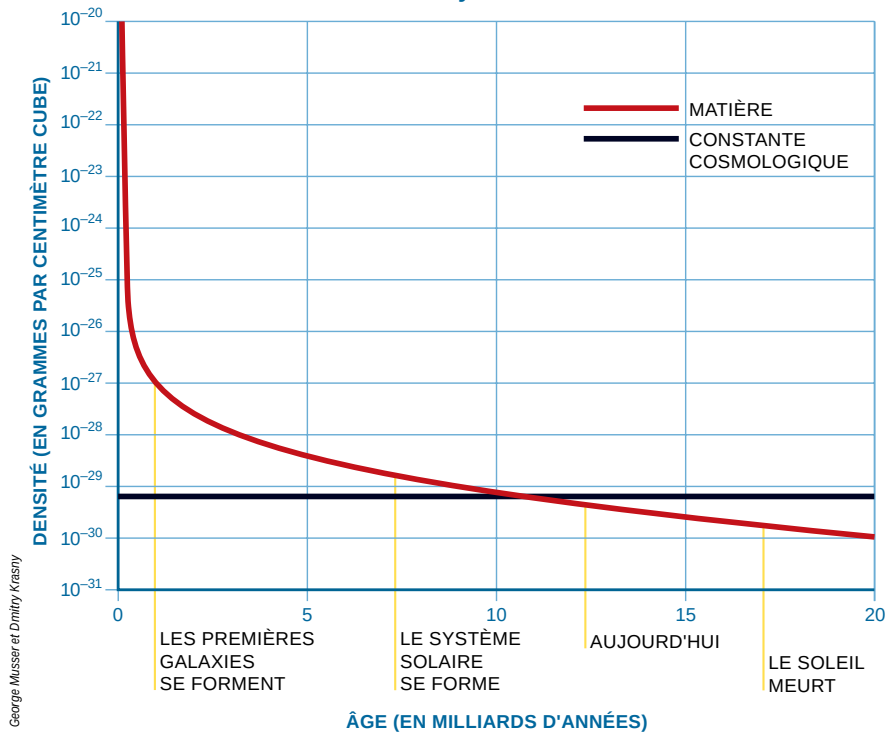


Densité moyenne de l'Univers



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^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.