

détectées par ces nouveaux instruments. En revanche, les ondes gravitationnelles issues de l'inflation dont les longueurs d'onde sont dans cet intervalle ont une amplitude bien trop faible pour être détectées de cette façon.

Les ondes gravitationnelles les plus intenses issues de l'inflation ont des longueurs d'onde comparables au diamètre de l'Univers observable. Pour les détecter, les astronomes doivent utiliser des masses flottant librement à des distances du même ordre ! *A priori*, cela semble impossible, mais, par hasard, la nature nous offre une configuration de ce type : le plasma primordial d'où est né le fond diffus cosmologique. Durant les 500 000 premières années qui ont séparé l'inflation

de l'émission du fond diffus cosmologique, les ondes gravitationnelles à très grandes longueurs d'onde se sont propagées l'Univers, étirant ou comprimant le plasma primordial (voir la figure 4). Le phénomène se traduit aujourd'hui par de faibles décalages Doppler dans le fond diffus cosmologique, que les astrophysiciens peuvent observer. Ainsi, si, au moment où le fond diffus cosmologique a été émis, une onde gravitationnelle était en train d'étirer une région du plasma dans notre direction – c'est-à-dire dans la direction de l'Univers qui allait devenir notre Galaxie –, le rayonnement provenant de cette région est décalé vers les longueurs d'onde plus courtes, c'est-à-dire vers le bleu (voir la figure 5) : la

température y est supérieure. Inversement, si, au moment de l'émission du fond diffus cosmologique, une onde gravitationnelle était en train de comprimer une région de plasma en l'éloignant de nous, le rayonnement issu de cette région est décalé vers les plus grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge (voir la figure 5) : la température y est inférieure. En relevant les points chauds et froids du fond diffus cosmologique, les astronomes découvriront peut-être la signature laissée par les ondes gravitationnelles issues de l'inflation. L'Univers entier deviendrait une sorte de détecteur géant d'ondes gravitationnelles.

Malheureusement, l'Univers n'est pas un endroit simple. Comme nous

Chasseurs d'ondes

Selon la théorie, les ondes gravitationnelles issues de l'inflation ne seraient pas les seules à parcourir l'Univers. Plusieurs phénomènes astrophysiques, tels les étoiles binaires, les étoiles à neutrons qui coalescent ou encore des trous noirs qui entrent en collision, émettent aussi des ondes gravitationnelles de forte amplitude. La relativité générale prévoit que ce type d'ondes est produit par tous les systèmes physiques dont les mouvements internes n'ont pas une symétrie sphérique. Contrairement à une étoile isolée, deux étoiles en rotation l'une autour de l'autre produisent de telles ondes.

L'atténuation de ces ondes lors de leur propagation rend leur détection difficile. Bien que la coalescence de deux étoiles à neutrons ou la collision de deux trous noirs figurent parmi les cataclysmes les plus violents de l'Univers, les ondes gravitationnelles émises lors de ces événements sont à peine perceptibles quand elles nous parviennent après avoir parcouru des centaines de millions d'années-lumière. Prenons un exemple : celui de la collision de deux trous noirs situés à un milliard d'années-lumière. Les calculs montrent que l'onde gravitationnelle issue de cette collision modifierait la distance entre deux masses libres de se mouvoir de un millimètre si elles étaient séparées de un million de milliards de kilomètres (10^{-21}).

Pour mesurer d'aussi infimes oscillations, les physiciens ont construit l'Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*). Construit sur deux sites, l'un à Livingston, en Louisiane, l'autre à Hanford, dans l'État de Washington (voir les photographies ci-contre).

Sur chaque site, deux tuyaux longs de quatre kilomètres se joignent à angle droit pour former un L gigantesque. Dans chacun d'eux, des faisceaux laser se réfléchissent entre des miroirs de haute qualité. En réglant les différents paramètres pour que les lasers interfèrent, les physiciens devraient mettre en évidence des variations de la distance qui sépare les miroirs de l'ordre de 10^{-17} centimètre, environ le milliardième du diamètre de l'atome d'hydrogène ! Les résultats obtenus simultanément à Livingston et à Hanford seront comparés de façon à ce que les signaux qui pourraient être confondus avec des ondes gravitationnelles soient éliminées (par exemple, une activité sismique, des ondes acoustiques, les instabilités du laser).

D'autres physiciens construisent des détecteurs plus petits, prévus pour fonctionner de concert avec LIGO : TAMA près de Tokyo, Virgo près de Pise et GEO près de Hanovre. Ils permettront de repérer la source d'éventuels émetteurs d'ondes gravitationnelles par la méthode de triangulation. La NASA et l'Agence spatiale européenne mènent aussi un projet commun pour détecter les ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde. Elles prévoient d'envoyer dans l'espace l'interféromètre spatial LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) vers 2010. Ce détecteur sera constitué de trois satellites identiques placés aux sommets d'un triangle 0, entre lesquels un faisceau laser parcourra cinq millions de kilomètres. Malheureusement, aucun de ces instruments ne sera assez sensible pour détecter les ondes gravitationnelles produites par l'inflation. Seul le fond diffus cosmologique pourrait nous les révéler.



LIVINGSTON, LA.

Alex Desselle, Skyview Technologies



HANFORD, WASH.

G. White

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.

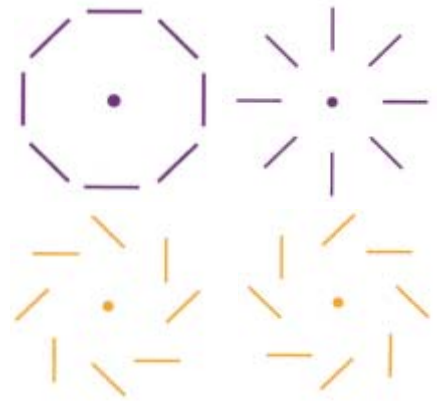
On devrait pouvoir détecter les ondes gravitationnelles dues à l'inflation, car les mouvements du plasma dus aux ondes gravitationnelles ont donné des motifs de polarisation différents de ceux que créent des fluctuations de la densité massique. La raison en est simple. Représentons par de petits segments 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