

Cartographe cosmique

CHARLES BENNETT • GARY HINSHAW • LYMAN PAGE

Le satellite MAP de la NASA mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, afin de fournir aux cosmologistes une vision plus précise de l'Univers primordial.

Durant l'été prochain, la NASA prévoit d'envoyer dans l'espace un satellite de 830 kilogrammes et de 4 mètres de hauteur : MAP (de l'anglais *Microwave Anisotropy Probe*, c'est-à-dire sonde de l'anisotropie micro-onde). La sonde mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique ; elle devrait atteindre l'orbite qui lui est assignée autour du Soleil – à 1,5 million de kilomètres au dessus de l'orbite terrestre – en trois mois. Elle commencera alors une mission d'observation de deux ans de tous les détails du fond diffus cosmologique micro-onde. Ce dernier a été émis il y a environ 15 milliards d'années et n'a pas été modifié depuis. Si l'on parvient à le cartographier, on disposera d'une photographie de l'Univers primordial. En étudiant cette carte, les cosmologistes détermineront la composition de l'Univers, sa géométrie et son histoire.

Comme son nom l'indique, la sonde MAP mesurera les fluctuations de température du fond diffus cosmologique micro-onde, c'est-à-dire les infimes variations de sa température en fonction de la direction d'observation. MAP sera assez sensible pour enregistrer des différences de température d'un vingt millionième de kelvin de part et d'autre de la température moyenne de 2,73 kelvins. Encore plus intéressant, la sonde déterminera la position des points chauds et froids sur le plan du ciel avec une résolution angulaire de 0,23 degré, y réalisant un million de mesures en tout. Ainsi, MAP fournira une carte du fond diffus cosmologique beaucoup plus détaillée que les mesures réalisées au début des années 1990 sur l'ensemble de la voûte céleste par le satellite COBE (ce dernier avait une résolution angulaire de sept degrés seulement).

Les performances de MAP résultent de l'utilisation de deux télescopes micro-ondes adossés l'un à l'autre, afin

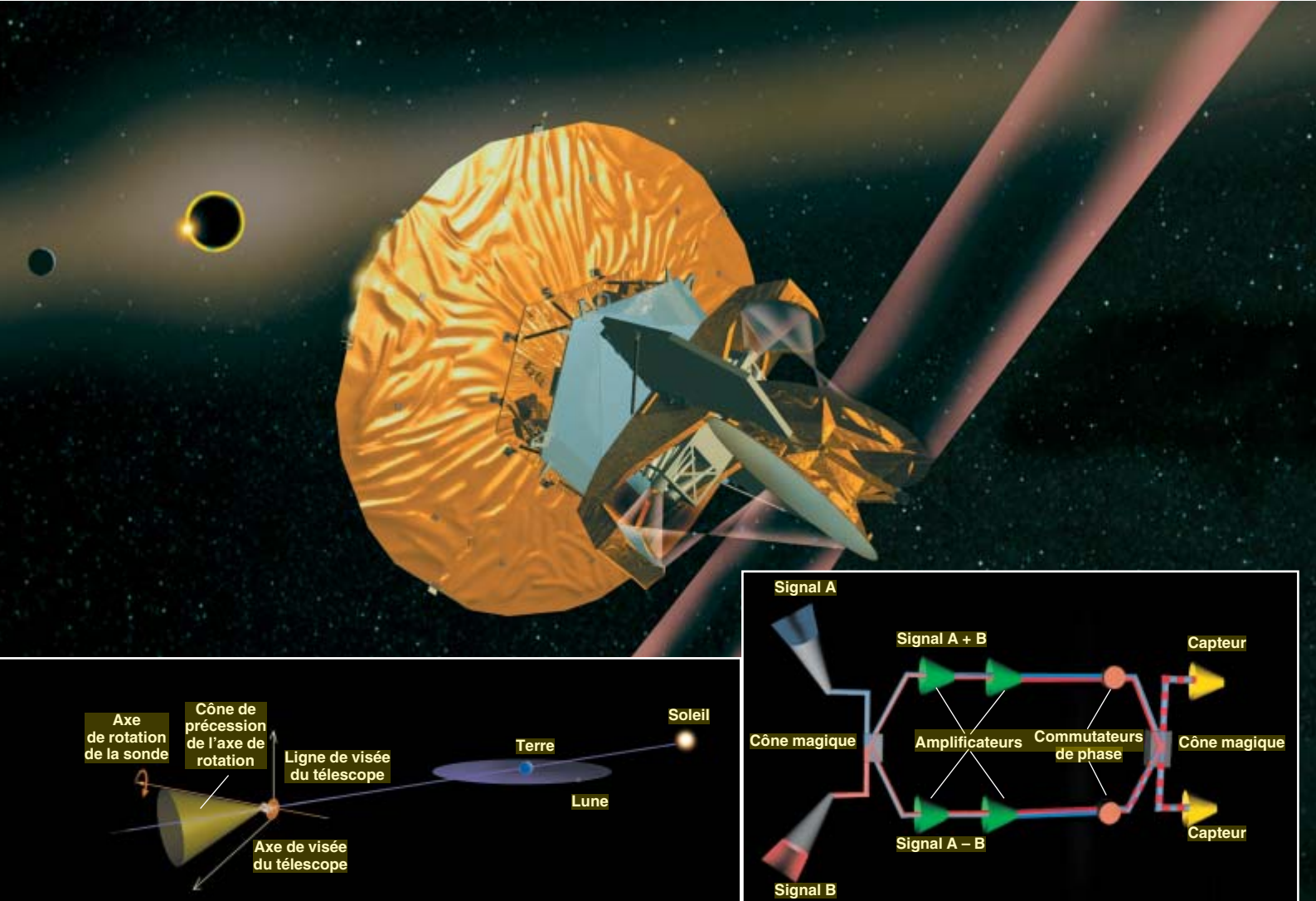
de focaliser le rayonnement incident. Le signal recueilli par chacun des télescopes sera exploité par des systèmes d'acquisition différentiels, conçus pour analyser cinq bandes de fréquences du fond diffus cosmologique. Plutôt que de mesurer la température absolue du rayonnement, chaque système enregistrera la différence entre les signaux des deux télescopes. Le satellite tourne sur lui-même toutes les deux minutes, et son axe subit un mouvement de précession, c'est-à-dire qu'il décrit un cône autour d'une certaine direction. Les systèmes d'acquisition des données pourront comparer la température de chaque point du ciel à 1 000 autres points, et fourniront des jeux de données imbriqués. Cette stratégie de mesure est analogue à celle d'un cartographe qui préférerait mesurer les différences de hauteur entre les sommets des collines d'un haut plateau plutôt que leurs élévations par rapport au niveau de la mer.

La méthode s'affranchit des perturbations engendrées par les petites variations de la température de la sonde elle-même. Pour étalonner les données, la sonde mesurera en permanence le moment dipolaire du fond diffus cosmologique, c'est-à-dire les modifications de la température du rayonnement dues au mouvement de la Terre à travers l'espace. MAP a été conçu de façon à réduire au minimum la contamination des données par des signaux parasites. Si tout se passe comme prévu, cette sonde devrait fournir une carte du fond diffus cosmologique micro-onde d'une qualité encore inégalée.

Charles BENNETT, Gary HINSHAW et Lyman PAGE font partie de l'équipe qui mène le projet MAP.

LES DEUX TÉLESCOPES DE MAP sont adossés. Ils focalisent le rayonnement micro-onde du fond diffus cosmologique (*les bandes rouges de la figure*) grâce à leurs miroirs primaires et secondaires. Leurs miroirs primaires mesurent 1,6 mètre sur 1,4, et leurs miroirs secondaires ont un mètre de diamètre. À l'arrière des capteurs solaires, un blindage (*en orange*) protège la sonde du rayonnement solaire et de ceux de la Terre et de la Lune, ce qui minimise les signaux parasites qui parviennent aux télescopes. Le rayonnement micro-onde focalisé par chaque télescope pénètre dans dix cônes (*en gris beige sur la figure*), conçus pour recueillir le rayonnement cosmologique dans cinq bandes de fréquences. Les quatre cônes étroits placés au centre enregistrent des longueurs d'onde de l'ordre de trois millimètres. Les cônes plus évasés placés à l'extérieur recueillent le rayonnement micro-onde à 22, 30, 40 et 60 gigahertz. À la base de chaque cône, un dispositif partage le rayonnement en ses deux

composantes de polarisations orthogonales, lesquelles sont ensuite envoyées vers deux systèmes d'acquisition différentiels indépendants. Ces derniers combinent les signaux des deux télescopes *A* et *B* à l'aide d'un instrument optique nommé "cône magique", qui fournit les signaux de sortie $A + B$ et $A - B$. Ceux-ci sont ensuite amplifiés, puis leur phase est permutée. Un autre cône magique les recombine ensuite pour fournir les signaux des télescopes *A* et *B* avant qu'un capteur enregistre leur différence de température. Grâce à cette architecture croisée, chacun des deux amplificateurs agit sur les deux signaux simultanément, ce qui évite l'amplification des erreurs avec celle des signaux. Notons finalement que le poste d'observation de MAP sera proche du point de Lagrange L2, à environ 1,5 million de kilomètres de notre planète, sur l'axe Terre-Soleil. La sonde tournera autour du Soleil à la même vitesse que la Terre, de sorte que l'espace lointain sera sans cesse observable.



Planck, le successeur de MAP

L'Agence spatiale européenne prévoit de lancer en 2007 une mission pour compléter les résultats de MAP. Construit avec la participation des États-Unis et du Canada, le satellite *Planck* cartographiera le fond diffus cosmologique micro-onde dans dix bandes de fréquences (au lieu de cinq avec MAP). À cet effet, il emportera deux instruments : le premier observera le rayonnement de fond entre 30 et 100 gigahertz ; il est en voie de réalisation sous la direction de Nazzareno Mandolesi, de l'Institut Tesre de Bologne. Le second, dont Jean-Loup Puget, de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, supervise la construction, observera entre 100 et 900 gigahertz. Ces instruments mesureront les fluctuations de température (ou anisotropies) du fond diffus cosmologique micro-onde sur toute la voûte céleste avec une sensibilité de l'ordre de 6 millièmes de degré et une résolution angulaire de 0,1 degré. Cette sensibilité et cette résolution sont respectivement trois et deux fois meilleures que celles de MAP.

Les astrophysiciens ont sélectionné les fréquences d'observations de *Planck*, afin de détecter et de mesurer les émissions d'une autre origine que le fond diffus. Elles sont dues, par exemple, à la poussière galactique ou à certaines sources extra-galactiques lointaines, et parasitent le signal cosmologique diffus. Grâce au signal recueilli par *Planck*,

les astrophysiciens détermineront ces émissions parasites avec la plus grande précision possible. Ils obtiendront ainsi une carte d'une qualité inédite du fond diffus cosmologique micro-onde et de sa polarisation.

Planck permettra aux cosmologistes de tester les modèles qui décrivent l'Univers primordial (inflation, défauts topologiques...). De plus, les chercheurs détermineront, grâce aux données du satellite, la valeur des paramètres en fonction desquels sont formulés les différents modèles d'Univers. Ces «paramètres cosmologiques clés» comprennent notamment la constante de Hubble, le paramètre de décélération, la constante cosmologique...

Planck devrait aussi fournir un catalogue complet des amas de galaxies et des galaxies (de l'ordre de plusieurs milliers d'objets). Autant de données grâce auxquelles les astrophysiciens expliqueront mieux les processus de formation et d'évolution de ces grands objets cosmiques. Les observations faites par *Planck* leur permettront aussi de dresser une carte spectrale et spatiale de notre Galaxie, qui ira du domaine radio à l'infrarouge lointain. Les astrophysiciens s'en serviront pour étudier, notamment, les propriétés des poussières de notre Galaxie.

Nabila AGHANIM appartient à l'équipe *Planck* de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay.

Le cinquième élément cosmique

JEREMIAH OSTRIKER • PAUL STEINHARDT

Un champ d'énergie invisible, la quintessence, domine depuis peu l'évolution de l'Univers, et en accélère l'expansion.

Avons-nous enfin découvert tous les secrets du Cosmos... à quelques détails près? Il y a encore quelques années, nous le pensions. Après un siècle de débat animé, les cosmologistes s'entendaient enfin sur les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Tout avait commencé avec du gaz et un rayonnement à une température et une densité inimaginables. Ensuite, pendant une quinzaine de milliards d'années, l'Univers s'est dilaté et refroidi. Les galaxies et les autres structures de l'espace sont nées de microscopiques fluctuations quantiques qui, à la faveur d'une brève période d'«inflation», ont atteint leur taille cosmique. Seule une faible fraction de la matière est constituée des éléments chimiques qui nous sont familiers. Le reste, la matière noire, est composé de particules élémentaires exotiques, invisibles parce qu'elles n'interagissent pas avec la lumière. Même si nombre de mystères subsistaient, au moins avions-nous déterminé les grandes lignes de l'histoire cosmique...

C'est ce que nous avons cru. Aujourd'hui, nous savons que nous n'avons découvert qu'une toute petite partie de l'histoire. Les astrophysiciens ont acquis la conviction qu'ensemble les éléments chimiques et la matière noire constituent moins de la moitié du contenu de l'Univers! L'essentiel semble consister en une nouvelle forme d'énergie qui semble attachée au vide, aux propriétés étonnantes. Omniprésente, cette «énergie du vide» n'est pas attractive, mais répulsive! Tandis que la gravitation attire les uns vers les autres les éléments chimiques et la matière noire,

formant ainsi des étoiles et des galaxies, cette nouvelle forme d'énergie se disperse dans l'Univers sous la forme d'une «brume» quasi uniforme. L'Univers est un champ de bataille où s'affrontent deux «forces», et c'est la force répulsive qui l'emporte. Graduellement, l'énergie qui est la cause de la force répulsive surpasse l'attraction due à la matière ordinaire, de sorte que l'expansion de l'Univers s'accélère. Peut-être même est-ce le signe d'une nouvelle phase d'inflation. Si c'est le cas, le futur de l'Univers sera radicalement différent de ce que les cosmologistes envisageaient, il y a seulement dix ans.

Les cosmologistes ont d'abord recherché des preuves de l'existence de cette énergie du vide inconnue. Après avoir accumulé des preuves convaincantes de son existence, ils en ont recherché l'origine. Selon l'explication la plus souvent évoquée, elle serait inhérente à la structure de l'espace. Même si une portion de l'espace était entièrement vide, dépourvue de matière et de rayonnement, elle contiendrait encore cette énergie. Cette conception de l'énergie du vide est déjà ancienne : Albert Einstein l'introduisit dès 1917, lors de sa tentative de construction d'un modèle statique de l'Univers. Comme la plupart des grands physiciens du passé, Einstein était persuadé que l'Univers est «stationnaire», c'est-à-dire qu'il n'est ni en expansion ni en contraction. Pour que cet état stationnaire soit compatible avec sa théorie de la relativité générale, il dut introduire une densité d'énergie constante associée au vide ou, selon ses propres termes, une «constante cosmologique». Il ajusta

cette constante de sorte que les forces de gravitation répulsives équilibrent parfaitement les forces de gravitation attractives dues à la matière.

Puis les astronomes découvrirent que l'Univers est en expansion. Einstein regretta alors son artifice, le considérant comme son erreur la plus grossière. Ce jugement était sans doute hâtif. Si la constante cosmologique était légèrement supérieure à la valeur proposée par Einstein, les forces gravitationnelles répulsives l'emporteraient sur les forces gravitationnelles attractives, et, par conséquent, l'expansion de l'Univers s'accélérait.

Aujourd'hui, de nombreux cosmologistes envisagent une autre explication de l'expansion accélérée de l'Univers : la quintessence. Le terme désigne un hypothétique champ quantique en évolution dynamique proposé par Robert Caldwell, Rahul Dave et l'un d'entre nous (Paul Steinhardt), afin d'expliquer la présence partout dans l'Univers d'une nouvelle forme d'énergie créant des forces répulsives. Le terme quintessence désigne la «quinte essence», littéralement le «cinquième élément» qui, avec la terre, l'air, l'eau et le feu, composaient l'Univers selon les Grecs. Substance éphémère, le cinquième élément servait à empêcher la Lune et les planètes de s'effondrer au centre de la sphère céleste. Les trois physiciens ont repris cette notion pour désigner le champ répulsif ou «antigravitationnel» qui évite l'effondrement de l'Univers.

1. À L'ÉCHELLE OÙ LES GALAXIES ne sont que des gouttelettes, une étrange énergie du vide, la quintessence, dicte sa loi.