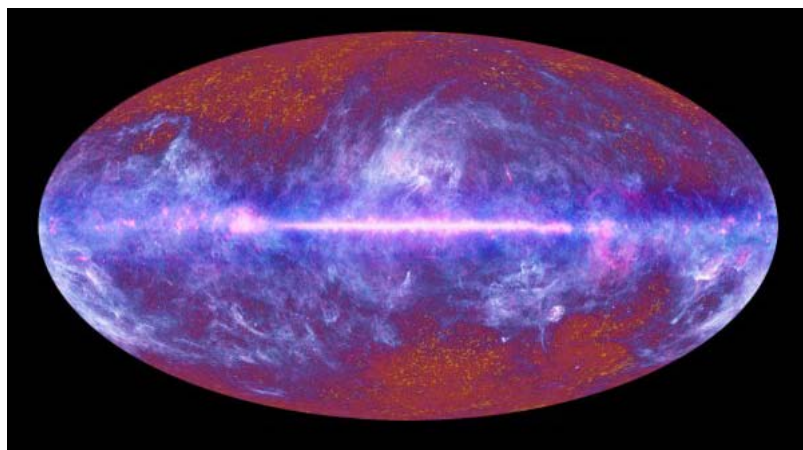
L'observation du fond diffus cosmologique n'est pas directe. Il faut soustraire les effets cinématiques du déplacement combiné de la Terre, du Soleil et de la galaxie par rapport à l'Univers lointain. À cause de l'effet Doppler, les photons provenant d'une direction – celle du mouvement – sont plus « chauds » que ceux de la direction opposée. Ce phénomène a été observé pour la première fois en 1971.

Après avoir soustrait cet effet cinématique, les cosmologistes doivent éliminer certains rayonnements enregistrés par les détecteurs de *Planck* qui se superposent au fond diffus. Ces rayonnements perturbateurs proviennent de processus as-

trophysiques d'avant-plan. Ces sources émettent de la lumière dans la même gamme de longueurs d'onde que le fond diffus. Ce rayonnement a diverses origines : il provient de l'émission galactique, de la poussière interstellaire, du rayonnement d'électrons diffusés sur des particules chargées, ou du rayonnement synchrotron émis par une particule chargée et déviée par un champ magnétique. La carte ci-dessous montre l'effet d'un type d'avant-plan sur la carte du fond. On distingue très nettement la Voie lactée d'où est émis le rayonnement parasite.

Aux fréquences comprises entre 100 et 217 gigahertz, les fluctuations du fond diffus cosmologique dominant tous les

avant-plans. Mais pour extraire au mieux la contribution qui intéresse les cosmologistes, il est nécessaire d'observer une plus vaste gamme de fréquences. Le détecteur de *Planck* est sensible à des fréquences comprises entre 30 et 857 gigahertz. Cela permet de mieux modéliser le rayonnement des particules chargées à basse fréquence et la lumière émise par la poussière à haute fréquence. Il est alors possible de nettoyer les cartes de rayonnement enregistrées entre 100 et 217 gigahertz. Le processus d'obtention de la carte du fond diffus est très complexe et nécessite le travail d'une grande équipe de physiciens pour démêler tous les signaux.



ce résultat et étendent son domaine de validité à des distances allant jusqu'à 660 milliards d'années-lumière, soit 15 fois le rayon de l'Univers observable.

Si l'Univers est plat, il n'est pas forcément infini. Il peut être replié sur lui-même, un peu à l'image d'une pièce dont les murs, le sol et le plafond seraient tapissés de miroirs : même finie, la pièce donnerait l'impression d'un espace infini à quiconque s'y trouverait. Le jeu des réflexions donne une infinité d'images de chaque objet que contient la pièce. La même chose se produit-elle pour l'Univers, est-il « chiffonné » selon l'expression de l'astrophysicien Jean-Pierre Luminet ? On ne trouve pas de trace d'images multiples du fond diffus, ce qui limite les possibilités que l'Univers soit replié sur lui-même.

Et, fini ou pas, l'Univers tourne-t-il sur lui-même ? Là encore, une rotation globale de l'Univers serait observable par le biais d'une série de motifs en spirale que l'on devrait observer dans des directions opposées, spirales dont la structure serait déterminée par les abondances de matière et d'énergie sombre. Là encore, l'analyse ne révèle rien qui serait compatible avec une telle rotation, pas plus qu'on ne trouve la trace de cordes cosmiques, sortes d'immenses concentrations filiformes d'énergie dont la formation est jugée possible à l'issue de l'inflation.

Des surprises dans les données

Le rôle de la mission *Planck* n'a pas été seulement d'améliorer la précision sur certaines grandeurs physiques. Il a permis de tester des modèles différents et d'écarter ceux dont les prévisions ne sont pas observées. Cependant, l'analyse réserve aussi quelques surprises dont il est difficile aujourd'hui de savoir qu'en penser. Par exemple, quand on examine le spectre de puissance (voir l'encadré page 49), on constate des anomalies. Les points pour les échelles angulaires les plus grandes sont presque tous situés au-dessous de la courbe, alors qu'on se serait attendu à ce qu'ils soient équitablement répartis de part et d'autre de celle-ci. Pour quelle raison ? On l'ignore. L'hypothèse la plus prudente serait d'imaginer un problème dans le traitement des données brutes, mais aucune explication n'a été trouvée jusqu'à maintenant. Du reste, cet effet est aussi visible dans les données, certes moins précises, de WMAP. Cela tend sans doute à rendre son