

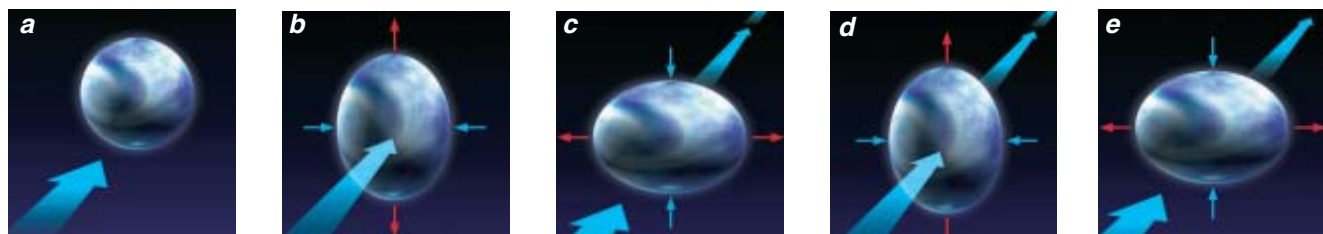
ultérieurement par un autre mécanisme, l'intensité des ondes gravitationnelles serait moindre.

Depuis qu'elles ont été produites une fraction de seconde après le Big Bang, les ondes gravitationnelles de l'inflation se propagent dans l'Univers. Comment les astronomes peuvent-ils les observer? Rappelons d'abord comment un récepteur reçoit un signal radio. Les ondes radio, constituées de l'association d'un champ magnétique et d'un champ électrique oscillants, font osciller les électrons de l'antenne du récepteur. Ce mouvement produit un courant électrique que le récepteur enregistre. De même, une onde gravitationnelle déforme l'espace qu'elle traverse, lui faisant subir des compressions et des étirements oscillants. De telles oscillations devraient entraîner de petits déplacements

de masses que l'on arrangerait habilement pour qu'elles «flottent» librement. Dès la fin des années 1950, le physicien Hermann Bondi, à Londres, tenta de convaincre ses collègues sceptiques de la réalité des ondes gravitationnelles en concevant le premier détecteur d'ondes gravitationnelles. Ce dispositif conceptuel était constitué d'une paire d'anneaux à cheval sur une tige rigide. Traversant ce système, une onde gravitationnelle d'amplitude h et de fréquence f contracterait la distance L qui sépare les anneaux d'un facteur $h \times L$, à la fréquence f . La quantité de chaleur libérée par le frottement des anneaux sur la tige prouverait que les ondes gravitationnelles véhiculent de l'énergie.

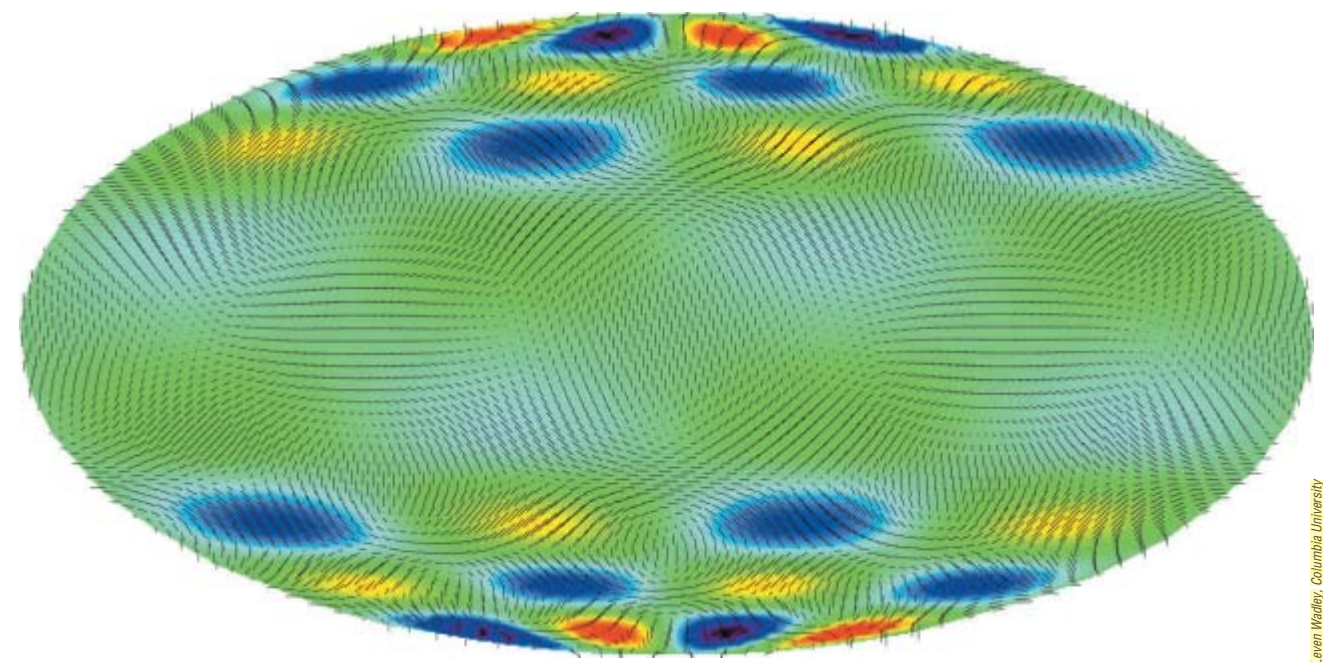
Le système idéal de Bondi n'a jamais conduit à la découverte des ondes gravitationnelles. Aujourd'hui, les astro-

physiciens construisent des détecteurs d'ondes gravitationnelles toujours plus élaborés; ils mesurent les déplacements minuscules de masses suspendues à l'aide de lasers (voir l'encadré de la page 40). Notons que la distance entre ces masses détermine le domaine des longueurs d'onde que le système peut détecter. Ainsi, dans le plus grand des détecteurs au sol, les masses sont séparées de quatre kilomètres, ce qui autoriserait la détection des oscillations dues à des ondes gravitationnelles dont la longueur d'onde serait comprise entre 30 et 30 000 kilomètres. Un dispositif spatial capable de détecter des longueurs d'onde 1 000 fois plus grandes est à l'étude. Les longueurs des ondes gravitationnelles résultant de la coalescence d'étoiles à neutrons ou de la collision de trous noirs sont situées dans cet intervalle et pourraient donc être



3. LES ONDES GRAVITATIONNELLES n'ont jamais été observées, mais la théorie prédit qu'elles étirent et compriment l'espace qu'elles parcourent. Ainsi, une onde gravitationnelle qui traverse une masse sphérique (a), l'étire d'abord dans une certaine direction avant de la comprimer dans la direction perpendiculaire (b). Puis, les deux effets s'inversent (c), de sorte que la

surface de la masse oscille à la fréquence de l'onde (d et e). Les distorsions représentées ci-dessus sont très exagérées; les ondes gravitationnelles sont trop faibles pour produire des effets directs mesurables. Les physiciens tentent donc d'observer les traces qu'elles auraient laissées dans le fond diffus cosmologique (ci-dessous).



4. LES ONDES GRAVITATIONNELLES DE L'INFLATION ont peut-être laissé leurs empreintes dans le fond diffus cosmologique. Cette carte de la sphère céleste simule les variations de la température et de la polarisation du fond diffus cosmologique micro-onde, qui résulteraient

de microperturbations au sein du plasma primordial. Les taches rouges et bleues représentent des régions plus chaudes et plus froides du fond diffus cosmologique micro-onde; les petits segments représentent l'orientation de la polarisation du fond diffus cosmologique sur le plan du ciel.

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