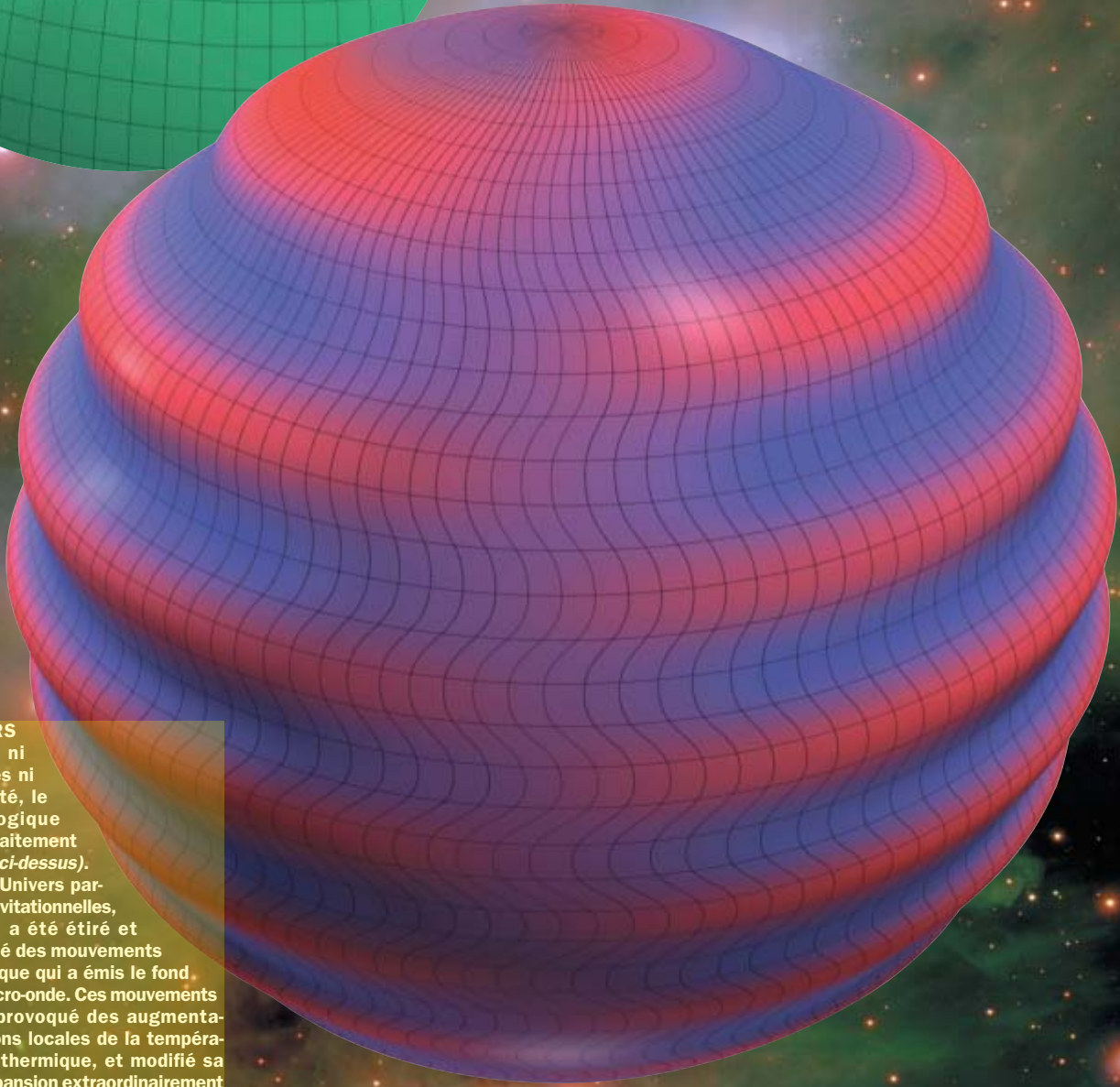
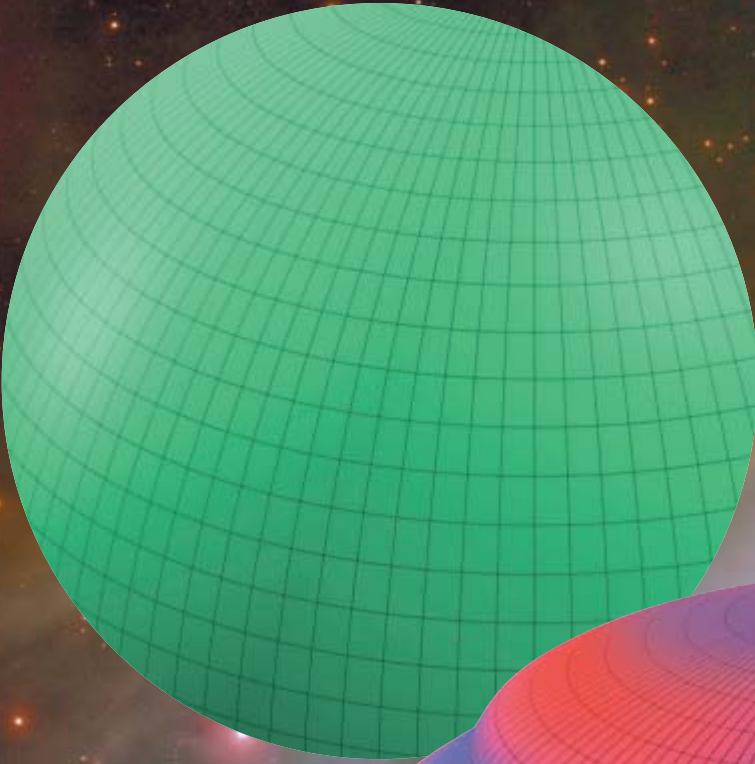




1. DANS UN UNIVERS LISSE, ne contenant ni ondes gravitationnelles ni fluctuations de densité, le fond diffus cosmologique micro-onde serait parfaitement uniforme (*sphère verte ci-dessus*). En revanche, dans un Univers parcouru par des ondes gravitationnelles, le plasma primordial a été étiré et comprimé, ce qui a créé des mouvements dans la surface sphérique qui a émis le fond diffus cosmologique micro-onde. Ces mouvements auraient à leur tour provoqué des augmentations ou des diminutions locales de la température du rayonnement thermique, et modifié sa polarisation. C'est l'expansion extraordinairement rapide de l'Univers, juste après le Big Bang, qui serait à l'origine des ondes gravitationnelles. Ci-dessus, on a simulé les effets d'une onde gravitationnelle qui se propage d'un pôle à l'autre, avec une longueur égale au quart du rayon de cette sphère (*sphère rouge ci-dessus*).

soupe des particules subatomiques. C'est pourquoi les astronomes ne peuvent observer de signal électromagnétique antérieur au fond diffus cosmologique. Or la théorie de l'inflation prévoit que la brusque expansion de l'Univers, qui aurait eu lieu 10^{-38} seconde après le Big Bang, a produit des ondes gravitationnelles qui, elles, pouvaient traverser le plasma. Si c'est exact, ces ondes se sont propagées dans l'Univers primordial et, 500 000 ans plus tard, ont laissé, dans le fond diffus cosmologique, d'infimes perturbations observables aujourd'hui (voir la figure 2).

Ondes et inflation

Pour comprendre comment l'inflation a produit des ondes gravitationnelles, penchons-nous sur l'une des conséquences fascinantes de la mécanique

quantique : le vide n'est pas totalement vide. Des paires virtuelles constituées d'une particule et d'une antiparticule y sont créées et annihilées en permanence. Selon le principe d'incertitude de Heisenberg, une paire peut naître du vide avec une énergie ΔE et persister pendant une durée Δt , pourvu que $\Delta E \cdot \Delta t$ soit inférieur à $\hbar/2$, où $\hbar$ est la constante de Planck réduite.

Le graviton, la particule quantique associée aux ondes gravitationnelles (l'analogie du photon des ondes électromagnétiques), est aussi soumis à ce principe. Des paires de gravitons virtuels jaillissent en permanence du vide avant de disparaître. L'expansion de l'Univers a été si rapide pendant la phase d'inflation que des paires de gravitons ont été séparées avant de s'être annihilées. Des particules virtuelles sont ainsi devenues des particules réelles. L'expansion ultra-rapide de l'Univers

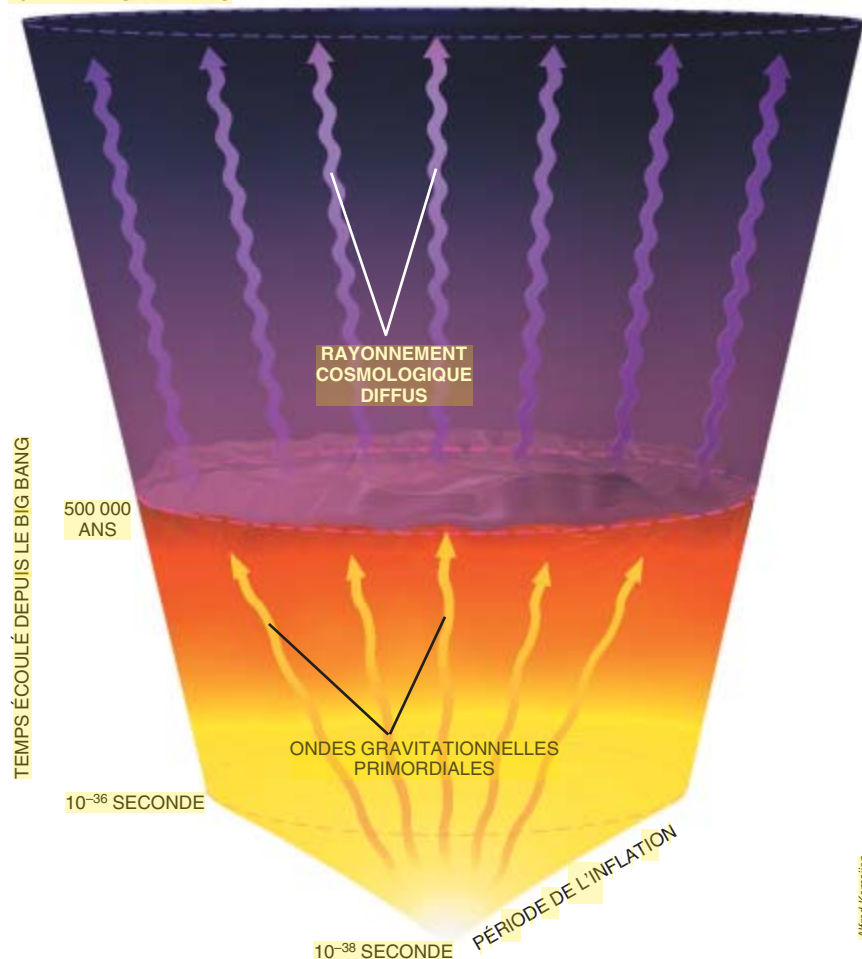
a aussi modifié les longueurs d'onde associées à ces gravitons, les faisant passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Ainsi, l'inflation aurait pompé de l'énergie dans le vide pour produire des gravitons et créé de la sorte tout un spectre d'ondes gravitationnelles caractéristiques de l'état de l'Univers, juste après le Big Bang. Si les ondes gravitationnelles dues à l'inflation existent, elles sont la relique la plus ancienne de l'Univers primordial : elles auraient 500 000 ans de plus que le fond diffus cosmologique !

Alors que les longueurs d'onde du rayonnement cosmologique sont confinées dans un petit intervalle – entre un et cinq millimètres, avec un maximum vers deux millimètres – celles des gravitons issus de l'inflation couvrent un vaste domaine, entre un centimètre et 10^{23} kilomètres, la taille de l'Univers observable aujourd'hui ! Selon la théorie de l'inflation, les ondes gravitationnelles les plus intenses ont les plus grandes longueurs d'onde, et leur intensité dépend du taux d'expansion de l'Univers inflationniste. Ce taux est proportionnel à l'énergie mise en jeu pendant l'inflation, elle-même déterminée par la température de l'Univers au début de l'inflation. Ainsi, l'intensité des ondes gravitationnelles dépend du moment où l'inflation a commencé.

10⁻³⁸ seconde après le Big Bang

Malheureusement, les cosmologistes ne connaissent pas avec précision cet instant, car ils ignorent ce qui a déclenché l'inflation. Pour certains théoriciens, elle aurait commencé quand trois des interactions fondamentales – l'interaction forte, l'interaction faible et l'interaction électromagnétique – se sont dissociées, peu après la naissance de l'Univers. Unifiées au tout début de l'Univers, ces trois « forces » se seraient différenciées quelque 10^{-38} seconde après le Big Bang, événement à l'origine de l'expansion. Si cette théorie est correcte, l'échelle d'énergie associée à l'inflation aurait été de l'ordre de 10^{15} à 10^{16} gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt est l'énergie qu'un proton acquiert quand il est accéléré sous une différence de potentiel de un milliard de volts). Les plus gros accélérateurs atteignent actuellement des énergies de 10^3 gigaélectronvolts). En revanche, si l'inflation a été déclenchée

15 MILLIARDS D'ANNÉES



2. LES MÉCANISMES QUANTIQUES qui se sont produits durant la phase d'inflation – une expansion explosive de l'Univers qui a eu lieu juste après le Big Bang – ont engendré tout un spectre d'ondes gravitationnelles. Ces dernières se sont propagées quelque 500 000 ans dans le plasma primordial jusqu'à l'émission du fond diffus cosmologique, qu'elles ont distordu. Les astrophysiciens espèrent détecter ces distorsions dans le fond diffus cosmologique d'aujourd'hui.

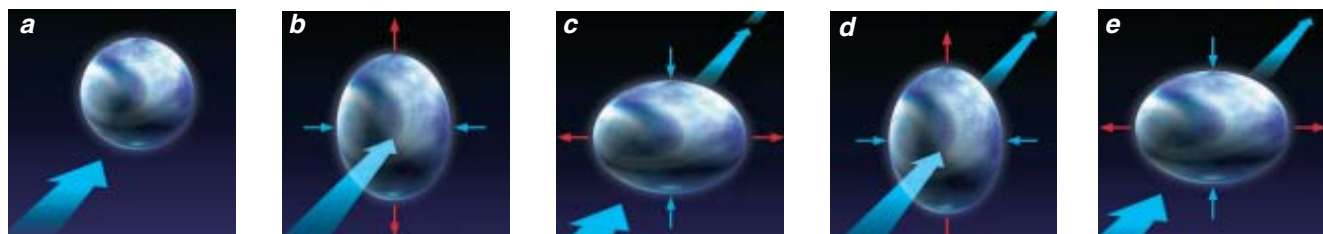
ultérieurement par un autre mécanisme, l'intensité des ondes gravitationnelles serait moindre.

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.

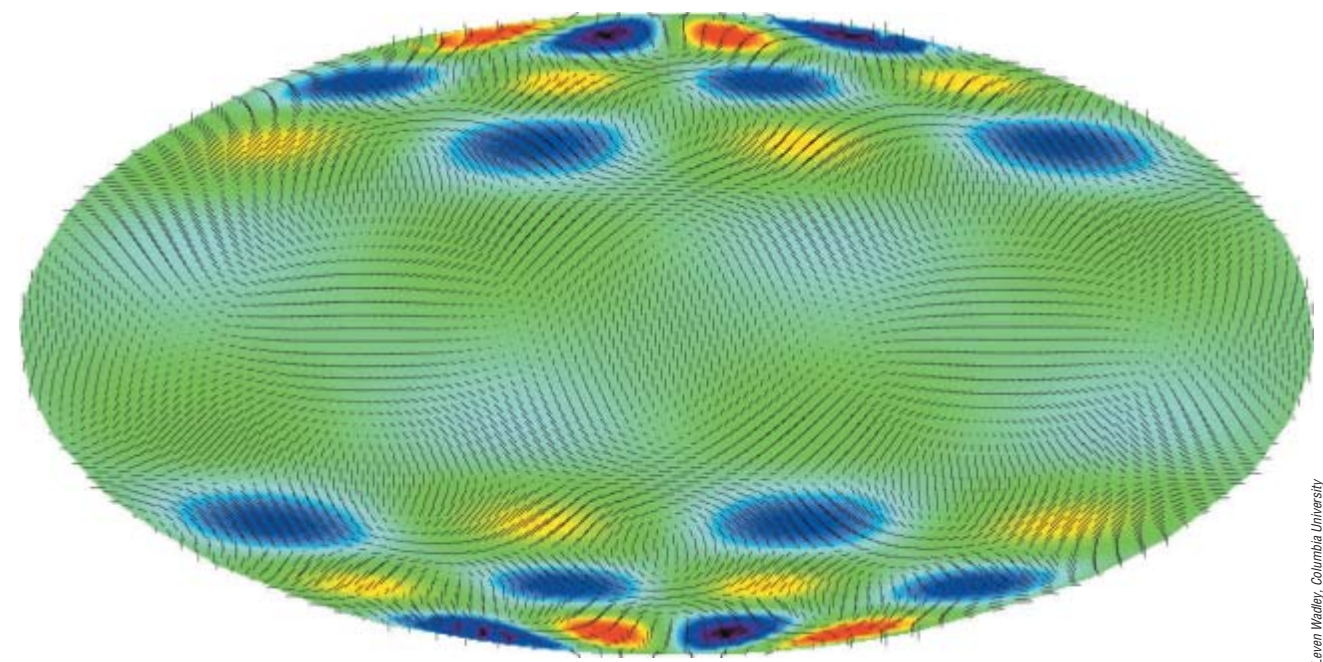
Le système idéal de Bondi n'a jamais conduit à la découverte des ondes gravitationnelles. Aujourd'hui, les astro-

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 distortions 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.