

l'avons souligné, les hétérogénéités de la distribution des masses dans l'Univers primordial ont aussi causé des variations de température dans le fond diffus cosmologique. Ainsi, le champ gravitationnel des régions les plus denses du plasma a pu décaler vers le rouge les photons émis par ces régions, perturbant localement la température. Si les cosmologistes se contentaient de mesurer la température du fond diffus cosmologique, ils ne sauraient établir la part des ondes gravitationnelles dans les variations observées par COBE ou par les autres détecteurs. Or, on sait que les variations dues aux ondes gravitationnelles ne sont responsables, au maximum, que d'un cent millièmes des variations observées. Ce fait impose une limite physique sur l'énergie qui a engendré l'inflation : elle n'a pu excéder 10^{16} gigaélectronvolts, et, par conséquent, n'a pu commencer que 10^{-38} seconde après le Big Bang.

Comment les cosmologistes peuvent-ils améliorer leurs estimations ? Comment confirmer l'origine des fluctuations de température ? C'est la polarisation du fond diffus cosmologique qui fournit la réponse à ces questions. Toute onde lumineuse qui se réfléchit sur une surface selon une direction qui fait un angle droit avec la direction du faisceau incident est polarisée, c'est-à-dire que les ondes s'orientent selon une direction privilégiée. Les verres de lunettes polarisés sont fondés sur ce principe : ils réduisent l'intensité lumineuse en bloquant la lumière polarisée horizontalement à celle qui est réfléchie par le sol. Le fond diffus cosmologique est polarisé lui aussi. Juste avant que l'Univers ne devienne transparent au rayonnement, les photons du fond diffus cosmologique ont été diffusés une dernière fois par les électrons du plasma. Quand ces diffusions se sont produites sous de grands angles, certains de ces photons ont été polarisés.

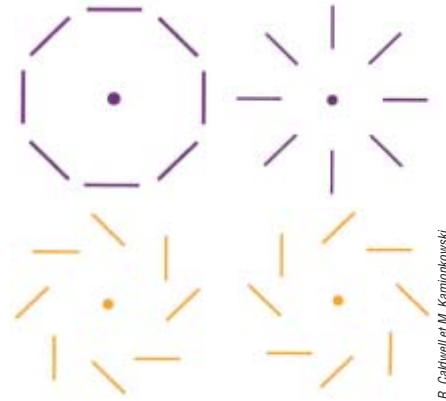
On devrait pouvoir détecter les ondes gravitationnelles dues à l'inflation, car les mouvements du plasma dus aux ondes gravitationnelles ont donné des motifs de polarisation différents de ceux que créent des fluctuations de la densité massique. La raison en est simple. Représentons par de petits segments l'angle de polarisation du fond diffus cosmologique dans chaque région du ciel (voir la figure 5). Ces segments s'agencent sous forme d'anneaux, d'étoiles, ou de tourbillons, lesquels tournent soit vers la droite, soit vers la gauche.

Cette orientation des tourbillons indique leur origine. Des fluctuations de densité dans la masse du plasma primordial n'auraient pu produire de tels motifs de polarisation, car les régions denses ou peu denses du plasma étaient dépourvues d'orientation vers la droite ou vers la gauche. Les ondes gravitationnelles, en revanche, sont polarisées. C'est pourquoi les motifs de polarisation créés par les ondes gravitationnelles sont la superposition de nombreux tourbillons de tailles et de sens variés.

Même un observateur entraîné ne pourrait deviner à l'œil nu si un diagramme de polarisation de l'espace contient des motifs en tourbillons. Toutefois, grâce à une forme particulière d'analyse de Fourier, les astrophysiciens décomposent un motif de polarisation en ses composantes. Ainsi, si les cosmologistes parviennent à mesurer la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde et déterminent la proportion des motifs en tourbillons, ils pourront en déduire l'amplitude des ondes gravitationnelles de très grandes longueurs d'ondes issues de l'inflation. Ils en déduiront également l'énergie liée à l'inflation (ou du moins son ordre de grandeur), puisque l'amplitude des ondes gravitationnelles qui en sont issues en découle directement. Ils sauront alors si c'est bien la différenciation des forces fondamentales qui a déclenché l'inflation.

Analyser la polarisation

Quand sera-t-on en mesure d'analyser les motifs de polarisation ? Le satellite MAP de la NASA et nombre d'autres détecteurs au sol ou embarqués dans des ballons devraient bientôt mesurer, pour la première fois, la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde. Toutefois, ces instruments ne seront probablement pas assez sensibles pour détecter la composante due aux ondes gravitationnelles de l'inflation. Les expériences suivantes fourniront sans doute plus d'informations. Si l'inflation a bien été déclenchée par l'unification des forces fondamentales, le signal des ondes gravitationnelles sera peut-être assez intense pour être détecté par le satellite européen Planck. À moins qu'une nouvelle génération d'instruments encore plus sensibles ne soit nécessaire... En revanche, si l'inflation résulte d'autres phénomènes physiques plus tardifs et moins énergétiques, le signal laissé par les ondes gravitationnelles émises dans



R. Caldwell et M. Kamionkowski

5. LA POLARISATION du rayonnement cosmologique diffus devrait nous renseigner sur les premiers instants de l'Univers. Des fluctuations de densité du plasma primordial auraient créé des motifs de polarisation en anneau ou en étoile (*en haut*) ; les ondes gravitationnelles, au contraire, auraient produit des tourbillons gauches ou droits (*en bas*).

ces conditions serait trop faible pour être détecté dans un avenir proche.

Réduits à des spéculations quant à l'origine de l'inflation, les cosmologistes ne peuvent prédire avec certitude l'amplitude du signal de polarisation laissé par les ondes gravitationnelles de l'inflation. Toutefois, même s'il n'y a qu'une toute petite chance qu'un tel signal soit mesurable, alors on doit tenter de le détecter. Sa mesure serait une validation incontestable de la théorie de l'inflation et nous permettrait de remonter à la naissance de l'Univers, ou presque : 10^{-38} seconde après le Big Bang. Aurons-nous alors la réponse à la question qui taraude l'homme depuis toujours : d'où vient l'Univers ?

Robert CALDWELL est maître de conférences en physique et en astronomie à l'Université de Dartmouth. Marc KAMIONKOWSKI est professeur de physique théorique et d'astronomie à l'Institut de technologie de Californie.

Robert R. CALDWELL, Marc KAMIONKOWSKI et Leven WADLEY, *First Space-Based Gravitational-Wave Detectors*, in *Physical Review D*, vol. 59, Issue 2, pp. 27101-27300, 15 janvier 1999.

La révolution cosmologique, Mini-dossier, in *Pour la Science*, mars 1999.

Les missions MAP et Planck sont détaillées sur le site map.gsfc.nasa.gov/ ; astro.estec.esa.nl/astrogen/planck/mission_top.html

Pour plus d'informations sur les détecteurs d'ondes gravitationnelles, consulter le site :

www.ligo.caltech.edu/lisa.jpl.nasa.gov

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.