



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 examinons 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,

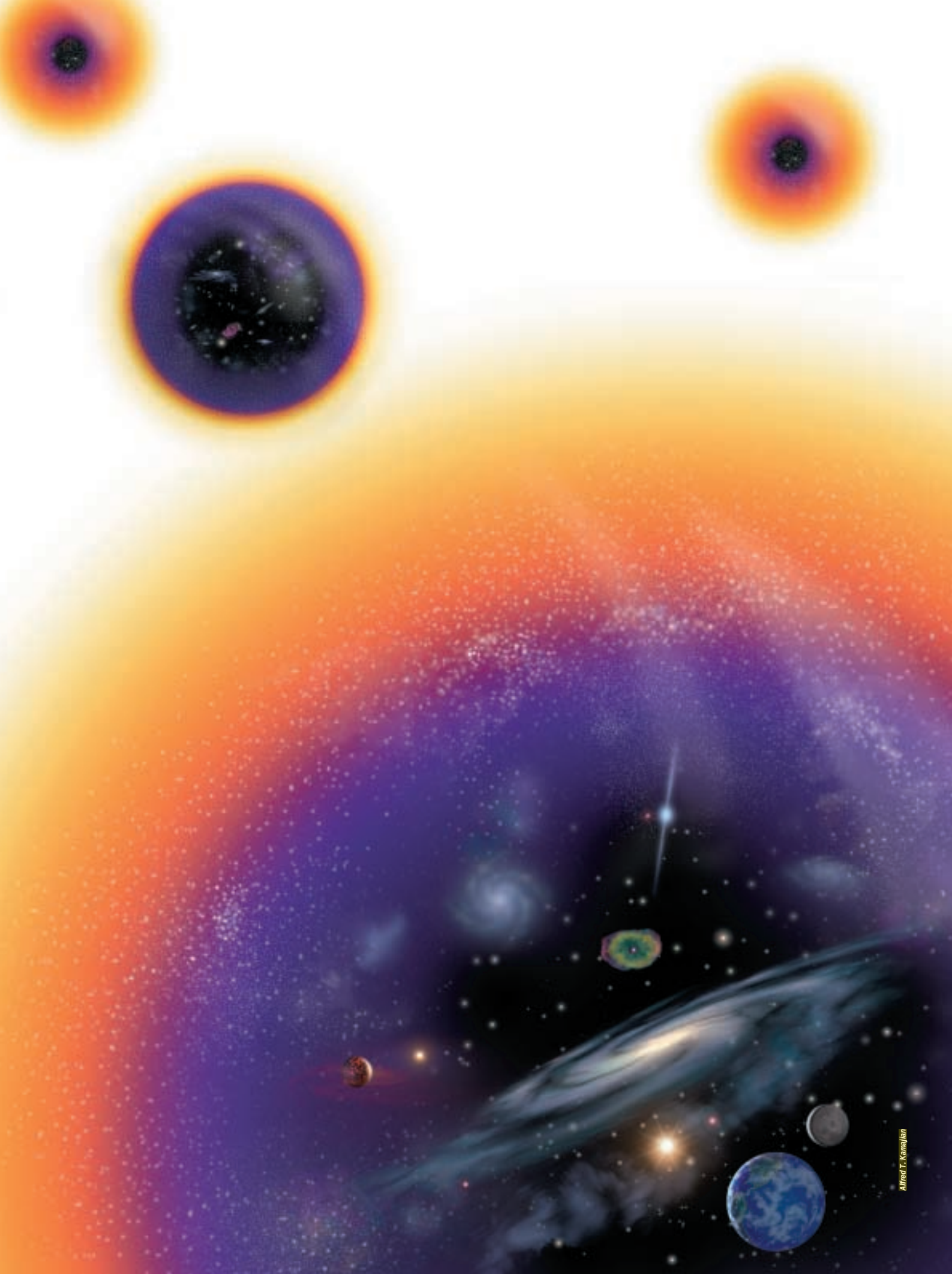
libérant un rayonnement cosmologique micrométrique diffus : l'homogénéité de ce rayonnement indique que les fluctuations de la densité de matière dans l'Univers primordial étaient inférieures à 1 pour 100 000. Pourtant, les petites concentrations de matière ont finalement crû et formé des galaxies et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