

équidistantes. En 1953, K. Roth a calculé le nombre maximal de billes que l'on peut poser avec une densité  $\delta$ , de façon qu'aucun triplet prélevé au hasard ne soit composé de billes équidistantes. Ce nombre est très élevé ; les enfants joueront quelques semaines en posant une bille par seconde !

T. Gowers a calculé récemment le nombre limite de billes qui ne contient pas quatre billes équidistantes, en fonction de la densité  $\delta$ . L'intérêt de sa méthode réside dans son application possible pour des groupes de billes plus importants. Le calcul du nombre limite de billes ne contenant pas de groupe de plus de quatre billes est aujourd'hui en cours de vérification.

Laissons les billes aux enfants. Ces résultats intéressent les mathématiciens

lorsque la ligne de jeu est remplacée par l'ensemble des entiers naturels et les billes par des entiers. Des billes équidistantes signifient alors des nombres successifs d'une suite arithmétique où l'on calcule un terme en ajoutant une constante au précédent (par exemple, la suite 4, 9, 14, 19, 24,...). Le résultat de T. Gowers indique que dans la suite des entiers de 1 à  $N$  où  $N$  est supérieur à la limite calculée, chaque sous-ensemble de  $\delta N$  nombres contient au minimum une suite arithmétique de quatre termes. Anodin en apparence, ce résultat est le premier pas dans la résolution d'un problème soulevé par P. Erdős : l'ensemble des nombres premiers (divisibles uniquement par 1 ou par eux-mêmes) contient-il des suites arithmétiques de longueur quelconque ?

## Nouveau regard sur des fards

*Il y a 4 000 ans, les Égyptiens synthétisaient des cosmétiques à usage thérapeutique.*

**U**n trait de maquillage noir qui souligne et allonge l'œil : la fréquence de cette caractéristique sur les portraits peints et sculptés dans l'Égypte ancienne y témoigne de l'importance du maquillage. Des tombes ont effectivement livré des coffrets de toilette qui contenaient, outre des miroirs, des épingles à cheveux et des stylets, des récipients encore remplis de poudres colorées. Les Égyptiens se maquillaient avec des fards verts, blancs, gris ou noirs, mélanges de minéraux colorés et de matières grasses. Outre des préoccupations esthétiques, ces produits avaient des fonctions thérapeutiques, qui motivaient des procédés de fabrication longs et complexes.

Le Musée du Louvre conserve, dans ses collections égyptiennes, de nombreux flacons à fard, en pierre, de roseau ou en bois, qui pouvaient contenir 50 à 100 grammes de poudre. Notre équipe, en collaboration avec la Source européenne de rayonnement synchrotron (ESRF) à Grenoble, a caractérisé les constituants des poudres cosmétiques noires contenues dans 49 de ces flacons, datés de 2000 à 1200 avant notre ère.

La microscopie électronique et la diffraction des rayons X révèlent que la couleur noire est due à la présence de galène (sulfure de plomb). La teinte est parfois éclaircie par de la cérusite, carbonate de plomb blanc.

La plupart des produits analysés contiennent aussi en abondance deux chlorures de plomb, la laurionite et la phosgénite. Ces minéraux ont été introduits intentionnellement par les fabricants : le bon état de conservation des poudres exclue une formation par des phénomènes d'altération lors du vieillissement des produits. Par ailleurs, ils ont été synthétisés : leur rareté naturelle aurait empêché les Égyptiens de les inclure dans des cosmétiques pendant plusieurs siècles comme ils l'ont fait. Enfin, la présence de laurionite et de phosgénite n'a certainement pas de motivations esthétiques : ces minéraux sont blancs et ils sont la plupart du temps associés à la cérusite, blanche aussi et beaucoup plus facile à se procurer. Les Égyptiens les ont-ils donc synthétisés pour conférer aux fards des propriétés particulières ?

Cette présomption est renforcée à la lecture de recettes de produits médicaux, décrites par Dioscoride et Pline l'Ancien au I<sup>er</sup> siècle de notre ère. Ils décrivent, en particulier, comment l'«écume d'argent purifiée» (l'oxyde de plomb) était broyée et mélangée dans de l'eau avec du sel gemme et parfois du natron (des carbonates de sodium principalement), puis filtrée ; la procédure était répétée chaque jour pendant plusieurs semaines. Lorsque nous avons suivi ce mode opératoire et mélangé de l'oxyde de plomb et du chlorure de sodium dans de l'eau, une lente réaction a produit une solution basique que les remplacements quotidiens d'eau ont régulièrement neutralisée. Nous avons ainsi obtenu une très fine poudre de laurionite blanche. En présence de carbonates, on obtient, avec le même procédé, de la phosgénite. La préparation de tels composés par voie aqueuse met en jeu des réactions



C2RM/ID. VIGÉARS-T. BOREL

La poudre noire, visible sur le bord intérieur de ce flacon de quelques centimètres de diamètre en albâtre, du Nouvel-Empire égyptien (environ 1500 avant notre ère), et sur le couvercle, est un cosmétique à base de galène (sulfure de plomb). Il contient aussi des chlorures de plomb, obtenus par synthèse chimique. Sur la radiographie (à gauche), les zones claires correspondent aux composés de plomb, qui absorbent fortement les rayons X. Ces cosmétiques avaient une fonction esthétique, mais ils servaient aussi à protéger l'œil contre des maladies.

chimiques assez simples mais un procédé long et répétitif sans doute élaboré après de nombreux tâtonnements.

Au 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, ces produits servaient à soigner des maladies des yeux. Le médecin romain Celse préconisait ainsi un collyre qui mêlait de la gomme, de la galène, de la céruse et de l'«écume d'argent traitée». Il conseille aussi cette dernière pour des soins de la peau et des cheveux.

Ces vertus thérapeutiques étaient-elles déjà connues en Égypte 2 000 ans auparavant ? Le climat égyptien a été, et est toujours, cause de nombreuses infections oculaires, que le fard pouvait contribuer à prévenir ou à traiter. Des papyrus médicaux indiquent de nombreuses préparations pour soigner les yeux. Ainsi, le papyrus d'Ebers, daté d'environ 1550 avant notre ère, cite des traitements de maladies oculaires à base de galène, et d'autres matières minérales dont nous ne savons pas traduire les noms. Une tombe contemporaine de ce document a toutefois livré trois flacons en roseau, dont l'un portait l'inscription «vrai fard à paupière noir» et les deux autres «collyre à dis-

soudre, bon pour la vue». D'anciennes analyses chimiques ont montré que ces deux derniers contiennent un carbonate et un chlorure de plomb, sans doute la phosgénite.

La cohésion des fards était, comme aujourd'hui, assurée par un support gras, surtout d'origine animale. On distingue trois textures de fard, obtenues par des concentrations plus ou moins grandes de matières grasses. Certains échantillons n'en contiennent que des traces infimes, sans doute introduites involontairement lors de la préparation des produits minéraux. À l'inverse, les cinq à sept pour cent présents dans d'autres échantillons témoignent de la volonté d'ajouter un liant. On trouve enfin des cas intermédiaires, qui contiennent 0,1 à 0,5 pour cent de matières grasses. Ces trois catégories ressemblent étonnamment à celles que l'on trouve aujourd'hui dans les lignes de cosmétiques : les poudres libres, sans ou avec très peu de matières grasses, les fards à paupières et les crayons khôl, les plus gras.

Philippe WALTER, LRMF-CNRS-Culture  
René BRENIAX, Société L'Oréal



## Un ancêtre venu du froid

*La vie est-elle née dans un milieu tempéré?*

**A** la fin des années 1980, une équipe de généticiens américains a construit l'arbre généalogique des espèces vivantes. Les formes les plus primitives semblaient être des micro-organismes vivants dans des eaux chaudes (plus de 80 °C), et l'on en a déduit que la vie était apparue en milieu aquatique chaud, peut-être à proximité des failles volcaniques, au fond des océans. Cependant, Nicolas Galtier et Manolo Gouy, de l'Université de Lyon, et Nicolas Tourasse, de l'Université du Texas, ont montré que l'ancêtre des formes vivantes actuelles ne pouvait vivre dans un environnement chaud.

Ils ont comparé, parmi 40 espèces, la composition des acides ribonucléiques ribosomaux (ARNr), des molécules présentes chez tous les organismes vivants. Les ribosomes, qui participent à la synthèse des protéines, sont de petits éléments cellulaires, constitués de deux sous-unités composées de protéines et d'ARN. Ce dernier est une chaîne de molécules nommées bases azotées (adénine, uracile, guanine et cytosine), reliées par une trame d'acide phosphorique et d'un sucre, le ribose. Ces bases azotées s'apparient spécifiquement pour former deux types de paires de bases : adénine et uracile ; cytosine et guanine. Des appariements

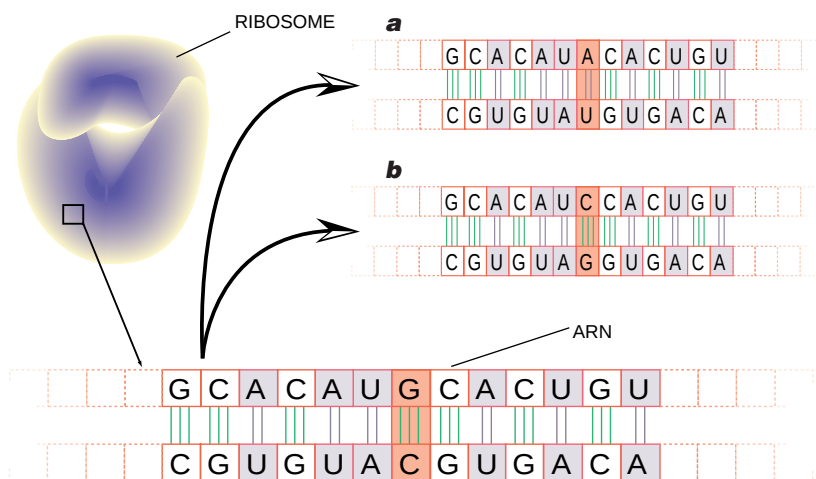
apparaissent au sein d'une même molécule d'ARN qui se replie et acquiert ainsi la structure tridimensionnelle indispensable à sa fonction.

La chaleur détruit l'activité des ARN en rompant les appariements de bases. Or, alors que l'adénine et l'uracile sont reliées par deux liaisons, la guanine et la cytosine le sont par trois : un ARN riche en paires guanine-cytosine est plus résistant qu'un ARN riche en paires adénine-uracile.

Les généticiens français ont tout d'abord calculé les proportions de guanine et de cytosine dans deux des trois ARN que contient un ribosome, chez des espèces telles que des bactéries vivant en milieu chaud, des bactéries moins résistantes à la chaleur, des plantes, des champignons, des animaux uni- et pluricellulaires.

Puis, N. Galtier, M. Gouy et N. Tourasse ont élaboré un modèle d'évolution des ARN ribosomaux. Ils ont quantifié les probabilités des différents remplacements d'une base par une autre et ont ainsi déterminé la proportion de guanine et de cytosine dans les ARN du plus récent ancêtre commun des formes qui vivent aujourd'hui. Selon leurs calculs, elle n'atteint que 54 pour cent, tandis que 60 pour cent sont nécessaires à la survie dans un milieu chaud : l'ancêtre commun vivait donc en milieu tempéré.

La résistance à la chaleur de certains organismes ne serait pas un caractère ancestral, mais plutôt une adaptation tardive à des conditions extrêmes. Aussi, si une chaleur importante semble avoir été nécessaire à l'apparition des premières molécules biologiques, le dernier ancêtre commun des espèces vivant aujourd'hui évoluait en milieu tempéré.



Un ribosome est composé de deux sous-unités, elles mêmes constituées de protéines et d'acide ribonucléique (ARN). Les bases azotées qui le composent s'apparient spécifiquement en deux types de paires de bases : adénine-uracile (A-U) reliées par deux liaisons ; et guanine-cytosine (C-G) reliées par trois. Plus les liaisons sont nombreuses, plus l'ARN résiste à la chaleur. Un ARN riche en paires G-C est plus résistant qu'un ARN riche en paires A-U. Au cours de l'évolution, certains changements de bases modifient la résistance des ARN à la chaleur (a), d'autres ne la changent pas (b).

The background of the page is a composite image. The top half features a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of orange, yellow, and red filaments against a dark blue background, representing the early universe's temperature variations. The bottom half shows a deep-space photograph of several spiral galaxies, with bright yellow cores and blue-tinted spiral arms, set against the blackness of space.

## Dossier

# La révolution cosmologique

**E**n mai 1998, lors d'une conférence sur l'énergie manquante de l'Univers, les cosmologistes votèrent : croyaient-ils ou non aux nouvelles observations d'explosions stellaires qui impliquaient – contrairement à toute attente – que l'expansion de l'Univers accélérât ? Bien que les astronomes sachent depuis les années 1920 que l'Univers est en expansion, les galaxies s'éloignant les unes des autres, ils supposaient que cette expansion ralentissait en raison de la nature attractive de la gravitation. Si l'expansion accélère, l'Univers doit être empli d'une forme inconnue de matière ou d'énergie qui a un effet répulsif, idée que les physiciens trouvaient... repoussante. Pourtant, sur les 60 cosmologistes présents à la conférence, 40 acceptent les nouvelles découvertes.

Depuis dix ans, les astronomes savent que leurs théories cosmologiques sont imparfaites. Quand on calcule la quantité totale de matière dans l'Univers, on trouve une quantité bien inférieure à celle qui est nécessaire pour ralentir l'expansion comme le prédisait la théorie de l'inflation, une explication élégante des premiers instants du Big Bang. Jusqu'à aujourd'hui, les indices à l'encontre de cette théorie n'avaient jamais été suffisants pour que les cosmologistes l'abandonnent. Toutefois, maintenant, les théoriciens admettent qu'il y a quelque chose qui « cloche ». L'expansion ne ralentit pas comme on le pensait. Soit les scientifiques doivent se réconcilier avec le concept d'énergie invisible, soit ils doivent modifier ou abandonner l'inflation.

Dans ce numéro, *Pour la Science* présente trois aspects de l'histoire. D'abord, les observateurs relatent comment et pourquoi leur travail sur les supernovae a déclenché un tel bouleversement. Un théoricien explique ensuite pourquoi ces observations impliquent l'existence d'une énergie éthérée qui remplirait le vide. Enfin, deux cosmologistes offrent une autre interprétation en prolongeant la théorie de l'inflation « avant » le Big Bang.



# Des supernovae pour sonder l'espace-temps

CRAIG HOGAN • ROBERT KIRSHNER • NICHOLAS SUNTZEFF

*L'analyse des explosions d'étoiles très lointaines indique que l'expansion de l'Univers accélère. Une forme d'énergie étrange semble être la cause de cette accélération.*

**I**l y a bien longtemps (environ cinq milliards d'années), dans une galaxie très lointaine (à environ sept milliards d'années-lumière), une étoile a explosé. Cette supernova brilla comme plus d'un milliard de soleils. Sa lumière voyagea dans l'espace, son intensité faiblissant avec la distance et sa longueur d'onde s'allongeant avec l'expansion cosmique. Une infime partie de cette lumière atteignit la Terre : dix minutes durant, au cours d'une sombre nuit de 1997, quelques centaines de photons de cette supernova heurtèrent le miroir d'un télescope, au Chili. Un ordinateur de l'observatoire reconstruisit alors une image numérique qui montra une minuscule tache de lumière. Cette tache, d'apparence pourtant insignifiante, était pour nous une vision stimulante : une nouvelle balise pour sonder l'espace et le temps.

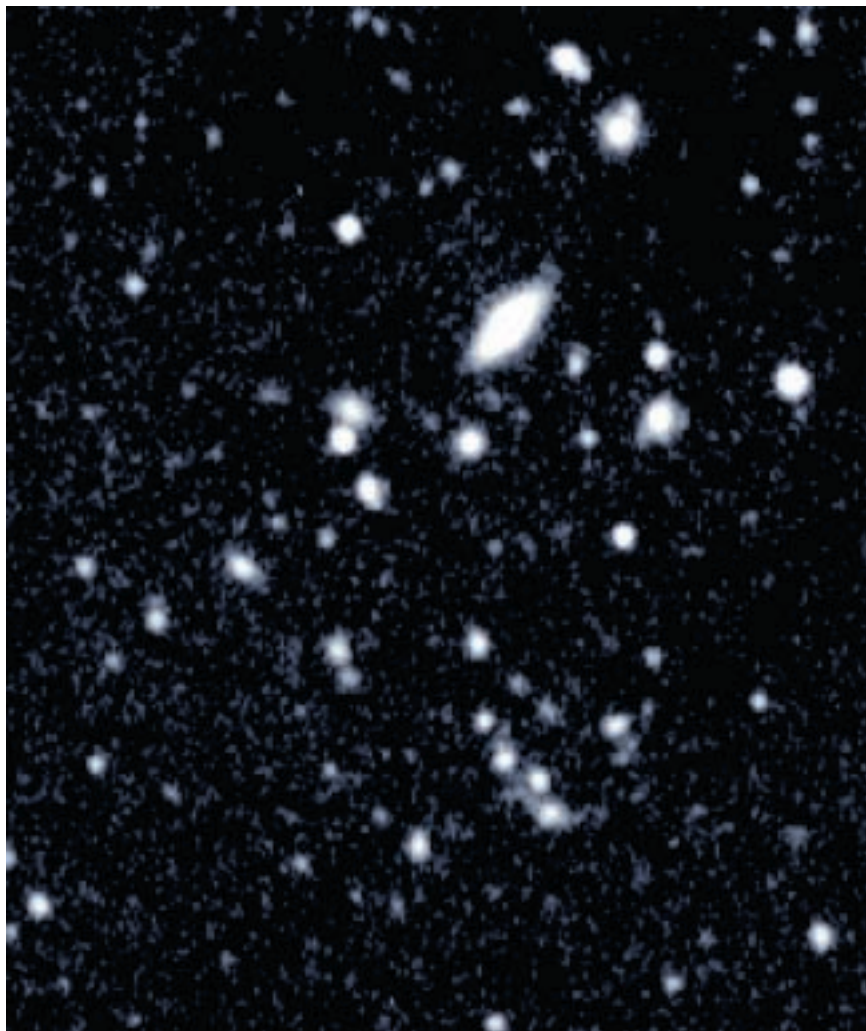
Avec des collègues du monde entier, nous avons traqué la lumière de plusieurs dizaines de supernovae et avons utilisé ces observations pour cartographier la forme globale de l'Univers et pour établir l'histoire de son expansion. Nos études chamboulent la vision classique de l'Univers :

**1. OÙ EST LA SUPERNOVA?** Cette paire d'images, réalisées à l'aide du télescope de quatre mètres de diamètre de l'Observatoire de Cerro Tololo, au Chili, révèle la première supernova lointaine découverte. Dans le cliché de droite, obtenu trois semaines après celui de gauche, la supernova modifie l'apparence de l'une des galaxies. Pouvez-vous la trouver? Certaines différences résultent de conditions atmosphériques différentes. La réponse est donnée sur la figure 2.

l'Univers serait plus vaste et plus vide qu'on ne le croyait depuis une dizaine d'années. En outre, son expansion ne ralentit pas autant que de nombreux cosmologistes l'avaient calculé. Peut-être même accélère-t-elle.

## L'expansion des galaxies

L'histoire de l'expansion cosmique intéresse beaucoup les astronomes, car elle reflète la géométrie de l'Univers et la nature de ses constituants – matière,



Peter Challinor, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics

lumière ou d'autres formes d'énergie. La théorie de la relativité générale relie ces propriétés fondamentales de l'Univers et décrit comment elles agissent sur le mouvement de la matière et sur la propagation de la lumière. Les prévisions astronomiques qui en résultent peuvent alors être confrontées aux observations.

Avant la publication de la théorie d'Albert Einstein, en 1916, et avant les premières observations de l'expansion cosmique, dans la décennie suivante, la plupart des astrophysiciens pensaient que l'Univers avait une taille constante. Même Einstein se méfia de ses équations lorsqu'il comprit qu'elles décrivaient un univers qui évoluait. Cependant les mesures des mouvements galactiques par Edwin Hubble et par d'autres ne laissèrent guère de doute : les galaxies faibles, parce que lointaines, s'éloignent de la Terre plus vite que les galaxies brillantes, proches ; ainsi, conformément aux équations de la relativité générale, l'Univers est en expansion, et les galaxies s'éloignent les unes des autres comme des taches

de peinture à la surface d'un ballon que l'on gonfle. Les astronomes ont déterminé les vitesses de récession des galaxies à partir du décalage des raies spectrales visibles vers des longueurs d'onde supérieures (le rougissement, ou décalage vers le rouge). Bien qu'il soit souvent attribué à l'effet Doppler, en vertu duquel une sirène qui s'approche paraît plus aiguë qu'une sirène qui s'éloigne, le rougissement cosmologique résulte de l'expansion de l'Univers, qui étire les longueurs d'onde de la lumière des galaxies. Le rayonnement des objets plus lointains, qui a voyagé plus longtemps, est plus décalé vers le rouge que le rayonnement des sources plus proches.

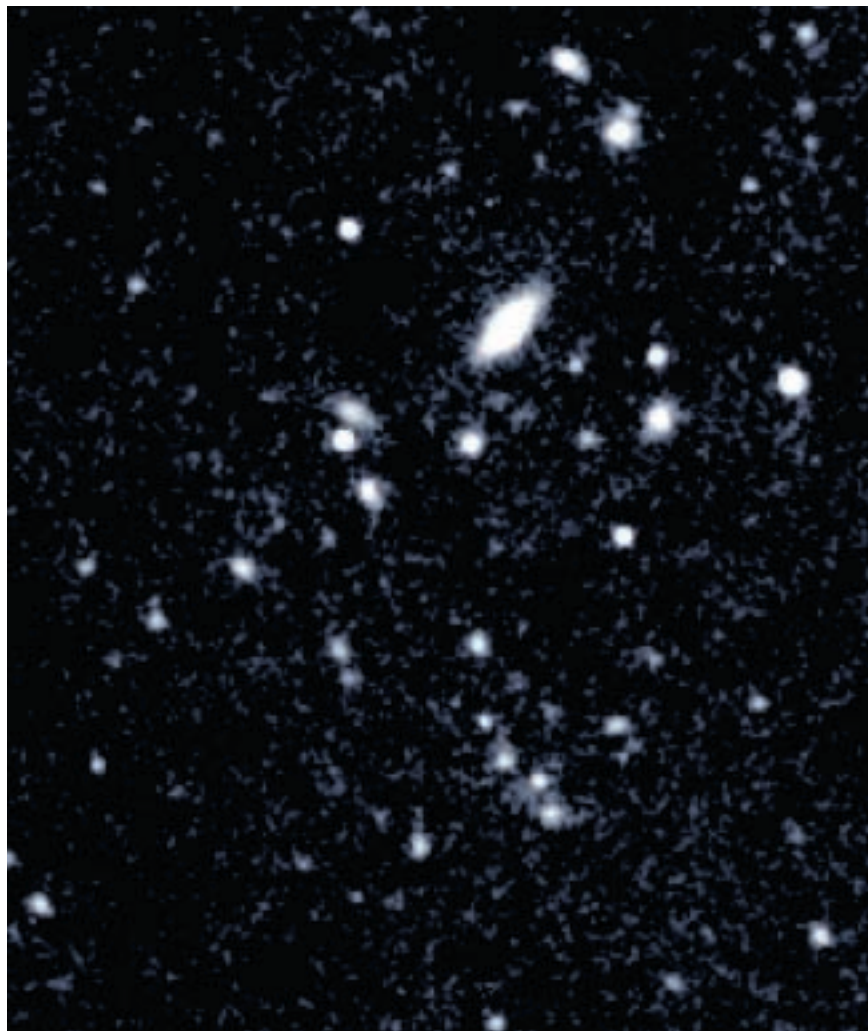
Dans les années 1930, à l'époque de Hubble, les spectromètres ne mesuraient le décalage vers le rouge que pour des galaxies brillantes. Or, pendant que la lumière de ces galaxies proches se propageait vers la Terre, l'Univers s'est très peu dilaté. Pour des changements aussi faibles, le décalage vers le rouge est proportionnel à la distance. Le

rapport de ces deux grandeurs est fixe : c'est la constante de Hubble, qui caractérise la vitesse actuelle d'expansion cosmique. Les astrophysiciens supposaient que, pour les galaxies plus lointaines, cette relation entre rougissement et distance serait modifiée, soit parce que la vitesse d'expansion a changé au cours du temps, soit parce que l'espace entre nous et ces galaxies est courbe. Ainsi, la mesure de cette modification était devenue l'un des grands objectifs de la cosmologie, mais il demeure difficile, car il requiert de déterminer les distances des galaxies extrêmement lointaines.

Pour estimer les distances des diverses galaxies, Hubble et les cosmologistes de son époque supposaient qu'elles ont toutes la même luminosité intrinsèque. Dans cette hypothèse, les galaxies les plus brillantes sont plus proches que celles qui apparaissent plus faibles. Toutefois, cette méthode a ses limites : la luminosité des galaxies est très variable ; de surcroît, pour les sources lointaines, la lumière met tant de temps à nous parvenir qu'elle dévoile des galaxies dans leur prime jeunesse, dont la luminosité intrinsèque pourrait être bien différente de celle de galaxies plus mûres, observées près de nous. Comme il est difficile de démêler ces modifications évolutives des effets de l'expansion, les astronomes ont longtemps cherché d'autres «chandelles de référence», des objets dont la luminosité intrinsèque serait la même, que ces objets soient proches ou lointains.

Pour être visibles à des milliards d'années-lumière de distance, ces balises doivent être très brillantes. Au début des années 1970, certains cosmologistes tentèrent d'utiliser les quasars, des sources extrêmement énergiques (probablement alimentées par des trous noirs qui avalent des étoiles et du gaz). Malheureusement, les quasars se révélèrent encore plus variés que les galaxies, et donc peu utiles pour l'arpentage de l'Univers.

Vers la même époque, d'autres astronomes commencèrent à utiliser des supernovae – des étoiles qui explosent – comme jalons pour les études cosmologiques. Cette approche fut d'abord controversée, car les supernovae étaient, aussi, très diverses. Toutefois, au cours des dix dernières années, les astronomes ont déterminé avec précision la luminosité intrinsèque d'un type de supernovae particulier, les supernovae de type Ia.



## La mort d'une étoile

Une supernova de type Ia est l'explosion d'une étoile, c'est-à-dire une bombe thermonucléaire naturelle. L'étoile qui explose commence son existence sous la forme d'une sphère d'hydrogène, en équilibre. L'effondrement gravitationnel initial chauffe et comprime le gaz, ce qui déclenche des réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium, en carbone, en oxygène, en néon, et en d'autres éléments. L'énergie dégagée provoque l'agitation des atomes, ce qui équilibre la gravitation. Toutefois, lorsque le combustible nucléaire s'épuise, la pression devient insuffisante pour maintenir l'équilibre, et l'étoile s'effondre sur elle-même jusqu'à ce que son volume soit seulement de la taille de la Terre et sa densité un million de fois celle de la matière ordinaire. L'étoile est devenue une naine blanche.

La plupart de ces naines blanches se refroidissent et s'éteignent ainsi sans

briller. Toutefois, celles qui sont dans un système binaire (deux étoiles liées par la gravitation) peuvent aspirer la matière de leur compagne et devenir si denses qu'elles s'effondrent brusquement. La chaleur qui en résulte déclenche une explosion thermonucléaire qui détruit complètement la naine blanche, éjectant sa matière à des vitesses qui atteignent 10 000 kilomètres par seconde. La lueur de cette boule de feu en expansion met environ trois semaines pour atteindre son éclat maximum, puis décline plusieurs mois durant.

Les supernovae ont des luminosités variées, mais les explosions plus brillantes durent généralement plus longtemps que les plus faibles. Ainsi, en surveillant leur durée, les astronomes corrigent les différences et déterminent leur luminosité intrinsèque à 12 pour cent près. Au cours des dix dernières années, grâce aux études des supernovae de type Ia proches à l'aide de détecteurs modernes, ces éclairs sont

devenus les «chandelles de référence» les mieux étalonnées du ciel.

Ces explosions stellaires sont des événements rares dans les galaxies : il s'en produit un tous les 300 ans environ. Toutefois, l'Univers contient tant de galaxies que des supernovae suffisamment brillantes pour faire l'objet d'une étude explosent toutes les quelques secondes, quelque part dans le ciel. Il suffit donc aux astronomes de les trouver et de les étudier soigneusement. Depuis quelques années, deux groupes rivalisent d'effort : d'une part, notre groupe, surnommé le Groupe à grand  $z$  ( $z$  caractérise le décalage vers le rouge), a été créé en 1995 par Brian Schmidt, des observatoires australiens du mont Stromlo et de Siding Springs ; l'autre groupe, nommé Projet cosmologie et supernovae, lancé en 1988, est dirigé par Saul Perlmutter, du Laboratoire Lawrence Berkeley (voir l'encadré ci-contre).

Bien que les deux équipes soient indépendantes, elles profitent des mêmes progrès fondamentaux, essentiellement le déploiement de grands détecteurs de lumière sur des télescopes géants. Grâce à ces progrès, les astronomes produisent des images numériques d'objets faibles sur une grande partie du ciel, ce qui facilite l'analyse ultérieure. Ainsi, une caméra construite par l'Université du Michigan et par la Société *Lucent* a été placée au foyer du télescope de quatre mètres de diamètre de l'Observatoire de Cerro Tololo, au Chili ; une seule exposition de dix minutes produit une image qui couvre une surface égale à celle de la Lune et qui contient 5 000 galaxies.

Pour repérer les supernovae lointaines, il suffit donc de prendre des images de la même zone du ciel à quelques semaines d'intervalle et de rechercher, dans les galaxies lointaines, des différences de luminosité. Comme les détecteurs de lumière enregistrent avec précision le nombre de photons ayant atteint chaque élément d'image, une simple soustraction des deux images indique les différences. Quand tout se passe bien, la soustraction conduit à une image noire (au bruit près), où les seuls signaux intenses correspondent à des objets nouveaux ou variables, telles les étoiles variables, les quasars, les astéroïdes et, dans certains cas, des supernovae.

Les programmes informatiques enregistrent la position des nouveaux objets et tentent d'identifier ceux qui

## Des supernovae pour la cosmologie

Entré dans la course aux grands décalages vers le rouge dès la fin des années 1980, le Projet cosmologie et supernovae a découvert, à ce jour, près d'une centaine de supernovae lointaines. Exploit remarquable si l'on rappelle qu'avant 1992 seulement une supernova lointaine avait été découverte. La découverte la plus spectaculaire eut lieu en octobre 1998 avec le télescope Keck de huit mètres de diamètre, situé à Hawaii. Pour la première fois, une supernova ayant un décalage vers le rouge supérieur à un était détectée. Autrement dit, cette supernova a explosé il y a dix milliards d'années, bien longtemps avant que notre Soleil ne se mette à briller !

Le Projet supernovae et cosmologie est une collaboration internationale d'une trentaine de physiciens et d'astronomes, qui mettent en communs leurs efforts et leurs moyens d'observation les plus performants pour détecter ces supernovae et en déduire la valeur des paramètres cosmologiques. En France, une douzaine de physiciens et d'astronomes du Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies (LPNHE) à Paris, de l'Ob-

servatoire de Meudon et d'autres institutions y participent.

De même que le Groupe à grand  $z$ , dont les résultats sont relatés dans l'article, le Groupe supernovae pour la cosmologie a annoncé durant l'été 1998 l'analyse de 42 supernovae à grand décalage vers le rouge. Si le nombre de supernovae diffère, les conclusions sont très semblables. D'abord, l'expansion de l'Univers serait infinie : l'Univers ne se recontractera jamais. Ensuite, et ceci est assurément spectaculaire, cette expansion serait, dans la période actuelle, en phase d'accélération et ce depuis environ quatre milliards d'années !

Ces résultats devront être confirmés et la recherche systématique de supernovae à grand décalage vers le rouge se poursuit activement. Pour ce faire, l'équipe française propose de combiner l'utilisation du télescope Canada-France-Hawaii pour la détection des supernovae et un suivi sur le télescope Keck et sur le Très grand télescope européen (VLT), récemment mis en service au Chili. Le mystère des paramètres cosmologiques sera-t-il bientôt résolu ?

Reynald PAIN, LPNHE, Paris

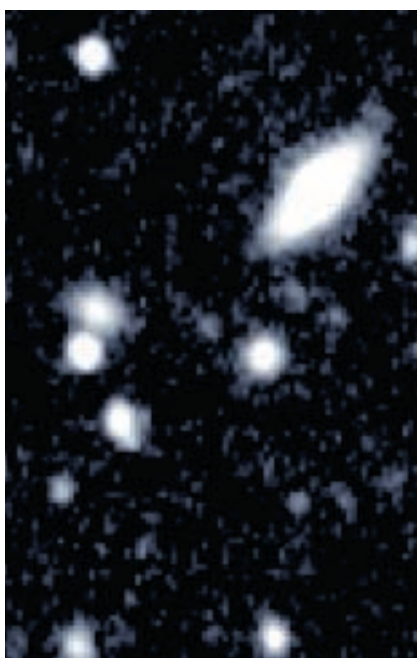
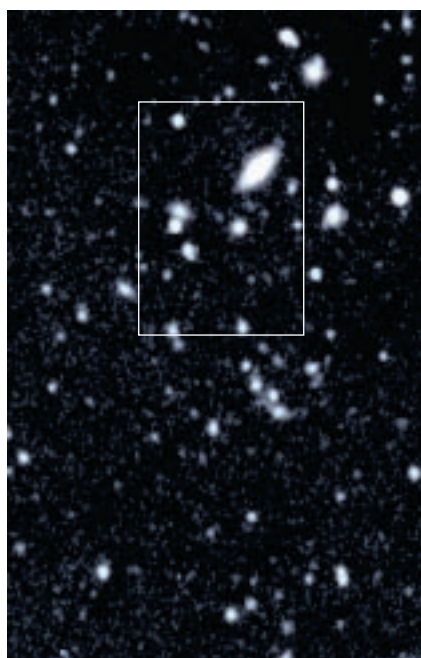
sont réellement des supernovae, mais les tests automatisés demeurent imparfaits, et nous devons scruter les images à l'œil nu pour décider quelles supernovae putatives sont réelles. Pour suivre l'évolution de la courbe de lumière de la supernova avant qu'elle ne devienne trop faible, l'analyse doit être effectuée rapidement. Pendant ces périodes harassantes, l'observatoire est un bain où astronomes et étudiants travaillent 24 heures sur 24 pendant plusieurs jours consécutifs, soutenus par l'enthousiasme et les pizzas chiliennes.

Ensuite, nous visons les meilleures supernovae présumées avec de grands télescopes, dont les télescopes Keck de huit mètres de diamètres, à Hawaï. Ces observations cruciales confirment si les objets proposés sont des supernovae de type Ia. À l'aide de ces observations, on mesure également l'éclat intrinsèque et le décalage vers le rouge.

### Du côté sombre

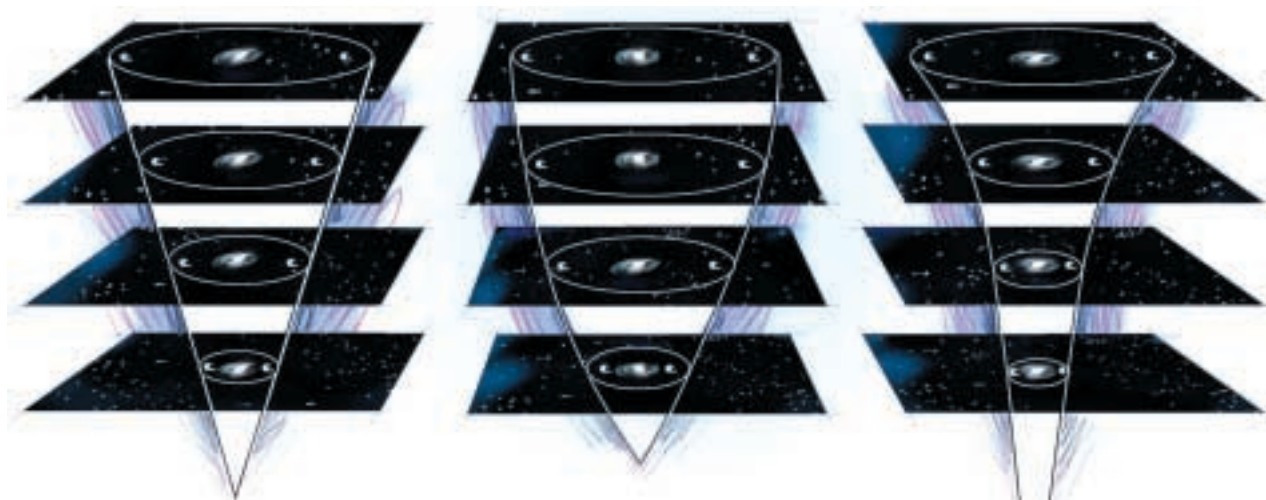
D'autres membres de notre groupe, travaillant avec des télescopes en Australie, au Chili et aux États-Unis, ont

également suivi ces supernovae pour déterminer comment leur luminosité passe par un maximum, puis décline. La campagne d'observation pour une seule supernova dure plusieurs mois, et l'analyse finale doit souvent attendre un an ou plus, quand la lumière de la supernova a presque disparu, pour obtenir une bonne image de la galaxie qui abritait la supernova. Nous utilisons ce cliché final pour soustraire l'éclat de la galaxie des images de la supernova. Nos meilleures mesures proviennent du télescope spatial Hubble, qui saisit des détails si fins que



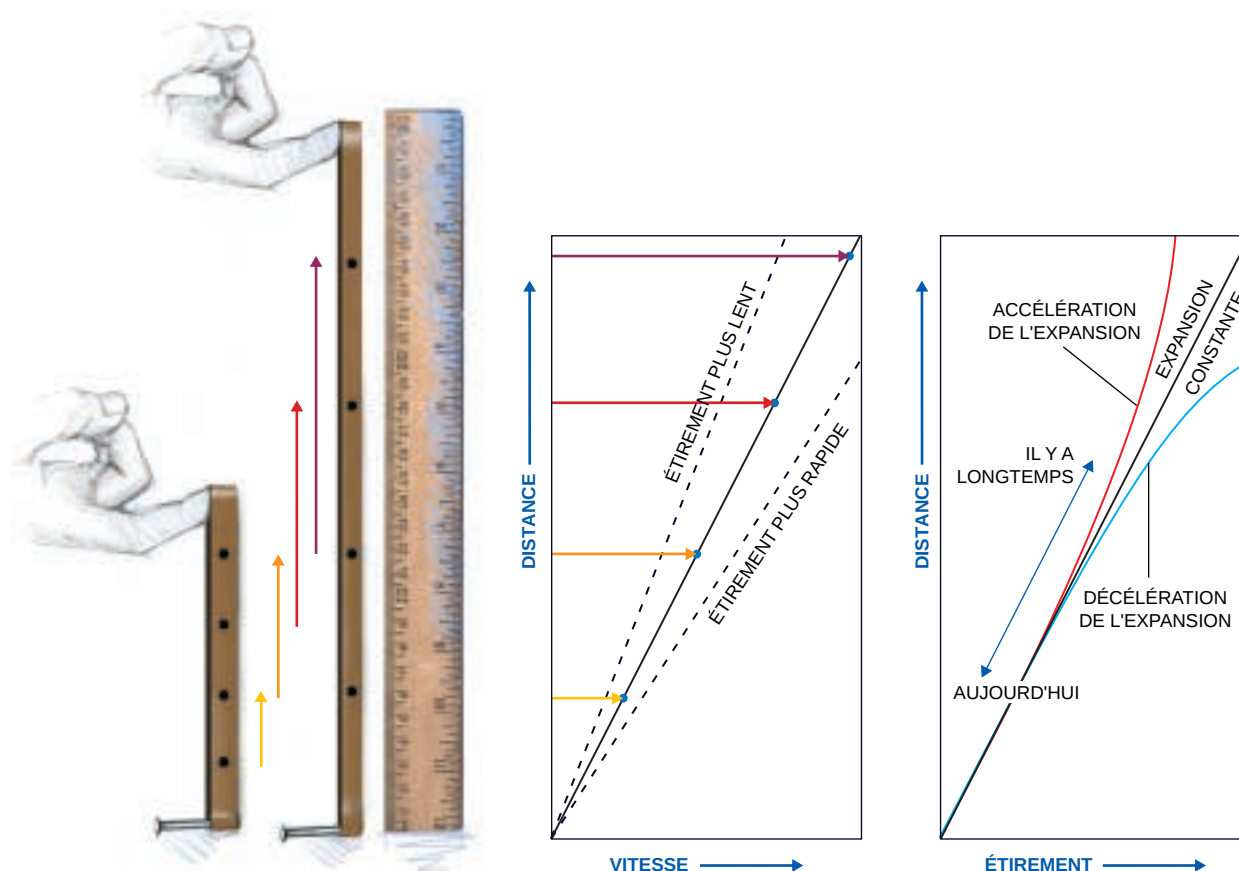
Peter Challinor, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics

2. UNE SUPERNOVA LOINTAINE est indiquée par la flèche. L'explosion de cette étoile modifie uniquement quelques pixels de l'image prise après l'événement.



3. L'EXPANSION COSMIQUE pourrait, en théorie, être de trois types : soit elle est constante (à gauche), soit elle ralentit (au centre), soit elle accélère (à droite). Dans chaque cas, la taille d'une portion donnée de l'Univers croît avec le temps (de bas en haut). Cependant l'âge de l'Univers – le temps écoulé depuis le début de l'expansion – est supérieur pour un univers accéléré et inférieur pour un univers ralenti, par rapport au cas de l'expansion constante.

Daniels & Daniels



**4. UN ÉLASTIQUE** que l'on tend montre la relation linéaire entre la vitesse de récession des galaxies et leur distance. Étirons un élastique à une vitesse constante. La vitesse de différents points peints sur l'élastique est indiquée par la longueur des flèches colorées. Par exemple, le point le plus proche de l'origine se déplace le moins, et sa vitesse est la plus faible (flèche jaune). En revanche, le point le plus éloigné se déplace plus, et sa vitesse est supérieure (flèche violette). Lorsque l'on porte sur un diagramme la distance en fonction de la

vitesse, la pente de la droite donne la vitesse d'expansion de l'élastique (graphique de gauche). Si cette vitesse change au cours du temps, la pente change également (graphique de droite). Supposons que l'origine du graphique représente la Terre aujourd'hui ; les temps plus reculés se placent vers le coin supérieur droit, car ils correspondent aux grandes distances. Si la vitesse d'expansion était plus lente par le passé, la ligne se courberait vers le haut (ligne rouge). Si cette vitesse était supérieure, elle se courberait vers le bas (ligne bleue).

l'étoile qui explose émerge distinctement de sa galaxie hôte.

Après l'étude et l'analyse de dizaines de supernovae à grand décalage vers le rouge, une surprise nous attendait : les supernovae sont moins lumineuses que prévu. La différence est mince : les supernovae lointaines sont en moyenne 25 pour cent plus faibles que ce que prévoyait la théorie, mais ce résultat suffit à remettre en question les théories cosmologiques anciennes.

Avant de balayer les anciennes théories, les astronomes se sont demandé s'il existait une explication plus simple à la relative faiblesse de ces supernovae lointaines. Des poussières cosmiques situées dans le milieu intergalactique ou dans les galaxies où ont explosé les supernovae absorberaient-elles une partie de leur lumière ? Vraisemblablement pas, car les poussières atténuent plus la lumière bleue que la lumière rouge, de sorte que les supernovae seraient plus rouges qu'elles ne le sont en réalité (le phénomène est le même que celui qui fait rougir le soleil couchant). Or, nous n'observons pas une telle atténuation. De surcroît, la poussière cosmique ne

semble pas répartie uniformément dans l'espace, de sorte que la lumière de quelques supernovae seulement rencontrerait ces « nuages de poussières » et serait atténuée. Or, les supernovae ont presque toujours la même luminosité.

Une autre perturbation possible serait l'effet de lentille gravitationnelle, c'est-à-dire la courbure des rayons lumineux au voisinage des galaxies. Parfois, cet effet augmente la luminosité des sources, mais, le plus souvent, il la réduit ; des lentilles gravitationnelles pourraient donc atténuer l'éclat des supernovae lointaines. En fait, les calculs montrent que cet effet ne devient important que pour des sources plus éloignées que les supernovae que nous étudions, de sorte que nous pouvons écarter cette possibilité.

Enfin, nous craignons que les supernovae lointaines ne diffèrent des supernovae proches, émanant peut-être d'étoiles plus jeunes qui auraient contenu moins d'éléments lourds que les étoiles des galaxies plus mûres. Bien que nous ne puissions éliminer cette hypothèse, notre analyse tente déjà de prendre ces différences en compte. Ces

ajustements semblent fonctionner lorsque nous les appliquons aux galaxies proches, dont les supernovae présentent une grande dispersion d'âges, de compositions et de types.

Comme aucun de ces effets élémentaires ne s'accorde aux observations, nous pensons que la faiblesse inattendue des supernovae lointaines résulte de la structure du cosmos. Deux propriétés différentes de l'espace et du temps peuvent y contribuer.

D'abord, l'espace pourrait avoir une courbure négative. Une telle courbure se comprend mieux à l'aide d'une analogie bidimensionnelle. Les créatures vivant dans un monde bidimensionnel parfaitement plat (comme les personnages du roman *Flatland*, d'Edwin Abbott) trouveraient qu'un cercle de rayon  $r$  a une circonférence exactement égale à  $2\pi r$ . En revanche, si leur monde était en forme de selle, avec une courbure négative (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, page 50), la circonférence d'un cercle de rayon  $r$  serait supérieure à  $2\pi r$ .

La plupart des cosmologistes supposent, pour diverses raisons théoriques,

que notre espace tridimensionnel, n'est pas courbé. Toutefois, s'il avait une courbure négative, l'énorme sphère de rayonnement produite par une supernova ancienne aurait une superficie plus grande que dans un espace géométriquement plat : de ce fait, la source nous paraîtrait plus faible qu'elle ne l'est en réalité.

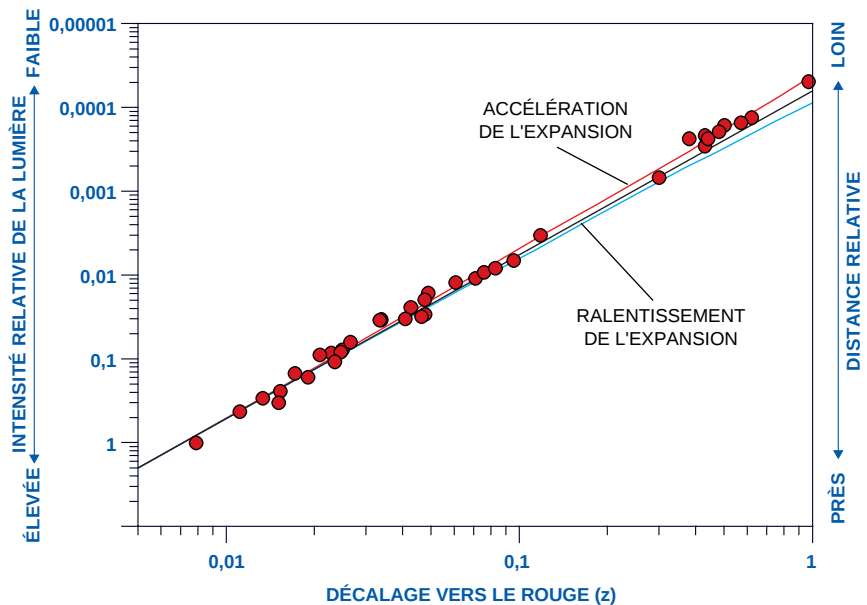
Les supernovae lointaines seraient également plus faibles que prévu si elles étaient plus loin que ne l'indique leur décalage vers le rouge. Autrement dit, les supernovae auraient un décalage vers le rouge inférieur à ce que l'on attendrait d'objets si lointains. Pour expliquer le décalage vers le rouge inférieur, les cosmologistes postulent que l'Univers s'est dilaté plus lentement par le passé qu'ils ne l'avaient prévu, tirant moins la lumière qu'il emporte.

## La force

Pourquoi l'expansion cosmique ralentit-elle moins vite que prévu ? Dans un univers composé de matière ordinaire, la gravité ralentit progressivement l'expansion. Un faible ralentissement, comme l'indiquent les mesures sur les supernovae, implique une faible densité globale de matière dans l'Univers.

Bien que cette conclusion s'oppose aux idées théoriques anciennes, elle s'accorde avec d'autres indices. Par exemple, les astronomes ont observé que certaines étoiles semblent plus vieilles que l'Univers. C'est évidemment impossible, mais si le cosmos s'est dilaté plus lentement par le passé, ainsi que l'indiquent les supernovae, l'Univers est plus vieux qu'on ne le croyait, et la contradiction disparaît. Les nouveaux résultats s'accordent également bien avec d'autres tentatives récentes pour déterminer la quantité totale de matière, comme les études des amas de galaxies (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, *Pour la Science*, février 1999).

Les nouvelles mesures de la densité de matière dans l'Univers nous éclairent aussi sur la courbure de l'Univers, car, selon la relativité générale, courbure et expansion sont liées : la matière montre à l'espace-temps comment se courber, et l'espace-temps montre à la matière comment se mouvoir. Une faible densité de matière correspond à une courbure négative, ainsi qu'à un faible ralentissement de l'expansion. Si l'Univers est presque vide, la courbure négative est maximale,



David Schneider, d'après C. Hogan, R. Kirshner et N. Suntzeff

**5. LA LUMINOSITÉ DES SUPERNOVAE ne varie pas, en fonction du décalage spectral (points rouges), comme le préoyaient de nombreux théoriciens : l'expansion de l'Univers ne ralentit pas aussi vite que si l'Univers était «plat» (ligne bleue) et que si la constante cosmologique était nulle (pas d'énergie du vide). Les observations montrent que l'Univers ne contient que 20 pour cent de la matière nécessaire pour le rendre plat (ligne noire). L'expansion semble même accélérer, peut-être à cause d'une constante cosmologique non nulle (ligne rouge).**

de sorte que l'atténuation des objets lointains est forte.

La grande surprise vient de ce que les supernovae que nous observons sont plus faibles que prévu, même pour un Univers presque vide (qui possède une courbure négative maximale). Nos observations semblent indiquer que l'expansion accélère progressivement. Un Univers composé uniquement de matière ordinaire ne peut croître de cette manière, parce que la gravité est toujours attractive. Cependant, conformément à la théorie d'Einstein, l'expansion peut accélérer si de l'énergie remplit l'espace partout. Cette étrange «énergie du vide» figure dans les équations d'Einstein sous la forme d'une constante dite cosmologique. Contrairement aux formes ordinaires de masse et d'énergie, l'énergie du vide agirait comme une gravité répulsive qui peut écarteler l'Univers à des vitesses croissantes (voir

*L'antigravité*, par Lawrence Krauss, page 42). Une fois cette possibilité extraordinaire admise, nous pouvons parfaitement expliquer nos observations, même en conservant la géométrie plate chère aux théoriciens.

Ainsi, ce résultat est le plus excitant que nous pouvions espérer : une forme d'énergie étrange communiquerait une force répulsive à longue portée. Toutefois, il est si surprenant que nous demeurons raisonnablement sceptiques. Heureusement, des progrès de la technique d'observation, tels les nouveaux détecteurs infrarouges et le télescope spatial de nouvelle génération, permettront bientôt de tester nos conclusions. Ces instruments plus précis et plus fiables nous permettront aussi de percevoir des balises encore plus faibles que celles qui s'allument il y a encore plus longtemps dans des galaxies beaucoup, beaucoup plus lointaines.

Craig HOGAN dirige le département d'astronomie de l'Université de Washington. Robert KIRSHNER enseigne l'astronomie à l'Université Harvard. Nicholas SUNTZEFF est astronome à l'observatoire de Cerro Tololo, au Chili.

Craig J. HOGAN, *The Little Book of the Big Bang*, Springer-Verlag, 1998.

S. PERLMUTTER et al., *Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe*, (*The Supernova Cosmology Pro-*

*ject*), in *Nature*, vol. 391, pp. 51-54, 1<sup>er</sup> janvier 1998

Adam G. RIESS et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, in *Astronomical Journal*, vol. 116, n° 3, pp. 1009-1038, septembre 1998.

S. PERLMUTTER et al., *Measurement of  $W_n$  and  $W_s$  from 42 High Redshift Supernovae*, astro-ph/9812133, à paraître dans *Astrophysical Journal*.



# L'antigravité

LAWRENCE KRAUSS

*Certains cosmologistes expliquent les nouvelles observations des astronomes à l'aide d'équations qui comprennent un terme découvert par Einstein : la constante cosmologique.*

**E**n 1946, George Orwell écrivait : « Voir ce qui se trouve devant son nez demande un effort constant. » C'est bien le cas en cosmologie. L'Univers est tout autour de nous, nous en faisons même partie, mais les cosmologistes sont parfois obligés d'explorer ses confins pour glaner des informations sur les mécanismes qui ont conduit à notre existence sur la Terre. Les scientifiques croient en une simplicité des principes sous-jacents de la nature, mais démêler leur écheveau n'est pas une mince affaire, car les indices peuvent être subtils. Les récentes observations d'explosions stellaires lointaines l'ont bien montré. Contre toute attente, l'analyse de ces supernovae indique que l'expansion de l'Univers accélère au lieu de ralentir.

Depuis 1929, les astronomes savent que l'Univers se dilate : Edwin Hubble montra que les galaxies lointaines s'écartent les unes des autres comme si l'Univers était en expansion uniforme. À ces mouvements de récession s'oppose la gravité collective des amas de galaxies et de toutes les planètes, étoiles, gaz et poussières qu'elles contiennent. Même l'attraction gravitationnelle d'une plume ralentit, d'une quantité infime, l'expansion cosmique. Voici une dizaine d'années, théorie et observations ont semblé montrer que l'Univers contenait suffisamment de matière pour ralentir l'expansion sans jamais l'arrêter. En jargon géométrique, qu'Albert Einstein encourageait, l'Univers semblait « plat ».

L'Univers plat est intermédiaire entre deux autres géométries possibles, dites « ouverte » et « fermée ». Dans la lutte de la matière contre l'expansion du Big Bang, le cas ouvert représente la victoire de l'expansion : l'Univers

se dilate indéfiniment. Dans le cas fermé, la gravité l'emporterait, et l'expansion serait suivie d'une contraction : l'Univers finirait en s'écrasant sur lui-même. L'Univers est un peu comme une fusée : si on lance celle-ci à une vitesse supérieure à la vitesse de libération, la fusée échappe à l'attraction gravitationnelle et s'éloigne vers l'infini (cas ouvert) ; si on lance la fusée à une vitesse inférieure, elle finit par retomber sur Terre (cas fermé) ; enfin, si la vitesse initiale est exactement égale à la vitesse de libération, la fusée reste en orbite (cas plat).

Dans les années 1980, pour résoudre certains paradoxes de la théorie classique, les cosmologistes proposent la théorie de l'inflation. Selon cette théorie, un très court instant après le Big Bang, l'Univers s'est dilaté extrêmement rapidement, et l'Univers que nous habitons serait alors plat, en équilibre parfait entre les deux tendances antagonistes. Bien que l'Univers semble contenir trop peu de matière visible pour être plat, la dynamique céleste indique qu'il existe beaucoup de matière invisible. La majeure partie de la matière dans les galaxies et dans les amas de galaxies échappe aux télescopes. Il y a une dizaine d'années, j'ai nommé « quintessence » cette matière sombre, reprenant le terme utilisé par Aristote pour qualifier l'éther, la matière invisible supposée imprégner tout l'espace et dont l'idée a été reprise au XIX<sup>e</sup> siècle (voir *La matière sombre dans l'Univers*, par Lawrence Krauss, in *Pour la Science*, février 1987).

Pourtant un solide faisceau de preuves montre aujourd'hui que même la matière invisible ne suffit pas à rendre l'Univers plat. Peut-être l'Univers n'est-il pas plat, mais

Alfred T. Kamajian



1. LE «VIDE» N'EST PAS VIDE : l'espace est peuplé de particules élémentaires qui surgissent et disparaissent trop rapidement pour être détectables. Leur présence est prévue par la mécanique quantique et par la relativité restreinte. L'énergie combinée de toutes ces particules «virtuelles», comme d'autres formes d'énergie, exercerait une force à longue portée soit attractive, comme la gravitation, soit répulsive selon des principes physiques qui ne sont pas encore compris. Aux échelles macroscopiques, cette énergie agirait comme la constante cosmologique proposée par Albert Einstein.

ouvert, auquel cas les cosmologistes doivent modifier – voire rejeter – la théorie de l'inflation (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, page 50). En tout cas, si l'Univers est réellement plat, ses constituants principaux ne peuvent être ni de la matière visible, ni de la matière sombre, ni du rayonnement. L'Univers serait alors composé principalement d'une forme plus «éthérée» d'énergie, qui occuperait l'espace vide, y compris celui qui se trouve juste sous notre nez.

## Attraction fatale

L'idée d'une telle énergie a une histoire longue et mouvementée. Elle commence avec la publication de la théorie de la relativité générale par Einstein, plus de dix ans avant que Hubble ne démontre l'expansion de l'Univers. En

reliant l'espace au temps et à la matière, la relativité promettait ce qui avait été jusque-là impossible : une compréhension de la dynamique des objets dans l'Univers et aussi de l'Univers lui-même. Toutefois, Einstein restait insatisfait de sa théorie, car, contrairement aux autres forces fondamentales qui s'exercent sur la matière, la gravité n'est qu'attractive. Or cette implacable attraction gravitationnelle de la matière entraînerait finalement la contraction de l'Univers. Ne croyant pas à cette idée, Einstein ajouta à ses équations, un «terme cosmologique», qui stabilisait l'Univers par une nouvelle force à longue portée. Une valeur positive de ce terme devait représenter une force répulsive, une sorte d'antigravité, qui soutiendrait l'Univers contre son propre poids.

Quelques années après, quand on découvrit l'expansion de l'Univers,

Einstein reconnut que l'ajout de cette constante était sa «plus grande erreur». Il l'abandonna cinq ans après son introduction. En 1923, dans une lettre au mathématicien Hermann Weyl, Einstein écrivit que «si le monde n'est pas quasi statique, alors au diable le terme cosmologique» (voir la figure 3). Comme l'éther avant lui, cette constante semblait vouée aux oubliettes de l'histoire.

Les physiciens étaient également heureux de se débarrasser de cet intrus. Dans la théorie de la relativité générale, l'énergie est la source des forces gravitationnelles (attractives ou répulsives), et la matière est simplement une forme d'énergie. La constante cosmologique est toutefois de nature différente : l'énergie qui y est associée ne dépend pas de la position ou du temps, d'où le terme «constante cosmologique». La force engendrée par la constante cosmologique opère même en l'absence totale de matière ou de rayonnement. Par conséquent, sa source doit être une énergie curieuse, qui réside dans l'espace vide. La constante cosmologique, comme l'éther, dote le vide d'une aura quasi métaphysique. Avec son abandon, la nature redevenait raisonnable.

Le redevenait-elle vraiment ? Dans les années 1930, le fantôme de la constante cosmologique réapparut lorsque les physiciens cherchèrent à combiner les lois de la mécanique quantique et celles de la théorie de la relativité restreinte. Paul Dirac et, plus tard, Richard Feynman, Julian Schwinger et Shinichiro Tomonaga montrèrent que l'espace vide est plus compliqué qu'on ne l'imaginait : des particules élémentaires surgissent spontanément du néant et y retournent, pour peu que leur durée de vie soit si courte que personne ne puisse la mesurer directement. Ces particules virtuelles peuvent sembler aussi abracadabrantes que des anges assis sur une tête d'épingle, mais la différence existe : ces particules invisibles engendrent des effets mesurables, telles des modifications des énergies possibles pour les électrons dans les atomes ou des forces entre des plaques métalliques proches (voir la figure 4). La théorie des particules virtuelles rend compte des observations jusqu'à la neuvième décimale (habituellement, les anges n'ont pas d'effet sur les atomes). Autrement dit, le vide n'est pas vide.

| Types de matière              |                                                                                                                             |                                                                                                                                                        |                                       |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Type                          | Composition probable                                                                                                        | Indice principal                                                                                                                                       | Contribution approximative à $\Omega$ |
| Matière visible               | Matière ordinaire (composée principalement de protons et de neutrons) qui forme étoiles, poussières et gaz                  | Observations télescopiques                                                                                                                             | 0,01                                  |
| Matière sombre baryonique     | Matière ordinaire trop faible pour être vue, peut-être naines brunes ou noires (objets compacts massifs du halo, ou MACHO)  | Calculs de la nucléosynthèse dans le Big Bang et proportion du deutérium                                                                               | 0,05                                  |
| Matière sombre non baryonique | Particules exotiques comme les «axions», les neutrinos massifs ou les particules massives faiblement interagissantes (WIMP) | La gravité de la matière visible est insuffisante pour expliquer les vitesses orbitales des étoiles au sein des galaxies et des galaxies dans les amas | 0,3                                   |
| «Matière sombre» cosmologique | Constante cosmologique (énergie de l'espace vide)                                                                           | Le rayonnement du fond diffus cosmologique suggère un cosmos plat, mais il n'y a pas assez de matière baryonique ou non baryonique pour cela           | 0,6                                   |

2. L'UNIVERS contient des milliards et des milliards de galaxies, chacune contenant un nombre tout aussi grand d'étoiles. Pourtant l'essentiel de la masse de l'Univers semble constitué de «matière sombre», dont l'identité reste incertaine. La constante cosmologique, si son existence se confirme, agirait comme une forme encore plus exotique de matière sombre aux échelles cosmologiques. La quantité  $\Omega$  est le quotient de la densité de matière ou d'énergie par la densité à laquelle l'Univers serait plat.

## La réalité virtuelle

Si les particules virtuelles changent les propriétés des atomes, modifient-elles aussi l'expansion de l'Univers? En 1967, l'astrophysicien soviétique Yakov Zeldovich a montré que l'énergie des particules virtuelles devait agir précisément comme l'énergie associée à la constante cosmologique. Toutefois, les calculs de mécanique quantique révélèrent une surprise : ils conduisaient à la prévision de l'existence d'un ensemble de particules virtuelles qui couvrent toutes les longueurs d'onde possibles ; lorsqu'on additionnait les effets de toutes ces particules, l'énergie totale devenait infinie. Même quand on négligeait les effets quantiques inférieurs à une certaine longueur d'onde, pour lesquels la combinaison du comportement gravitationnel et quantique est mal connue, l'énergie du vide calculée était 120 ordres de grandeur supérieure à celle de l'énergie contenue dans toute la matière de l'Univers!

Quel pourrait être l'effet d'une constante cosmologique aussi gigantesque? Nous pouvons facilement imposer une limite supérieure à sa valeur. Tendons le bras et regardons nos doigts. Si la constante cosmologique était aussi grande que le suggère naïvement la théorie quantique, l'espace entre nos yeux et notre main se dilaterait si vite que la lumière émise par la main n'atteindrait jamais les yeux. Le fait que nous puissions voir non seulement jusqu'au bout de notre bras, mais également jusqu'aux confins de l'Univers impose une limite supérieure à cette constante : environ 120 ordres de grandeur inférieure à l'estimation mentionnée! Cette incompatibilité entre la théorie et les observations est la plus grande et la plus troublante de toute la physique moderne (voir *Le mystère de la constante cosmologique*, par Larry Abbott, in *Pour la Science*, juillet 1988).

Pour remédier à cette difficulté, on suppose qu'une loi physique encore inconnue annule la constante cosmologique. Les théoriciens aimeraient bien se débarrasser de cette constante, mais diverses observations astronomiques – l'âge de l'Univers, la densité de matière et la nature des structures cosmiques – suggèrent indéniablement qu'elle pourrait n'être pas tout à fait nulle.

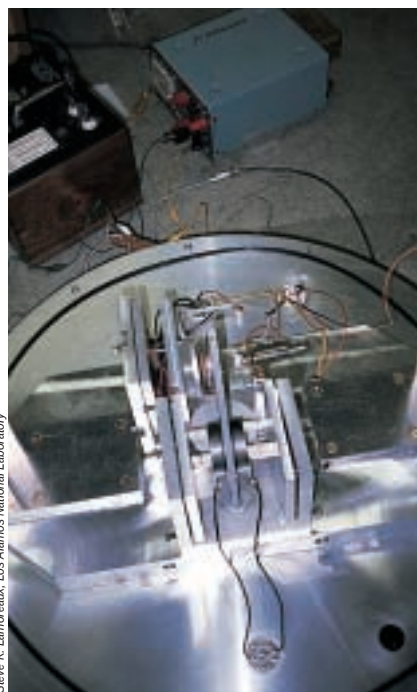
Quel est l'âge de l'Univers? Cette question est l'une des plus lancinantes de la cosmologie moderne. En mesurant les vitesses des galaxies, les astronomes calculent le temps qu'il leur a fallu pour atteindre leurs positions actuelles, en supposant qu'elles soient toutes issues du même endroit. Si l'Univers se dilate à vitesse constante (en première approximation, on peut ignorer le ralentissement dû à la gravité), l'âge de l'Univers serait le quotient de la distance intergalactique par la vitesse de séparation, c'est-à-dire l'inverse de la célèbre constante de Hubble.

Plus la valeur de la constante de Hubble est élevée, plus la vitesse d'expansion est rapide et plus l'Univers est jeune.

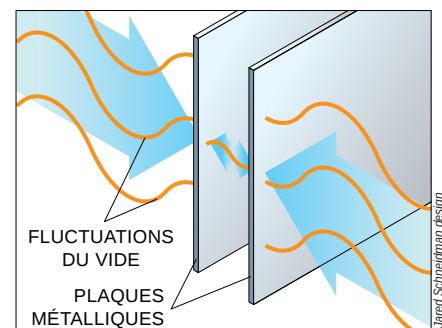
Hubble estimait que sa constante éponyme était égale à environ 500 kilomètres par seconde et par mégaparsec (un mégaparsec correspond environ à trois millions d'années-lumière). Autrement dit, deux galaxies éloignées d'un mégaparsec s'écartent de 500 kilomètres par seconde. Cette estimation est manifestement fautive, car elle conduit à un âge de l'Univers de deux milliards d'années inférieur à l'âge de la Terre (environ quatre milliards



**3. CETTE LETTRE D'EINSTEIN** au mathématicien allemand Hermann Weyl concède qu'un univers de taille constante serait instable et devrait se dilater ou se contracter : « Dans l'Univers de De Sitter, deux points fluides et instables se séparent à vitesse croissante. S'il n'y a pas de monde quasi statique, alors au diable le terme cosmologique. »



Steve K. Lamoreaux, Los Alamos National Laboratory



Jared Schneidman design

**4. L'EFFET CASIMIR** met en évidence que le vide est peuplé de « particules virtuelles ». Cet effet correspond à une attraction entre des objets métalliques – par exemple, une force attractive entre deux plaques métalliques parallèles (en haut). L'espacement fini entre les plaques empêche la matérialisation dans l'interstice de particules virtuelles plus grandes qu'une certaine longueur d'onde. Comme il y a alors plus de particules à l'extérieur des plaques qu'entre elles, les plaques se rapprochent (à droite). L'effet Casimir dépend clairement de la forme des plaques, ce qui permet aux physiciens de l'isoler des autres forces de la nature.

d'années). Si l'on tient maintenant compte de l'attraction gravitationnelle de la matière, on calcule que les objets se déplaçaient plus vite dans le passé, et que leurs positions actuelles sont donc atteintes plus rapidement que si leur vitesse avait été constante. Cette nouvelle hypothèse réduit encore d'un tiers l'âge estimé, ce qui aggrave la contradiction.

Au cours des 70 dernières années, les astronomes ont affiné leur détermination de la vitesse d'expansion, mais ils n'ont pas réussi à éliminer la difficulté. Avec le lancement du télescope spatial *Hubble* et le développement de nouvelles techniques d'observation, les mesures de la constante de Hubble de ces dix dernières années (entre 50 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec) commencent finalement à converger. Selon l'une des dernières estimations, la valeur de la constante de Hubble serait comprise entre 65 et 81, avec une valeur la plus probable égale à 73 kilomètres par seconde et par mégaparsec (voir *L'expansion de l'Univers*, par Wendy Freedman, in *Pour la Science*, janvier 1993). Ces résultats placent la limite supérieure sur l'âge d'un univers plat à environ dix milliards d'années.

## La crise de l'âge

Cette valeur résout-elle les conflits? Hélas non, car les astronomes observent des objets ayant plus de dix milliards d'années. Les amas globulaires sont parmi les objets les plus anciens de notre Galaxie. Ces groupes denses d'étoiles situés pour la plupart à sa périphérie se sont probablement formés avant le reste de la Voie lactée. En se fondant sur la vitesse à laquelle ces étoiles consomment du combustible nucléaire, on estime que leur âge est compris entre 15 et 20 milliards d'années. C'est plus que les dix milliards annoncés!

En 1995, afin de déterminer si ce conflit d'âge provenait de la cosmologie ou de la modélisation stellaire, nous avons réévalué l'âge des amas globulaires. Nous avons conclu que les amas les plus vieux avaient jusqu'à 12,5 milliards d'années, ce qui

## Résumé des valeurs déduites de la densité de matière cosmique

| Observation                       | $\Omega_{\text{matière}}$ |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Âge de l'Univers                  | < 1                       |
| Densité de protons et de neutrons | 0,3-0,6                   |
| Amas de galaxies                  | 0,3-0,5                   |
| Évolution des galaxies            | 0,3-0,5                   |
| Fond diffus cosmologique          | $\leq 1$                  |
| Supernovae de type Ia             | 0,2-0,5                   |

**5. LES MESURES de la contribution matérielle à  $\Omega$  sont à peu près concordantes (on note  $\Omega$  le quotient de la densité mesurée et de la densité critique ;  $\Omega = 1$  correspond à un univers plat). Bien que chaque type de mesures soit contestable, la plupart des astronomes acceptent aujourd'hui que la matière seule ne rende pas  $\Omega$  égal à un. Toutefois, d'autres formes d'énergie, comme la constante cosmologique, pourraient y contribuer.**

contredisait toujours l'âge d'un univers plat, dominé par la matière.

Voici deux ans, le satellite *Hipparcos* de l'Agence spatiale européenne mesura les positions précises de plus de 100 000 étoiles ; leurs distances, ainsi que celles des amas globulaires, furent réévaluées. Ces nouvelles mesures ont conduit à recalculer l'âge des étoiles, car les nouvelles luminosités absolues, déduites des distances, correspondent à des vitesses différentes de consommation du carburant nucléaire par les étoiles et, donc, à des durées de vie différentes de celles qui avaient été calculées. Compte tenu des erreurs d'observation, il semble maintenant que les amas globulaires pourraient avoir seulement dix milliards d'années, ce qui serait compatible avec les âges cosmologiques.

Toutefois, cet accord marginal est inconfortable, parce qu'il requiert que les déterminations soient chacune à l'extrémité de l'intervalle possible. Pourquoi, alors, ne pas admettre que nous ne vivons pas dans un Univers plat dominé par la matière? Si nous acceptons de vivre dans un Univers peu dense, ouvert, et dont la décélération serait moins rapide, les difficultés s'amenuiseraient. Toutefois, même ainsi, l'âge de l'Univers n'est supérieur à 12,5 milliards d'années que si l'Univers est dominé non pas par la matière, mais par une constante cosmologique : la force

répulsive résultante accélérerait l'expansion ; les galaxies s'éloigneraient plus lentement qu'aujourd'hui, mettant plus de temps pour atteindre leurs séparations actuelles, de sorte que l'Univers serait plus vieux.

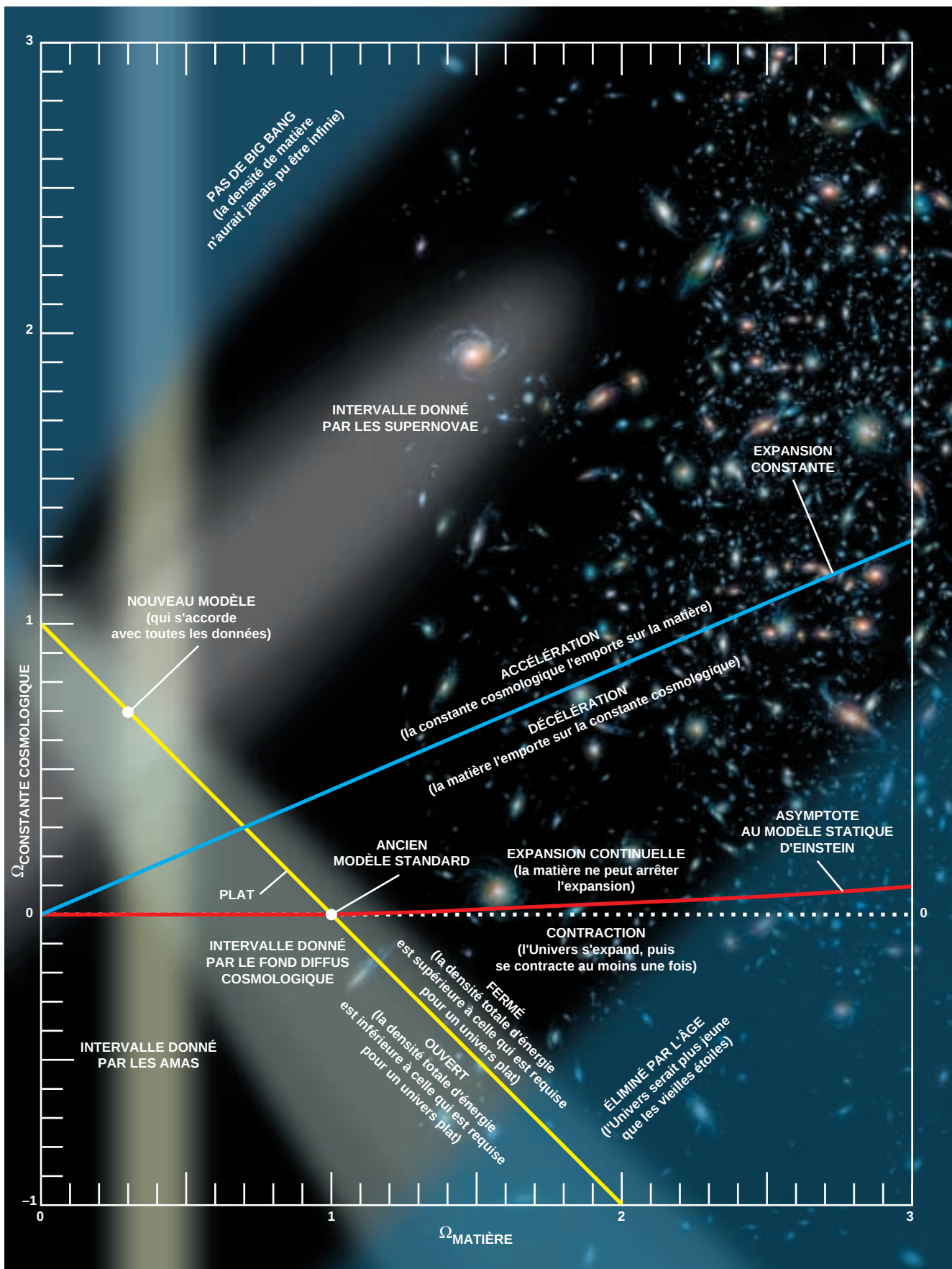
Alors que les cosmologistes évoquaient ces idées, d'autres observations ont contribué à ébranler l'édifice théorique classique. Notamment, les astronomes ont sondé des régions toujours plus grandes du cosmos et mieux recensé la matière qui s'y trouvait. Il est aujourd'hui clair que la quantité totale de matière est insuffisante pour que l'Univers soit plat.

Pour obtenir un recensement précis de la matière de l'Univers, les astronomes doivent estimer la synthèse des éléments légers au cours du Big Bang. Les éléments légers

du cosmos – l'hydrogène, l'hélium et leurs isotopes plus rares, tel le deutérium – furent créés dans l'Univers primordial en quantités déterminées par le nombre de protons et de neutrons initialement présents. Ainsi, en comparant les proportions des divers isotopes, les astronomes déduisent la quantité totale de matière ordinaire produite peu après le Big Bang (il pourrait exister, bien sûr, une autre matière qui ne se composerait pas de protons et de neutrons).

Ces estimations progressèrent en 1996, lorsque David Tytler, Scott Burles et leurs collègues de l'Université de San Diego déterminèrent la quantité primordiale de deutérium en mesurant l'absorption de la lumière d'un quasar par des nuages d'hydrogène intergalactiques. Comme ces nuages n'ont jamais contenu d'étoiles, leur deutérium ne peut avoir été synthétisé que lors du Big Bang. L'étude de ce deutérium montre que la densité moyenne de matière ordinaire est seulement quatre à sept pour cent de la quantité totale nécessaire pour que l'Univers soit plat!

Les astronomes ont également évalué la densité de matière en étudiant les plus gros objets gravitationnellement liés de l'Univers : les amas de galaxies. Ces groupes de centaines de galaxies renferment l'essentiel de la matière visible. Ils sont principalement composés d'un gaz intergalactique

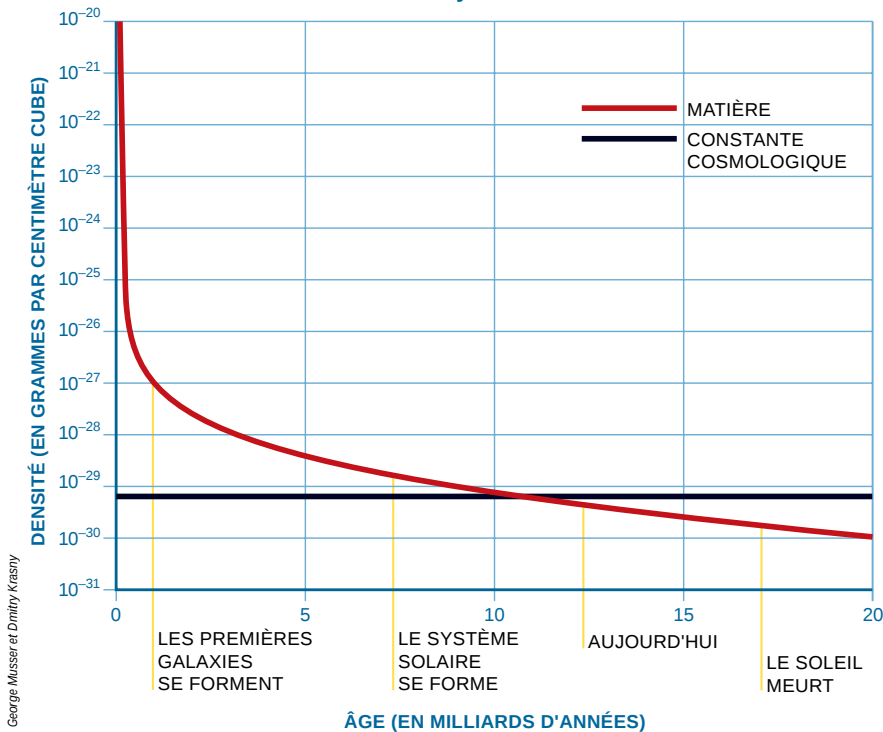


Don Dixon et Dmitry Krasny, d'après Lawrence M. Krauss et Max Tegmark

6. CE DIAGRAMME montre comment l'évolution de l'Univers dépend de deux quantités cosmologiques clés : la densité moyenne de matière (axe horizontal) et la densité d'énergie due à la constante cosmologique (axe vertical). Leurs valeurs, données ici en unités cosmologiques standards, ont trois effets distincts. D'abord, leur somme (qui représente l'énergie cosmique totale) détermine la géométrie de

l'espace-temps (ligne jaune). Ensuite, leur différence (qui représente l'intensité relative de l'expansion et de la gravité) détermine comment la vitesse d'expansion varie au cours du temps (ligne bleue). Ces deux effets ont été sondés par des observations récentes (régions plus claires). Le troisième, un équilibre des deux densités, détermine l'évolution de l'Univers (ligne rouge). Au total, les possibilités sont très nombreuses.

## Densité moyenne de l'Univers



**7. LA COÏNCIDENCE COSMIQUE** est l'un des nombreux mystères cosmologique. La densité moyenne de matière ordinaire décroît quand l'Univers se dilate (en rouge). La densité équivalente représentée par la constante cosmologique est fixe (en noir). Pourquoi alors, malgré ces comportements opposés, ont-elles toutes les deux presque la même valeur aujourd'hui ? S'agit-il d'un hasard, d'une nécessité pour que la vie ait pu exister ou l'indication d'un mécanisme encore inconnu ?

chaud, qui émet des rayons X. La température de ce gaz, déduite du spectre des rayons X, dépend de la masse totale de l'amas : plus les amas sont massifs, plus la gravité est forte, de sorte que la pression et la température sont élevées ; les amas massifs sont ainsi plus chauds. En 1993, après l'étude de plusieurs amas, des astronomes allemands avaient déduit que la matière lumineuse représentait seulement 10 à 20 pour cent de la masse totale des objets. Ces résultats, combinés aux mesures du deutérium, impliquent que la densité totale de la matière dans les amas – incluant les protons et les neutrons, ainsi que des particules plus exotiques comme certains candidats pour la matière sombre – est au plus égale à 60 pour cent de celle requise pour que l'Univers soit plat.

Un troisième ensemble d'observations, qui concerne aussi la répartition de la matière aux échelles les plus grandes, conforte l'idée que l'Univers ne contient pas assez de matière pour être plat. Aucune partie de la cosmologie n'a probablement autant progressé au cours des 20 dernières années que la compréhension de l'origine et de la nature des structures cosmiques.

Les astronomes ont longtemps supposé que les galaxies se sont formées à partir de petites concentrations de matière dans l'Univers jeune, mais on ignorait comment ces concentrations initiales étaient apparues. La théorie de l'inflation, dans les années 1980, fut le premier mécanisme plausible : elle stipulait une amplification des fluctuations quantiques à des dimensions macroscopiques.

Les simulations numériques de la croissance des structures après l'inflation ont montré que, si la matière sombre n'était pas composée de neutrons et de protons, mais d'un autre type de particules (telles que les WIMP, des particules massives qui interagissent peu avec la matière), de minuscules rides dans le fond diffus cosmologique pouvaient croître et former les structures que nous observons aujourd'hui. De surcroît, avec une densité globale de matière élevée, des concentrations de matière devraient encore évoluer en amas de galaxies. La croissance relativement lente du nombre d'amas de galaxies dans l'histoire récente de l'Univers montre que la densité de matière est inférieure à 50 pour cent de celle qui est requise pour

un Univers plat (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, in *Pour la Science*, février 1999).

## Rien ne compte

L'ensemble des observations a finalement vaincu l'*a priori* théorique qui refusait l'introduction de la constante cosmologique. Deux possibilités demeurent : soit l'Univers est ouvert, soit il est rendu plat par une forme d'énergie qui n'est pas associée à la matière ordinaire. Pour savoir quelle est la solution, les astronomes veulent mesurer le fond diffus cosmologique avec précision, car la mesure des fluctuations de la température du fond diffus renseigne sur la géométrie de l'Univers. Selon les premières indications apportées par le satellite *COBE* et par des détecteurs embarqués sur des ballons, l'Univers serait plat. Par ailleurs, pour la première fois, les mesures de la lumière émise par les supernovae lointaines indiquent que l'expansion de l'Univers accélère ; la constante cosmologique que l'on estime alors correspond à celle que l'on déduit d'autres observations (voir *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, par Craig Hogan, Robert Kirshner et Nicholas Suntzeff, page 36). Le fond diffus cosmologique, qui reflète la structure de l'Univers peu après le Big Bang, révèle la géométrie de l'Univers, qui dépend de la densité totale d'énergie, quelle que soit sa forme, tandis que les supernovae sondent directement le taux d'expansion de l'Univers, qui dépend de la différence entre la densité de matière (qui ralentit l'expansion) et la constante cosmologique (qui peut l'accélérer).

Ainsi les cosmologistes estiment que la constante cosmologique contribuerait pour 40 à 70 pour cent de l'énergie nécessaire pour rendre l'Univers plat (voir la figure 6). Soyons pourtant prudents : il est dit, dans la communauté des cosmologistes, qu'une théorie dont les prédictions confirment toutes les observations est probablement fautive, ne serait-ce que parce que certaines mesures ou certaines prédictions sont sans doute erronées. Sans attendre, les théoriciens se précipitent déjà pour comprendre ce qui aurait été impensable voilà 20 ans : l'existence d'une constante cosmologique positive,

mais bien inférieure à celle prévue par les théories quantiques actuelles. Une loi physique inconnue réduirait l'énergie du vide calculée par la théorie quantique, sans l'annuler complètement. Par un ajustement fin, cette loi enlèverait l'énergie des particules virtuelles jusqu'à la 123<sup>e</sup> décimale sans toucher à la 124<sup>e</sup>. Si deux effets très grands se compensent presque exactement, c'est qu'il doit y avoir une raison fondamentale sous-jacente, et pas uniquement un hasard numérique.

Steven Weinberg et ses collègues de l'Université d'Austin étudient le problème à l'aide du principe anthropique. Si l'Univers observé n'est qu'un parmi une infinité d'Univers possibles – chacun pouvant avoir des constantes physiques légèrement différentes, comme le proposent certaines versions de la théorie de l'inflation combinée aux idées émergentes de la gravité quantique –, alors les physiciens espèrent estimer la grandeur de la constante cosmologique en cherchant dans quels univers pourraient se développer une vie intelligente. Avec d'autres théoriciens, S. Weinberg a obtenu un résultat compatible avec la grandeur apparente de la constante cosmologique aujourd'hui.

Cependant, la plupart des théoriciens ne sont pas convaincus : pourquoi la valeur de la constante cosmologique ne résulterait-elle pas d'une théorie physique plutôt que de l'histoire (voir *Le principe anthropique*, par George Gale, in *Pour la Science*, février 1982).

Certains ont poursuivi des travaux commencés par Paul Dirac, qui accordait beaucoup d'importance aux grands nombres sans dimension, les nombres « purs », obtenus par combinaison algébrique des constantes fondamentales. Par exemple, il avait conclu que la constante gravitationnelle,  $G$ , est inversement proportionnelle à l'âge de l'Univers, et qu'elle diminue donc avec le temps (voir *Paul Dirac et la beauté de la physique*, par Corby Hovis et Helge Kragh, in *Pour la Science*, juillet 1993). La constante cosmologique pourrait également varier : si la constante cosmologique était fixe et non nulle, nous vivrions au seul moment de l'histoire cosmique où la densité de matière, qui décroît quand l'Univers se dilate, est comparable à l'énergie du vide. Pourquoi cette coïncidence ? Plusieurs groupes ont imaginé qu'il ne s'agit pas d'une coïncidence : une forme inconnue

## Le destin de l'univers

**A**vec les découvertes astronomiques récentes, les cosmologistes prévoient une évolution de l'Univers bien différente de celle qui était naguère admise. La cosmologie prédisait deux évolutions selon la géométrie de l'Univers ou, de manière équivalente, selon la densité moyenne de matière qu'il renferme. Si sa densité moyenne était notable, l'Univers semblait « fermé », et son expansion était vouée à l'arrêt ; il se serait ensuite contracté et aurait fini par imploser. Si la densité était inférieure à la valeur critique, l'Univers aurait été « ouvert », et il se serait dilaté indéfiniment. Un univers « plat », pour lequel la densité est égale à la valeur critique, se dilate indéfiniment, mais de plus en plus lentement.

Pour établir ces scénarios, on supposait que la constante cosmologique était nulle. Si elle ne l'est pas, c'est elle – et non la matière – qui détermine l'évolution de l'Univers. En effet, la constante cosmologique correspond à une densité d'énergie fixe dans l'espace. La matière est impuissante : lorsque le rayon de l'Univers

double, la densité diminue d'un facteur huit, ainsi que les forces qui limitent l'expansion. Dans un Univers en expansion, la densité d'énergie associée à la constante cosmologique finit par l'emporter. Si la constante cosmologique est positive, elle engendre une force répulsive à longue portée, et l'Univers continuera à se dilater, même si la densité totale d'énergie dans la matière et dans l'espace est supérieure à la valeur critique (des valeurs très négatives de la constante sont exclues, parce que la force attractive résultante aurait déjà conduit l'Univers à sa fin).

La théorie de la relativité générale suppose que la constante cosmologique est constante, mais si la densité d'énergie du vide varie avec le temps, l'évolution de l'Univers dépendra de la façon dont elle varie. La phase d'inflation de l'Univers primordial pourrait avoir été une période où la constante cosmologique a varié. L'Univers entre peut-être aujourd'hui dans une nouvelle ère d'inflation, qui peut finalement se terminer.

d'énergie cosmique agirait comme une constante cosmologique qui varierait au cours du temps.

Proposées par James Peebles et Bharat Ratra, de l'Université de Princeton, voici une dizaine d'années, ces idées ont été ravivées par les récentes découvertes sur les supernovae. En se fondant sur des concepts de la théorie des cordes, Robert Caldwell et Paul Steinhardt, de l'Université de Pennsylvanie, ont reproposé le terme « quintessence » pour décrire cette énergie variable. Que la matière sombre, qui originellement portait ce nom, semble maintenant presque banale en comparaison, donne une mesure de l'énigme théorique sous-jacente. Personnellement, j'aime le terme de quintessence, mais l'idée

ne me paraît pas convaincante parce qu'elle conduit à des théories *ad hoc*. L'énigme de la constante cosmologique demeure.

Comment les cosmologistes la résoudront-ils ? De nouvelles mesures du fond diffus cosmologique, l'analyse continue des supernovae lointaines et l'étude des lentilles gravitationnelles des quasars lointains permettront de mieux cerner la constante cosmologique. Une chose est déjà certaine : la cosmologie des années 1980, postulant un Univers plat dominé par la matière, est morte. L'Univers est soit ouvert, soit empli d'une énergie inconnue. Je préfère la seconde hypothèse, mais on devra explorer les deux voies par des idées radicalement nouvelles de la physique. « Rien » ne pourrait être plus intéressant.

Lawrence KRAUSS dirige le département de physique de l'Université Case Western Reserve.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

P. James E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

Martin REES, *Before the Beginning : Our Universe and Others*, Addison-Wesley, 1997.

Brian CHABOYER, Pierre DEMARQUE, Peter J. KERNAN et Lawrence M. KRAUSS, *The Age of Globular Clusters in Light of Hipparcos : Resolving the Age Problem ?*, in *Astrophysical Journal*, vol. 494, n° 1, pp. 96-110, 10 février 1998.

Lawrence M. KRAUSS, *The End of the Age Problem, and the Case for a Cosmological Constant Revisited*, in *Astrophysical Journal*, vol. 501, n° 2, pp. 461-466, 10 juillet 1998.



# L'inflation de l'Univers

MARTIN BUCHER • DAVID SPERGEL

*L'Univers contiendrait moins de matière que ne le prévoit la théorie de l'inflation : il semble se dilater plus vite que prévu. Certains cosmologistes résolvent ce paradoxe avec une inflation en deux étapes.*

Les cosmologistes ont plus de chance que les biologistes : l'Univers tout entier semble bien plus simple que le moindre organisme unicellulaire. À l'échelle de l'Univers, étoiles, galaxies et amas de galaxies ne sont que des taches minuscules, et la matière est répartie quasi uniformément ; ses mouvements ne sont soumis qu'à la seule force de gravitation.

Ces deux caractéristiques, uniformité à grande échelle et domination de la gravitation, sont les fondements de la théorie du Big Bang, selon laquelle notre Univers se dilate depuis 12 milliards d'années environ. Cette théorie explique bien la vitesse des galaxies les unes par rapport aux autres, les abondances relatives des éléments chimiques légers, la faible intensité du rayonnement cosmologique et l'évolution générale des structures astronomiques. L'évolution du cosmos semble presque indépendante des détails de son contenu.

Pourtant la théorie du Big Bang contient des paradoxes. Il y a 20 ans, les cosmologistes les ont résolus en incorporant dans la théorie des éléments de physique des particules, ce qui a conduit à la théorie de l'«inflation». Cette dernière est aujourd'hui en crise : des observations récentes contredisent ses prévisions concernant la densité moyenne de matière dans l'Univers. Ce dernier n'est peut-être pas aussi simple que les cosmologistes l'imaginaient : soit il contient de la matière ou de l'énergie étranges, soit la théorie de l'inflation est plus complexe que son énoncé actuel. Dans cet article, nous examinerons la seconde hypothèse.

La théorie du Big Bang ne décrit pas la naissance de l'Univers, mais seulement sa croissance et sa maturation : l'Univers primitif aurait été composé de rayonnement incroyablement chaud

et dense ; une zone plus petite qu'une bille de billard se serait agrandie jusqu'à former l'Univers observable aujourd'hui. Des parties de l'Univers, peut-être de dimension infinie, nous resteraient invisibles, parce que leur lumière n'a pas encore eu le temps de nous parvenir. L'idée d'un Univers en expansion est troublante. Quand le cosmos se dilate, la distance entre deux objets indépendants croît. Ainsi les galaxies lointaines s'écartent, parce que l'espace qui les sépare grandit, comme un gâteau qui gonfle sépare les raisins qu'il contient.

La loi de Hubble décrit une expansion uniforme : les galaxies s'éloignent de la Terre (ou de tout autre point de l'Univers) à des vitesses proportionnelles à leurs distances. Les objets de l'Univers n'obéissent pas tous à cette loi, parce que l'attraction gravitationnelle lutte contre le gonflement de l'espace : ainsi, le Soleil et la Terre ne s'écartent pas. En revanche, la loi de Hubble est vérifiée aux échelles les plus grandes. La version la plus simple de la théorie du Big Bang stipule que l'expansion s'est toujours déroulée à peu près au même rythme.

En se dilatant, l'Univers s'est refroidi, sa densité a diminué, et il est devenu de plus en plus complexe. Une partie du rayonnement s'est condensée en particules élémentaires. Puis, 300 000 ans après l'explosion primordiale, la température a chuté à 3 000 °C, ce qui a permis aux électrons et aux protons de se combiner et de former des atomes d'hydrogène. À ce moment, l'Univers est devenu transparent,

libérant un rayonnement cosmologique micrométrique diffus : l'homogénéité de ce rayonnement indique que les fluctuations de la densité de matière dans l'Univers primordial étaient inférieures à 1 pour 100 000. Pourtant, les petites concentrations de matière ont finalement crû et formé des galaxies et des amas de galaxies.

## Une homogénéité inexpliquée

Malgré ses succès, cette théorie du Big Bang ne répond pas à certaines questions fondamentales. D'abord, pourquoi l'Univers est-il si uniforme ? C'est un fait que des régions du ciel à l'opposé l'une de l'autre se ressemblent beaucoup, malgré leur séparation de plus de 24 milliards d'années-lumière. Or, la lumière n'a encore voyagé que pendant 12 milliards d'années environ (l'âge de l'Univers), de sorte que ces régions n'ont encore jamais été en contact : elles n'ont pas eu le temps d'échanger de la matière, de la chaleur ou de la lumière pour homogénéiser leurs densités et leurs températures (voir la figure 4). L'uniformité de l'Univers a dû précéder l'expansion, mais la théorie ne l'explique pas.

Inversement, pourquoi l'Univers primordial présentait-il de petites hétérogénéités ? Heureusement qu'elles ont existé : sans ces minuscules fluctuations, l'Univers serait parfaitement homogène (quelques atomes par mètre cube), et ni la Voie lactée ni la Terre n'existeraient.

**1. LES BULLES D'UNIVERS** sont des univers complets qui croissent au sein d'un «multivers» plus grand et par ailleurs vide. Conformément à la théorie de la relativité générale, le temps et l'espace ont des significations différentes à l'intérieur et à l'extérieur de chaque bulle. Le temps perçu à l'intérieur augmente vers le centre de la bulle : la paroi de la bulle représente le Big Bang de cette bulle. Bien sûr, cette illustration montre une perspective impossible. Même si un observateur existait en dehors d'une bulle, il ne pourrait pas regarder à l'intérieur, parce que la bulle se dilate à la vitesse de la lumière.