

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^e décimale sans toucher à la 124^e. 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

Avec 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,

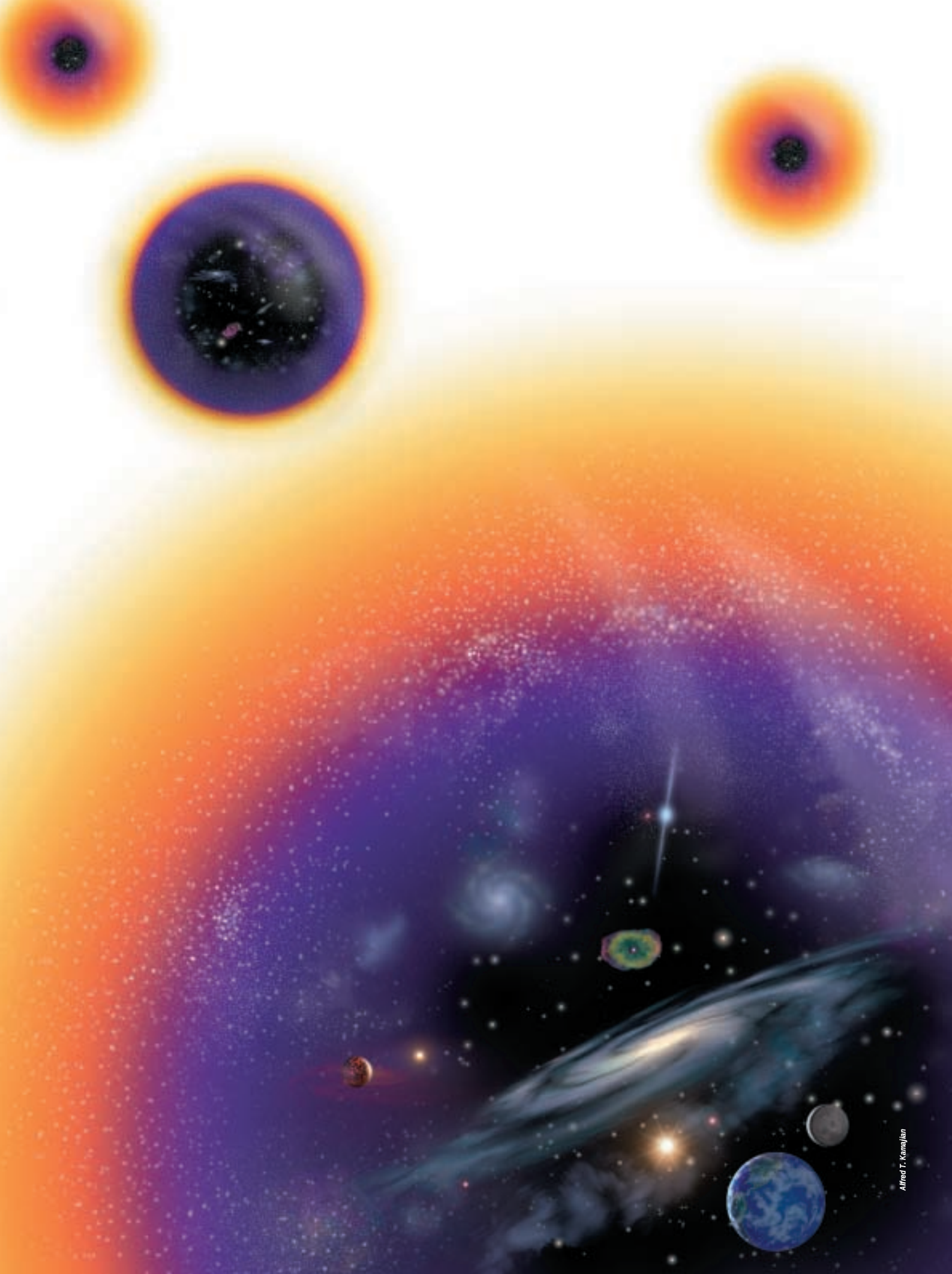
libérant un rayonnement cosmologique micrométrique diffus : l'homogénéité de ce rayonnement indique que les fluctuations de la densité de matière dans l'Univers primordial étaient inférieures à 1 pour 100 000. Pourtant, les petites concentrations de matière ont finalement crû et formé des galaxies et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



Enfin, pourquoi la vitesse de l'expansion cosmique est-elle juste suffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle de toute la matière de l'Univers? Tout écart notable à l'équilibre se serait amplifié : si l'expansion avait été un peu plus rapide, l'Univers semblerait aujourd'hui presque vide de matière ; si l'attraction gravitationnelle avait été un peu plus forte, l'Univers se serait contracté et serait redevenu une boule dense et chaude.

Les cosmologistes décrivent cet équilibre à l'aide de la variable Ω , rapport de l'énergie gravitationnelle à l'énergie cinétique (c'est-à-dire l'énergie contenue dans le mouvement de la matière en expansion). Ω est proportionnel à la densité de matière dans l'Univers : une densité supérieure correspond à une attraction gravitationnelle plus forte, donc à un Ω plus grand. Si Ω est égal à un, sa valeur ne change jamais. Sinon, sa valeur décroît ou croît par un processus auto-amplificateur, à mesure que l'une des deux formes d'énergie, cinétique ou gravitationnelle, devient prépondérante. Après des milliards d'années, Ω devrait être soit nul, soit infini. Comme la densité actuelle de l'Univers n'est ni

nulle ni infinie, on en déduit que, originellement, Ω était égal à un, à moins d'un milliardième de milliardième près. Pourquoi? La théorie du Big Bang n'offre d'autre explication que le hasard.

L'absence de réponse à ces questions n'invalide pas la théorie, qui explique bien plusieurs milliards d'années d'histoire cosmique ; en revanche, les cosmologistes pensent que la théorie est incomplète, et ils ont mis au point, au début des années 1980, la théorie de l'inflation.

L'inflation avant le Big Bang

La théorie de l'inflation pallie les insuffisances de la théorie du Big Bang, au prix de complications : elle postule que l'Univers, à son tout début, est passé par une période d'expansion très rapide (d'où son nom). Contrairement à l'expansion du Big Bang, qui ralentit au cours du temps, l'expansion de l'inflation est de plus en plus rapide. Elle écarte deux objets indépendants à une vitesse croissante, voire supérieure à celle de la lumière. Ce phénomène ne viole pas la théorie de la relativité, selon laquelle une masse ne peut se déplacer plus

vite que la lumière : c'est l'espace, situé entre les objets eux-mêmes au repos, qui se dilate plus vite que la lumière.

Cette rapide expansion initiale explique l'uniformité de l'Univers observé aujourd'hui. Toutes les parties de l'Univers visible ont été à un moment si proches que leur densité et leur température se sont homogénéisées. Puis, pendant l'inflation, les différentes régions de l'Univers ont cessé d'être en contact ; ce n'est qu'après la fin de l'inflation que la lumière, plus rapide que l'expansion du Big Bang, a commencé à diffuser vers l'intérieur de l'Univers. Il existe peut-être des hétérogénéités dans la partie invisible de l'Univers, mais nous devons attendre, pour les observer, que la lumière émise par ces régions parvienne jusqu'à nous.

Pour introduire une expansion rapide, la théorie de l'inflation utilise un élément emprunté à la physique des particules : le champ d'inflation, ou inflaton. En physique, les particules subatomiques, tels les protons et les électrons, sont représentées par des champs quantiques, qui ressemblent aux champs électrique, magnétique et gravitationnel familiers. Un champ est une fonction de

L'origine de l'Univers

Les lois de la physique décrivent généralement comment un système évolue à partir d'un état initial, mais les théories qui expliquent le commencement de l'Univers doivent contenir un type de loi complètement différent, qui explique l'état initial lui-même : les lois usuelles sont comme des cartes routières qui montrent comment aller de A à B, les nouvelles lois doivent expliquer pourquoi on part de A.

En 1983, James Hartle, de l'Université de Santa Barbara, et Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, ont appliqué la mécanique quantique à l'Univers tout entier, produisant une fonction d'onde cosmique, analogue à la fonction d'onde des atomes ou des particules élémentaires. Cette fonction d'onde (la fonction d'onde associée à une particule décrit la probabilité de présence de cette particule dans l'espace) détermine les conditions initiales de l'Univers. Selon cette approche, la distinction usuelle entre passé et futur perd son sens dans l'Univers primordial ; la direction temporelle prend les propriétés d'une direction spatiale. Tout comme l'espace n'a pas de bords, le temps n'a pas de commencement discernable. À l'Université Tufts, Alexandre Vilenkin a proposé une autre idée : l'utilisation d'une fonction d'onde «à effet tunnel» déterminée par les probabilités relatives qu'un univers de taille nulle devienne spontanément un univers de taille finie.

En 1998, S. Hawking et Neil Turok, aussi à Cambridge, ont proposé la création spontanée d'une bulle d'inflation ouverte à partir du néant. Cette nouvelle version de l'inflation ouverte évite l'hypothèse d'une désintégration du faux vide, mais A. Vilenkin et Andreï Linde, de l'Université Stanford, ont contesté les hypothèses de leur calcul.

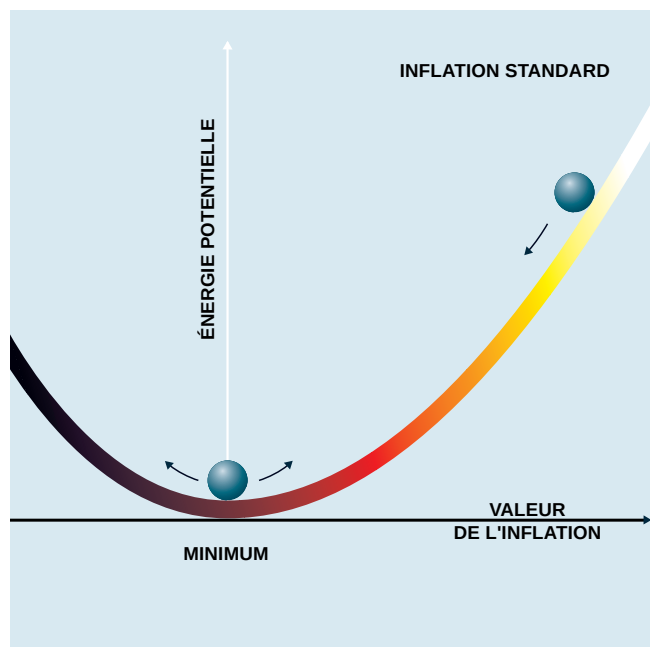
A. Linde a essayé de contourner le problème des conditions initiales en supposant que l'inflation est un processus sans

commencement. Dans la théorie la plus répandue, l'inflation prend fin quand le champ d'inflation roule en bas de sa courbe d'énergie potentielle. Cependant, en raison des fluctuations quantiques, le champ pourrait remonter le long de cette courbe. Autrement dit, il existerait en permanence des régions de l'Univers (qui forment en fait la majorité de son volume) qui sont en inflation. Elles entoureraient des poches d'espace où l'inflation a pris fin et où un univers stable s'est créé. Chaque poche serait caractérisée par des constantes physiques ; nous habiterions celle dont les constantes ont favorisé l'existence de la vie. Le reste de l'Univers continuerait de subir, et aurait toujours subi, l'inflation.

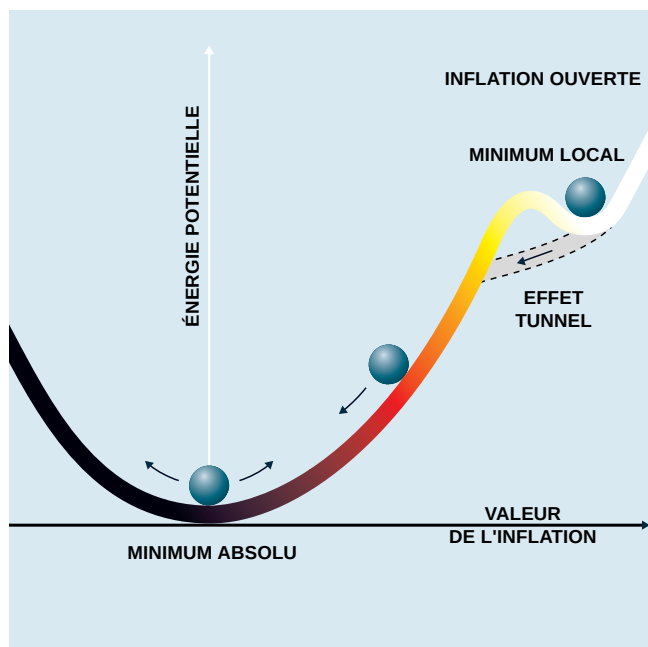
Toutefois, A. Vilenkin et Arvind Borde, aussi à Tufts, ont avancé que même cette extension de l'inflation ne décrit pas complètement l'origine de l'Univers. Bien que l'inflation puisse être éternelle dans le sens progressif du temps, elle nécessite un commencement absolu.

Richard Gott et Li-Xin Li, de l'Université de Princeton, ont récemment proposé que l'Univers soit cyclique, un peu comme si un voyageur remontait le temps et devenait son propre père. Une telle personne n'aurait pas d'arbre généalogique ; aucune explication de son origine n'est possible. Dans leur hypothèse, notre bulle s'est libérée du proto-univers cyclique ; elle n'est plus cyclique, mais en expansion et en refroidissement permanents.

Les astronomes testeront difficilement ces idées, car l'inflation efface presque toutes les caractéristiques observables de ce qui l'a précédée. De nombreux physiciens soupçonnent qu'une explication plus complète de l'Univers avant l'inflation, et de l'origine des lois de la physique, devra attendre une théorie vraiment fondamentale de la physique, peut-être la théorie des cordes.



2. LE CHAMP D'INFLATION, OU INFLATON, serait à l'origine de la force qui aurait provoqué l'expansion de l'espace. Ce champ se comporterait comme une bille roulant sur une pente : il tendrait à minimiser son énergie potentielle (axe vertical) en changeant sa valeur (axe horizontal). Les processus quantiques à l'aube du temps auraient communiqué à l'Univers une forte énergie potentielle. Selon la théorie de l'inflation (à gauche), l'inflaton roulerait vers sa valeur minimale, mais, selon la théorie de l'inflation ouverte (à droite), il se



serait arrêté dans un minimum local. Dans la plus grande partie de l'Univers, l'inflaton serait toujours dans ce minimum local, et l'inflation n'aurait jamais cessé. Dans quelques régions, le champ serait sorti du minimum local par «effet tunnel», et il aurait continué sa descente. L'une de ces régions serait la bulle d'Univers où nous vivons. Dans les deux modèles d'inflation, l'inflaton oscille dès qu'il approche de son point final, emplissant l'espace de matière et de rayonnement : c'est le Big Bang.

l'espace et du temps dont les oscillations sont interprétées comme des particules. Les champs sont responsables de la transmission des forces. L'inflaton est associé à une force «anti-gravitationnelle» qui étire l'espace.

À une certaine valeur de l'inflaton correspond une énergie potentielle. Comme une bille roulant le long d'une colline, l'inflaton roule vers le fond de son puits de potentiel (voir la figure 2, à gauche), mais l'expansion de l'Univers introduit ce que l'on peut décrire comme un frottement cosmique, qui s'oppose à la décroissance de l'énergie potentielle. Tant que ce frottement domine, l'énergie potentielle diminue très lentement, et la valeur de l'inflaton aussi : l'intensité de la force d'antigravitation augmente par rapport à celle de la gravitation, car la densité de l'Univers décroît. L'expansion de l'Univers est alors de plus en plus rapide. Finalement l'inflaton faiblit, et son énergie résiduelle se transforme en rayonnement et en particules (la matière que nous connaissons aujourd'hui). Ensuite l'expansion de l'Univers se poursuit conformément à la théorie du Big Bang.

Les cosmologistes étudient les conséquences des différentes théories sur la forme de l'Univers. Selon la

théorie de la relativité générale, la gravitation est en effet un phénomène géométrique : la matière et l'énergie déforment le tissu de l'espace-temps, tordant les trajectoires des objets qui se déplacent. L'expansion de l'Univers, qui est elle-même une forme de courbure de l'espace-temps, est commandée par la valeur de Ω (voir l'encadré page 55). Si Ω est plus grand que un, l'Univers a une courbure positive, comme la surface d'une orange, mais en trois dimensions spatiales : c'est la géométrie sphérique, ou «fermée». Si Ω est inférieur à un, la courbure de l'Univers est négative, comme une selle : c'est la géométrie hyperbolique, ou «ouverte». Si Ω est égal à un, l'Univers est plat, comme une crêpe : c'est la géométrie euclidienne habituelle.

L'inflation aplatit l'Univers observable. Quelle que soit la forme initiale de l'Univers, ce dernier se dilate si vite que nous n'en voyons plus qu'une petite partie, qui peut paraître plate pour les mêmes raisons que la surface terrestre qui nous entoure nous semble plate. L'inflation rapproche donc de un la valeur observée de Ω , tandis que les irrégularités initiales, dans les densités de matière et de rayonnement, sont effacées.

Ainsi, la théorie de l'inflation standard associe la géométrie euclidienne de l'espace et son homogénéité. Pour que l'Univers ait l'homogénéité actuelle, la théorie prévoit qu'il doit être très, très plat, avec Ω égal à un, à un cent millièmes près. Tout écart de Ω par rapport à un doit être indécidable par les astronomes. Depuis 20 ans, la planéité effectivement observée a été considérée comme une prévision bien vérifiée de la théorie.

L'Univers hyperbolique

Là est aujourd'hui le problème. De nombreuses observations astronomiques d'amas de galaxies et de supernovae lointaines montrent que la gravitation est trop faible pour vaincre l'expansion. La densité de matière doit être inférieure aux prévisions, et Ω semble être égal à environ 0,3 : l'Univers serait courbé et ouvert. Ce résultat peut s'interpréter de trois manières. Premièrement, la théorie de l'inflation pourrait être complètement fautive. Dans cette hypothèse, les cosmologistes devraient trouver une autre théorie qui résoudrait la question de l'homogénéité et qui expliquerait la valeur de Ω .

L'expansion accélérée que l'on déduit des observations des supernovae

lointaines suggère une deuxième hypothèse : l'existence d'une énergie supplémentaire qui agirait comme de la matière étrange, courbant l'espace comme le fait la matière ordinaire. Elle aplatiserait l'espace, et la théorie de l'inflation n'aurait rien à craindre (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, page 42). Pour l'instant, les calculs sont imprécis parce qu'on connaît mal les poussières de l'Univers et la nature des étoiles qui explosent, et ils ne permettent pas de clore (si l'on peut dire) le débat.

Une troisième approche consiste à dissocier la géométrie de l'Univers du processus d'inflation, en incluant dans la théorie la description d'étapes antérieures à l'inflation. Ces idées, explorées au début des années 1980, ont été reprises et développées récemment.

On peut trouver un potentiel associé à l'inflaton tel que l'Univers soit légèrement courbé au lieu d'être complètement plat. Supposons ainsi que la

fonction énergie potentielle possède deux minima : un minimum local et un minimum absolu (voir la figure 2, à droite). Quand l'inflaton roule le long de la pente, l'Univers se dilate en restant uniforme (comme dans la théorie exposée précédemment). Puis l'inflaton reste bloqué dans le minimum local. Les physiciens nomment cet état un « faux vide » : toute la matière et tout le rayonnement du cosmos y sont presque totalement sous la forme de l'énergie de l'inflaton. Les fluctuations inhérentes à la mécanique quantique font osciller l'inflaton et lui permettent de s'échapper du minimum local, par effet tunnel (comme on libère une bille coincée dans un flipper en secouant l'appareil).

La sortie du minimum local, ou désintégration du faux vide, ne s'est pas produite partout en même temps. Elle a d'abord eu lieu en un point quelconque, puis elle s'est propagée. Le

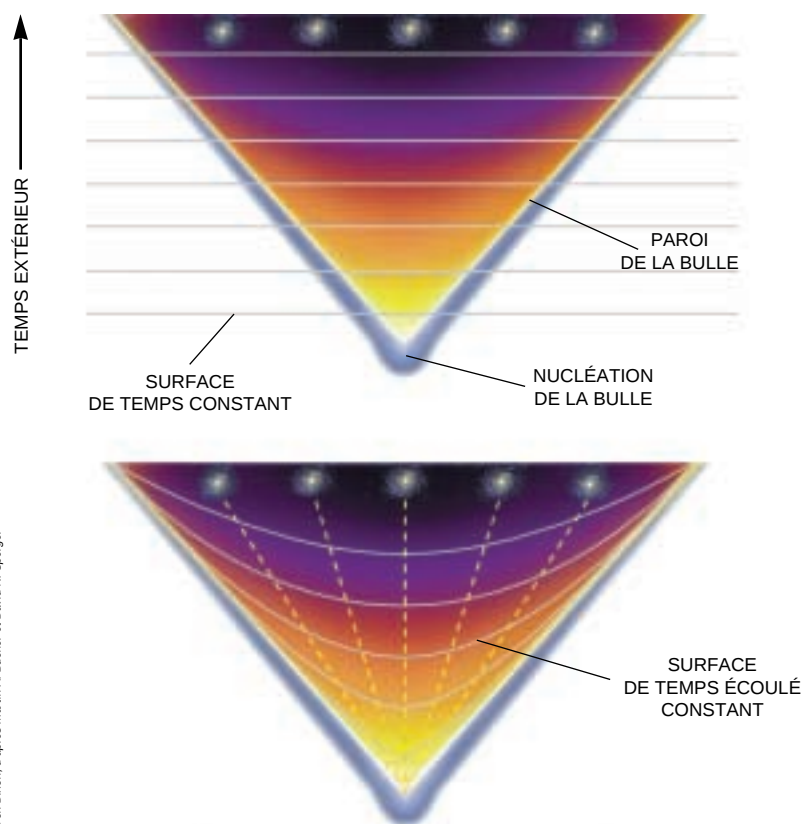
processus est comparable à l'ébullition d'une casserole d'eau : l'eau ne se transforme pas partout instantanément en vapeur. En raison du mouvement aléatoire des molécules, des bulles éparses se forment dans le liquide ; lorsque leur taille est inférieure à une taille critique, elles s'effondrent parce que la tension superficielle est supérieure à leur pression interne ; dans les bulles plus grosses, la pression à l'intérieur surmonte la tension superficielle, et ces bulles croissent.

Notre Univers est une bulle

Dans la désintégration du faux vide, les fluctuations quantiques ont joué le rôle du mouvement moléculaire aléatoire, provoquant la nucléation de bulles de vrai vide. Une force analogue à la tension superficielle a détruit la plupart des bulles, mais quelques-unes ont tant grossi que les effets quantiques sont devenus négligeables. Rien ne s'y opposant, le rayon de ces bulles a continué de croître à la vitesse de la lumière. Quand la paroi externe d'une bulle passe par un point de l'espace, l'inflaton en ce point est délogé du minimum local et il reprend sa descente vers le minimum absolu d'énergie potentielle : au sein de la bulle, l'espace se dilate comme dans la théorie de l'inflation. L'intérieur de cette bulle correspond à notre Univers. Le moment où l'inflaton a quitté le minimum local correspond au Big Bang.

Ce dernier s'est donc produit à des instants différents aux points situés à des distances différentes du centre de nucléation de la bulle. L'inflaton peut alors être utilisé comme un chronomètre : sa valeur en un point de l'espace indique le temps écoulé depuis le Big Bang en ce point. L'inflaton est maximal sur la paroi de la bulle et décroît régulièrement vers le centre. Mathématiquement, la valeur de l'inflaton reste constante sur des surfaces tridimensionnelles de forme hyperbolique (voir la figure 3).

La valeur de l'inflaton n'est pas qu'une grandeur mathématique. Elle a déterminé les propriétés fondamentales de l'Univers au sein de la bulle : sa densité moyenne et la température du rayonnement cosmologique diffus (aujourd'hui égale à 2,7 kelvins). Sur une surface hyperbolique, la densité, la température et le temps écoulé sont constants. Ces surfaces sont ce que les observateurs



Don Dixon, d'après Martin A. Bucher et David N. Spergel

3. UN UNIVERS OUVERT DANS UN ESPACE FERMÉ ? Ce serait possible si l'espace et le temps étaient perçus différemment en dehors (*en haut*) et à l'intérieur (*en bas*) d'une bulle d'Univers. Ici, le temps, mesuré par des observateurs extérieurs, augmente vers le haut de chaque ligne. Par définition, l'espace est n'importe quelle ligne ou surface qui relie des points à un certain temps (*lignes horizontales du schéma supérieur*). La bulle a une courbure sphérique et est donc fermée. Les observateurs intérieurs, toutefois, ne sont conscients que du temps écoulé, l'intervalle depuis que le bord de la bulle a atteint un point donné. Quand le temps écoulé augmente, la température diminue, ce qui entraîne un changement physique (*chaud en jaune ; froid en noir*). Les surfaces de temps écoulé constant sont des hyperboles, qui se courbent vers le haut et ne touchent jamais la paroi de la bulle. Les points internes s'éloignent mutuellement, à cause de l'expansion cosmique (*lignes pointillées*). L'Univers a une courbure hyperbolique et est donc ouvert.

La géométrie de l'Univers

Si l'Univers avait un «dehors» d'où on pouvait l'observer, la cosmologie serait bien plus facile. Confinés dans l'intérieur, les astronomes doivent déduire la forme de l'Univers de ses propriétés géométriques. L'expérience quotidienne indique que l'espace est euclidien, ou «plat», à petite échelle : deux lignes parallèles ne se coupent jamais, la somme des angles d'un triangle est de 180 degrés, la circonférence d'un cercle de rayon r est $2\pi r$. Toutefois, on ne peut pas en déduire que l'Univers est euclidien à grande échelle : ce serait comme si l'on affirmait que la Terre est plate parce que la surface qui nous entoure semble plate.

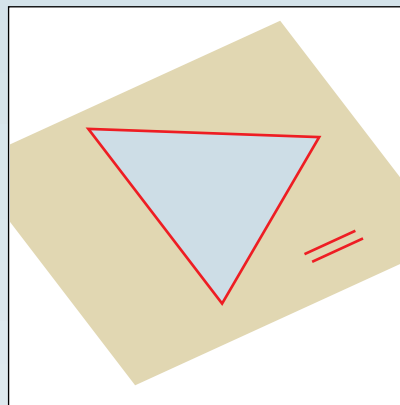
Si l'on admet que l'Univers est homogène (tous les points de l'espace sont équivalents) et isotrope (toutes les directions sont équivalentes), deux autres géométries tridimensionnelles sont possibles. Ce sont les géométries sphérique, ou «fermée», et hyperbolique, ou «ouverte». Elles sont caractérisées toutes les deux par un rayon de courbure, analogue au rayon terrestre. Si le rayon de courbure est positif, la géométrie est sphérique ; s'il est négatif, la géométrie est hyperbolique. Dans les deux cas, l'Univers semble euclidien aux distances inférieures au rayon de courbure.

Dans un univers sphérique, comme à la surface de la Terre, des lignes parallèles se coupent, la somme des angles d'un triangle peut atteindre 540 degrés, et la circonférence d'un cercle est inférieure à $2\pi r$. Comme l'espace se referme, l'univers sphérique est fini. Dans un univers hyperbolique, les lignes parallèles divergent, la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180 degrés, et la circonférence d'un cercle est supérieure à $2\pi r$. Un tel univers est de taille infinie, comme l'espace euclidien (il existe des méthodes pour rendre finis les univers hyperbolique et plat, mais elles ne modifient pas les conclusions de la théorie de l'inflation).

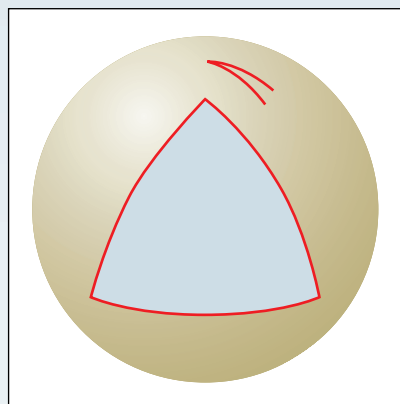
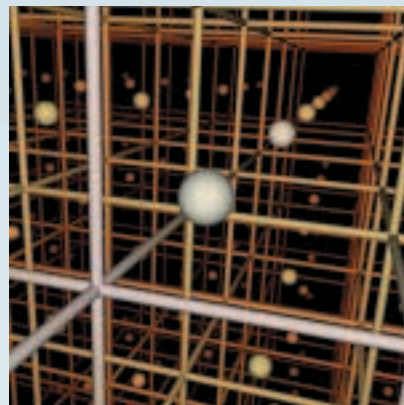
Dans ces trois géométries, les lois de la perspective diffèrent (à droite), et les structures du rayonnement cosmologique doivent apparaître différemment. Les fluctuations les plus grandes ont la même dimension absolue quel que soit le processus spécifique d'inflation. Si l'Univers est euclidien, les fluctuations les plus grandes ont une largeur d'environ un degré. Cependant, si l'Univers est hyperbolique, leur taille apparente n'est que d'un demi-degré, à cause de la déformation géométrique des rayons lumineux.

Des observations préliminaires indiquent que les rides mesurent bien un degré. Si ces résultats se confirment, on devra conclure que la théorie de l'inflation ouverte est fautive, mais attendons les prochaines observations satellitaires.

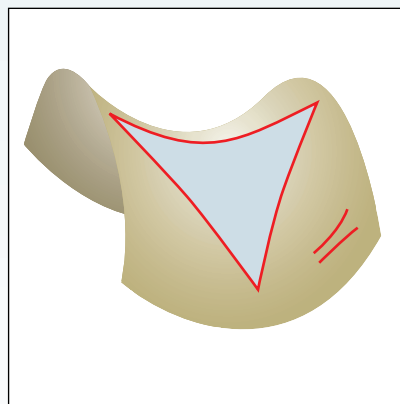
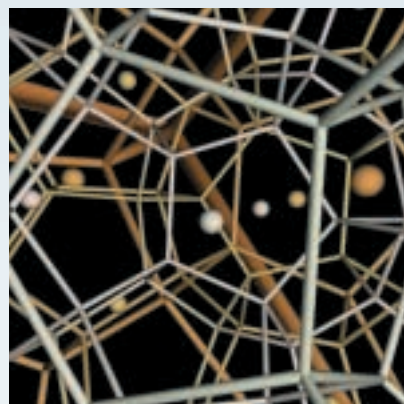
LES TROIS GÉOMÉTRIES à courbure constante sont représentées ici sous deux vues différentes : une vue de l'extérieur d'un espace à seulement deux dimensions (*colonne de gauche*) et une vue de l'intérieur qui montre les trois dimensions de l'espace comprenant un réseau régulier (*colonne de droite*). La vue extérieure montre les règles géométriques de base. La vue intérieure révèle les dimensions apparentes des objets (qui, dans ces diagrammes, sont en fait de la même taille) à différentes distances ; sur ces images, les objets et les repères sont d'autant plus éloignés qu'ils sont plus rouges.



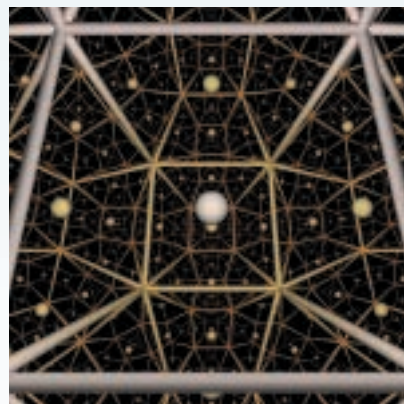
Dans un espace plat, les règles de la géométrie euclidienne s'appliquent. Le diamètre apparent de sphères identiques est inversement proportionnel à leur distance.



Dans un espace sphérique, les propriétés géométriques sont celles d'une sphère. Quand la distance augmente, les sphères semblent d'abord plus petites, leur diamètre apparent passe par un minimum, puis il réaugmente (de même, les méridiens issus d'un pôle ont une séparation maximale à l'équateur, puis se rejoignent au pôle opposé). Le maillage de l'espace représenté ici se compose de dodécaèdres (des solides réguliers à 12 faces).



Un espace hyperbolique a la géométrie d'une selle. Le diamètre apparent des sphères se réduit beaucoup plus vite avec la distance que dans l'espace euclidien. Comme les angles sont plus aigus, cinq cubes peuvent être adjacents par une arête, au lieu de quatre seulement dans l'espace euclidien.



Stuart Levy, National Center for Supercomputing Applications, et Tamara Munzner, Stanford University

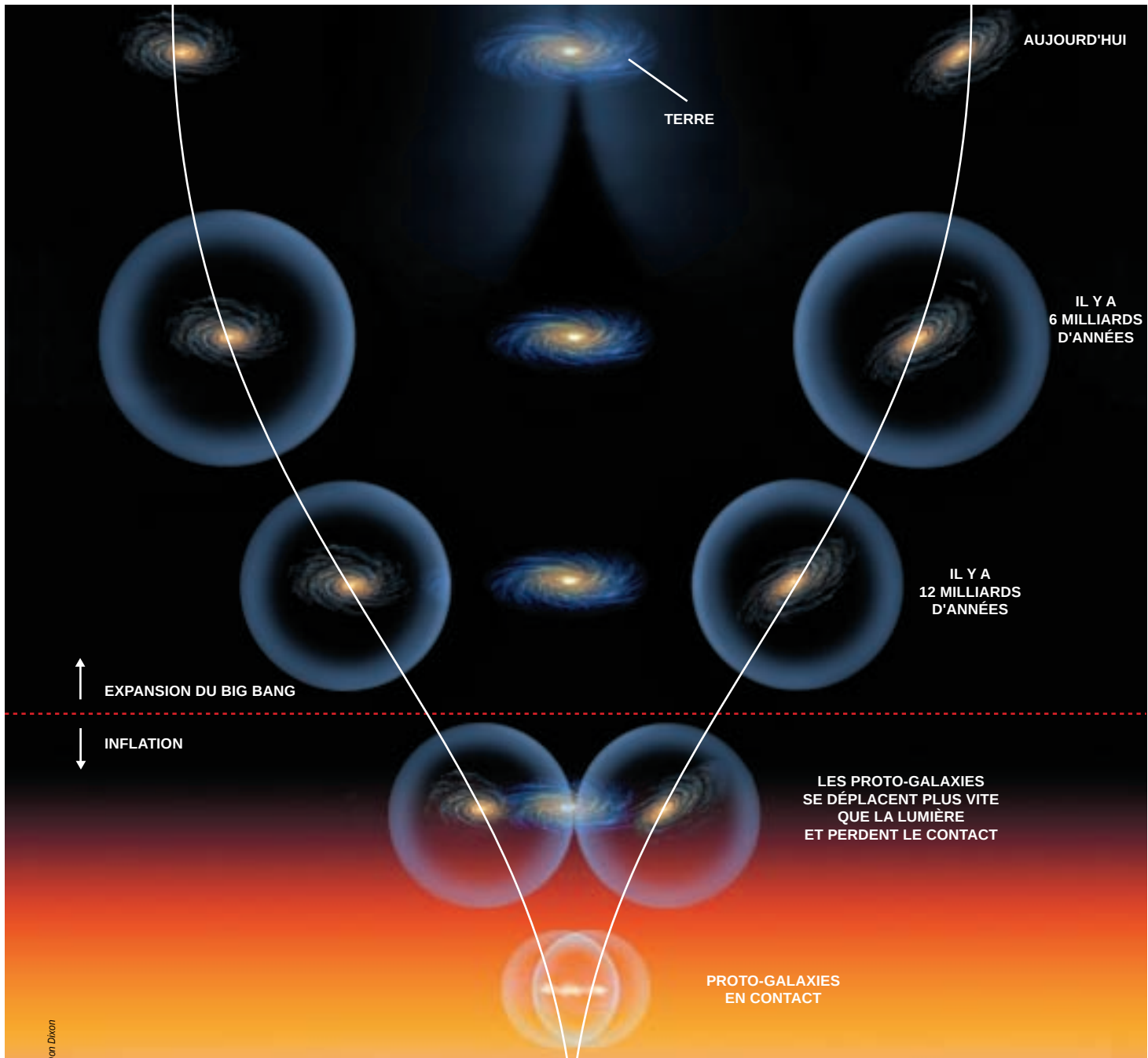
à l'intérieur de la bulle perçoivent comme un «temps» constant. Il diffère du temps mesuré en dehors de la bulle.

Comment un concept aussi fondamental que le temps peut-il être différent à l'intérieur et à l'extérieur de la bulle? Avant l'énoncé de la théorie de la relativité par Einstein, une telle différence aurait semblé impossible, mais,

selon cette théorie, la distinction entre l'espace et le temps disparaît. Ce qu'un observateur nomme «espace» et «temps» est largement une convention. Le temps représente la direction dans laquelle les choses changent et, dans la bulle, le changement est gouverné par l'inflaton.

Selon la théorie de la relativité, l'Univers a quatre dimensions : trois

d'espace et une de temps. Dès que la direction du temps est déterminée, les trois directions restantes doivent être spatiales ; ce sont les directions dans lesquelles le temps reste constant. Nos calculs montrent qu'une bulle d'univers semble hyperbolique de l'intérieur. Pour nous qui sommes dans une telle bulle, un voyage dans l'espace est



4. L'UNIFORMITÉ DE L'UNIVERS est un paradoxe important en cosmologie. Dans l'expansion normale du Big Bang (*en haut*), une telle régularité est impossible. Il y a plusieurs milliards d'années, les galaxies de régions opposées du ciel ont commencé à briller. Malgré l'expansion de l'Univers, leur lumière nous a finalement atteints dans la Voie lactée. Les hommes, observant ces galaxies à l'aide de télescopes, ont remarqué qu'elles paraissaient très semblables. Pourtant la lumière d'une galaxie ne peut avoir atteint une galaxie distante de plus d'une quinzaine d'années-lumière. Com-

ment les galaxies de zones opposées de l'Univers ont-elles harmonisé leurs apparences sans interagir? L'inflation (*en bas*) fournit une réponse. Dans le premier quart de seconde de l'histoire cosmique, les précurseurs des galaxies se touchaient. L'Univers s'est ensuite dilaté à vitesse croissante, les séparant à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Depuis, les galaxies n'interagissent plus. Quand l'inflation a pris fin, la lumière a pu à nouveau aller d'une vers l'autre ; d'ici plusieurs milliards d'années, les galaxies entreront à nouveau en contact.

une trajectoire sur une hyperbole. Regarder dans le passé, c'est regarder vers la paroi de la bulle. En principe, nous pourrions regarder en dehors de la bulle et voir ce qui s'est passé avant le Big Bang, mais, en pratique, l'Univers primordial, dense et opaque, bloque la lumière en provenance de l'extérieur.

L'ouvert dans le fermé

Cette fusion de l'espace et du temps permet de loger un univers hyperbolique et ouvert à l'intérieur d'une bulle sphérique fermée, mais en expansion. Pour un observateur situé dans la bulle, l'espace est un mélange de l'espace et du temps tels qu'ils sont perçus par un observateur situé en dehors de la bulle.

Avec le concept étrange des bulles d'Univers, les cosmologistes peuvent admettre que Ω soit différent de un. Si la théorie de la formation des bulles explique les hyperboles, elle ne précise pas leur taille. Celle-ci est déterminée par le potentiel de l'inflaton et elle varie dans le temps en accord avec la valeur de Ω . Initialement, Ω est nul dans la bulle. Sa valeur augmente pendant l'inflation et tend vers un : les hyperboles commencent avec une forte courbure et elles s'aplatissent progressivement. Le potentiel de l'inflaton impose le rythme et la durée de l'aplatissement. Quand l'inflation dans la bulle prend fin, Ω est en équilibre extrêmement près de un, mais légèrement inférieur. On peut choisir le potentiel de l'inflaton tel que la durée de l'inflation dans la bulle ait juste la bonne valeur (à quelques pour-cent près) et que la valeur actuelle de Ω soit en accord avec la valeur observée.

À première vue, le processus d'inflation en plusieurs étapes semble alambiqué, mais la conclusion principale est simple : l'uniformité et la forme de l'Univers ne sont pas nécessairement reliées. Elles résultent, au contraire, d'étapes différentes de l'inflation : l'uniformité de l'inflaton avant la nucléation de la bulle ; la forme de l'inflaton au sein de la bulle. Comme les deux propriétés ne sont pas liées, le besoin d'uniformité ne détermine pas la durée de l'inflation, qui dure juste assez longtemps pour donner aux hyperboles le degré d'aplatissement désiré.

En fait, cette formulation est une extension directe de la théorie du Big Bang. La vision habituelle de l'inflation

décrit ce qui se passe juste avant l'expansion du Big Bang. La nouvelle théorie, ou théorie de l'inflation ouverte, décrit l'étape qui a précédé. Une théorie qui décrirait des temps encore plus reculés serait nécessaire pour expliquer la création originelle de l'Univers (voir l'encadré de la page 52).

La vie dans une bulle d'Univers a un certain nombre de conséquences intéressantes. Ainsi, un observateur extraterrestre pourrait passer de l'extérieur à l'intérieur de la bulle, mais, une fois à l'intérieur, cet observateur (comme nous) ne pourrait plus en sortir, car cela nécessiterait de voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Une autre conséquence est que notre univers fait partie d'une infinité d'autres bulles immergées dans une vaste écume de faux vide en expansion éternelle. Que se passerait-il si deux bulles entraient en collision ? Leur rencontre produirait une explosion cosmique qui détruirait tout dans les bulles au voisinage du point d'impact. Heureusement, comme la nucléation des bulles est un processus extrêmement rare, un tel cataclysme est peu probable. Même s'il s'en produisait un, une partie notable des bulles resterait intacte : aux yeux des observateurs situés dans la bulle, mais loin de l'impact, l'événement apparaîtrait comme une région très chaude dans le ciel.

Comment tester cette théorie ? Certes, elle explique pourquoi l'Univers est homogène, mais les cosmologistes cherchent des prévisions quantitatives que des travaux d'astrophysique analyseraient. Les conséquences spécifiques de l'inflation ouverte ont été calculées en 1994.

Les théories de l'inflation et de l'inflation ouverte font toutes deux des prévisions fondées sur des effets quantiques, à l'origine de faibles différences

dans la vitesse d'inflation en différents points de l'espace. Quand l'inflation a pris fin, l'excès d'énergie qui subsistait dans le champ d'inflation a pris la forme de rayonnements ordinaires et a provoqué l'explosion du Big Bang. Si la durée de l'inflation a varié selon les points de l'espace, la quantité d'énergie résiduelle a également varié, tout comme la densité de rayonnement.

Le rayonnement cosmologique diffus fournit un instantané de ces fluctuations. Selon l'inflation ouverte, il a été perturbé non seulement par les fluctuations qui existaient à l'intérieur de l'Univers, mais aussi par celles qui naissaient hors de la bulle et se propageaient à l'intérieur. D'autres fluctuations auraient été créées par des imperfections de la nucléation de la bulle. Ces caractéristiques devraient être les plus notables aux échelles les plus grandes : elles nous permettraient de regarder en dehors de notre bulle d'Univers. En outre, l'inflation ouverte devrait avoir d'autres conséquences, purement géométriques (voir l'encadré de la page 55).

Avec la précision actuelle des observations astronomiques, on ne peut savoir si les prévisions de l'inflation ouverte sont mieux vérifiées que celles de l'inflation classique. On ne pourra trancher qu'avec les mesures du *Détecteur d'anisotropies micrométriques*, un satellite que la NASA lancera à la fin de 2000. Un dispositif européen plus perfectionné, nommé *Planck*, devrait être lancé en 2007. Ces satellites effectueront des observations semblables à celles du satellite *COBE*, qui a mesuré le rayonnement cosmologique diffus il y a une dizaine d'années, mais avec une bien meilleure résolution. Si aucune théorie existante ne convenait, les cosmologistes devraient alors trouver de nouvelles idées pour décrire les événements des tout premiers moments de l'Univers.

Martin BUCHER est chercheur à l'Université de Cambridge. David SPERGEL est professeur d'astrophysique à l'Université de Princeton.

Alan GUTH et Paul STEINHARDT, *L'Univers inflatoire*, in *Pour la Science*, juillet 1984.

Eugene F. MALLOVE, *The Self-Reproducing Universe*, in *Sky & Telescope*, vol. 76, n° 3, pp. 253-256, septembre 1988.

P. JAMES, E. PEEBLES, David SCHRAMM, Edwin TURNER et Richard KRON, *L'évolution de l'Univers*, in *Pour la Science*, décembre 1994.

Andrei LINDE, *L'Univers inflatoire auto-reproducteur*, in *Pour la Science*, janvier 1995.

Martin BUCHER, Alfred S. GOLDBABER et Neil TUROK, *Open Universe from Inflation*, in *Physical Review D*, vol. 52, n° 6, pp. 3314-3337, 15 septembre 1995.

J. MATHER et J. BOSLOUGH, *The Very First Light : The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the dawn of the Universe*, BasicBooks, 1996.

Alan H. GUTH, *The Inflationary Universe : The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Perseus Press, 1997.

La lutte contre la grippe

GRAEME LAVER • NORBERT BISCHOFBERGER • ROBERT WEBSTER

Bientôt commercialisés, les nouveaux médicaments antigrippaux empêchent le virus de la grippe de se multiplier dans les tissus humains. Ils devraient également prévenir l'infection.

Régulièrement, une nouvelle souche du virus de la grippe se propage dans les populations humaines. La souche étant nouvelle, personne ou presque n'est immunisé contre elle. Même les personnes vaccinées ne sont pas protégées ; les vaccins protègent seulement contre les souches connues que les biologistes ont utilisées pour mettre au point les préparations vaccinales. Ne rencontrant aucune résistance, la nouvelle souche provoque la maladie, voire la mort, dans le monde entier.

La pire des épidémies – ou pandémie – de grippe que le monde ait connue fut celle de 1918 : elle a tué plus de 20 millions de personnes, parfois en quelques heures seulement. Ce fléau, dû au virus de la grippe espagnole, fut suivi d'épidémies de grippe asiatique en 1957, de grippe de Hongkong en 1968, et de grippe russe en 1977 (ces dénominations indiquent que l'on croyait être l'origine géographique des pandémies, mais on sait aujourd'hui que ces quatre épidémies, et peut-être bien d'autres, venaient de Chine).

Les médecins savent qu'une nouvelle pandémie peut surgir n'importe quand, et être aussi grave que celle de 1918. En 1997, quand un nouveau type de virus de la grippe atteignit 18 personnes à Hongkong, tuant six d'entre elles, les spécialistes craignirent qu'une nouvelle pandémie n'ait commencé. Les autorités locales circonscrivirent rapidement l'épidémie, en identifiant le foyer initial – des poulets, des canards et des oies contaminés –, puis en abattant toutes les volailles de Hongkong.

Aurons-nous autant de chances la prochaine fois ? Si un virus aussi dévastateur que celui de Hongkong avait frappé des régions surpeuplées du monde, 30 pour cent de la population mondiale aurait péri (sous l'action directe du virus ou à la suite d'infections bactériennes secondaires), avant qu'un vaccin ne protège ceux qui auraient échappé à l'infection : on met environ six mois pour produire un vaccin contre un variant particulier de la grippe, pour en tester l'innocuité et pour le distribuer, ce qui est beaucoup trop long pour réagir efficacement contre une pandémie galopante.

Cependant, si la pandémie redoutée ne survient pas avant un an ou davantage, on devrait disposer de traitements pour réduire les symptômes et le nombre des décès : deux médicaments contre la grippe, en cours d'essais cliniques, pourraient recevoir leur autorisation de mise sur le marché avant la fin de l'année. Ces deux substances – le zanamivir et le GS 4104 – semblent prévenir la grippe et réduire la durée et la gravité des symptômes chez les personnes atteintes.

Contrairement aux vaccins (qui préparent le système immunitaire à réagir en cas d'intrusion des virus) et aux remèdes usuels (qui calment les symptômes, mais n'agissent pas sur l'infection elle-même), ces médicaments ont été conçus pour s'attaquer directement au virus de la grippe : ils inhibent une enzyme virale essentielle, la neuraminidase, et réduisent ainsi notablement la prolifération du virus dans l'organisme. D'autres inhibiteurs

de la neuraminidase, qui n'ont pas encore été testés chez l'homme, sont à l'étude.

Deux médicaments contre la grippe, l'amantadine et la rimantadine, sont déjà commercialisés. Ils ont un autre mode d'action, mais ont surtout de graves inconvénients : ils provoquent parfois des confusions mentales et d'autres effets secondaires neurologiques, et ils sont inefficaces contre l'une des deux principales classes de virus humains de la grippe (le type B). De surcroît, les virus de la grippe semblent devenir assez facilement résistants à ces médicaments, de sorte que les personnes traitées au début d'une épidémie risquent de transmettre à d'autres personnes des variants viraux résistants, ce qui est particulièrement grave dans les collectivités, tels les hôpitaux.

Les médicaments les plus récents sont le fruit de la chance et de la logique. Leur mise au point résulte de la découverte, en 1983, de la structure tridimensionnelle de la neuraminidase. Pourtant, c'est une série de découvertes antérieures qui a permis aux biologistes de comprendre que tous les variants de la grippe ont leur talon d'Achille – une faiblesse que les médicaments exploitent.

1. LES NOUVEAUX MÉDICAMENTS (*triangles rouges*) contre la grippe bloquent le site actif d'une enzyme, la neuraminidase, « plantée » à la surface des virus de la grippe. Cette enzyme permet aux particules virales nouvellement formées de se déplacer d'une cellule de l'organisme à une autre. Dès que l'enzyme est inactivée, le virus ne progresse plus.