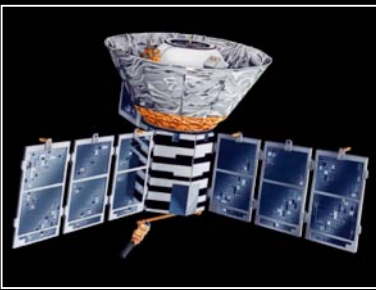


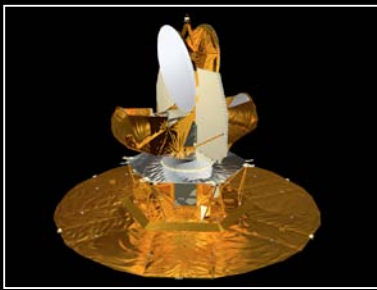
COBE



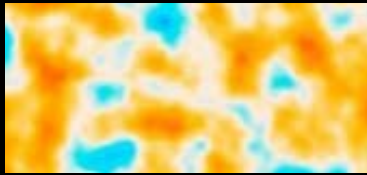
- > **Dates de l'expérience** : 1989-1993
- > **Détecteur** : trois canaux de fréquences entre 31 et 81 gigahertz
- > **Résolution angulaire** : 7 degrés



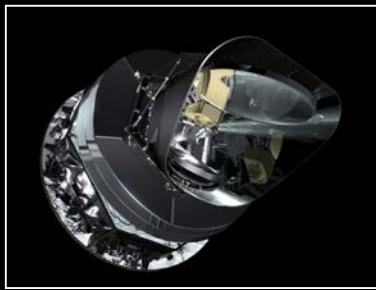
WMAP



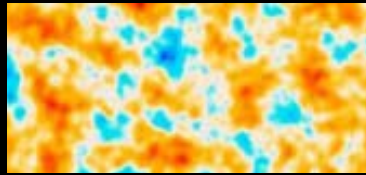
- > **Dates de l'expérience** : 2001-2010
- > **Détecteur** : cinq canaux de fréquences entre 23 et 94 gigahertz
- > **Résolution angulaire** : 13 minutes d'arc



Planck



- > **Dates de l'expérience** : 2009-2012
- > **Détecteur** : neuf canaux de fréquences entre 30 et 857 gigahertz
- > **Résolution angulaire** : 5 minutes d'arc



NASA/JPL-Caltech/ESA

4. TROIS SATELLITES ont étudié le rayonnement du fond diffus cosmologique.

proposé pour expliquer pourquoi l'Univers est globalement le même dans toutes les directions. Sinon, comment expliquer que deux régions de la carte du fond diffus, si éloignées l'une de l'autre qu'elles n'ont jamais pu être en contact dans l'Univers primordial, présentent la même température moyenne de 2,7 kelvins ? Ce scénario assure que ces régions ont été en contact (car initialement très proches) et que les conditions qui y régnaient se sont équilibrées avant le début de l'inflation.

Quel est le rapport avec les fluctuations de densité ? La réponse tient à ce que les relations d'incertitude du monde microscopique se trouvent, elles aussi, largement amplifiées par le même phénomène. Elles donnent naissance aux fluctuations de densité de l'Univers primordial. Mais au-delà du rôle *ad hoc* de l'inflation, on peut tester concrètement la pertinence de ces idées.

L'inflation se confirme

L'inflation autorise en effet plusieurs prévisions robustes, indépendantes du détail de son déroulement. Tout d'abord, l'Univers doit être plat (sans courbure intrinsèque), ce que confirment les mesures de *Planck*. Par ailleurs, l'inflation prévoit, au moins pour ses versions les plus simples, plusieurs propriétés statistiques des fluctuations. Elles

■ BIBLIOGRAPHIE

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XVII. Gravitational lensing by large-scale structure*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XXIV. Constraints on primordial non-Gaussianity*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

Collaboration *Planck*, *Planck 2013 results. XXVI. Background geometry and topology of the Universe*, soumis à *Astronomy & Astrophysics*, 2013.

doivent être presque « invariantes d'échelle » : leur amplitude dépend peu de l'échelle à laquelle on les étudie, et, à une échelle donnée, la répartition des amplitudes suit une distribution gaussienne. Suggérés par les expériences passées, ces résultats sont confirmés par *Planck*. Ils permettent d'écarter des modèles d'inflation plus complexes qui prévoyaient des distributions non gaussiennes et des scénarios non fondés sur l'inflation, tel le scénario ekpyrotique, un modèle cyclique de l'Univers.

Ainsi, le satellite *Planck* a permis d'évaluer avec précision les paramètres du modèle standard de la cosmologie qui rendent compte de l'Univers primordial, apportant de nouvelles confirmations du modèle standard de la cosmologie. Pourrait-on utiliser les données de *Planck* pour invalider certains modèles alternatifs ? Comme nous l'avons évoqué pour l'inflation, les données du satellite permettent de tester des scénarios alternatifs et d'exclure ceux qui ne sont pas compatibles avec les résultats.

Par exemple, une question débattue depuis plus de dix ans est la suivante : les constantes fondamentales changent-elles au cours du temps ? Certains modèles supposent que la constante de structure fine, qui régit l'intensité de la force électromagnétique, varie avec le temps. En intervenant dans le processus de diffusion des photons sur les

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-

■ 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

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

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.

