

Le cinquième élément cosmique

JEREMIAH OSTRIKER • PAUL STEINHARDT

Un champ d'énergie invisible, la quintessence, domine depuis peu l'évolution de l'Univers, et en accélère l'expansion.

Avons-nous enfin découvert tous les secrets du Cosmos... à quelques détails près? Il y a encore quelques années, nous le pensions. Après un siècle de débat animé, les cosmologistes s'entendaient enfin sur les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Tout avait commencé avec du gaz et un rayonnement à une température et une densité inimaginables. Ensuite, pendant une quinzaine de milliards d'années, l'Univers s'est dilaté et refroidi. Les galaxies et les autres structures de l'espace sont nées de microscopiques fluctuations quantiques qui, à la faveur d'une brève période d'«inflation», ont atteint leur taille cosmique. Seule une faible fraction de la matière est constituée des éléments chimiques qui nous sont familiers. Le reste, la matière noire, est composé de particules élémentaires exotiques, invisibles parce qu'elles n'interagissent pas avec la lumière. Même si nombre de mystères subsistaient, au moins avions-nous déterminé les grandes lignes de l'histoire cosmique...

C'est ce que nous avons cru. Aujourd'hui, nous savons que nous n'avons découvert qu'une toute petite partie de l'histoire. Les astrophysiciens ont acquis la conviction qu'ensemble les éléments chimiques et la matière noire constituent moins de la moitié du contenu de l'Univers! L'essentiel semble consister en une nouvelle forme d'énergie qui semble attachée au vide, aux propriétés étonnantes. Omniprésente, cette «énergie du vide» n'est pas attractive, mais répulsive! Tandis que la gravitation attire les uns vers les autres les éléments chimiques et la matière noire,

formant ainsi des étoiles et des galaxies, cette nouvelle forme d'énergie se disperse dans l'Univers sous la forme d'une «brume» quasi uniforme. L'Univers est un champ de bataille où s'affrontent deux «forces», et c'est la force répulsive qui l'emporte. Graduellement, l'énergie qui est la cause de la force répulsive surpasse l'attraction due à la matière ordinaire, de sorte que l'expansion de l'Univers s'accélère. Peut-être même est-ce le signe d'une nouvelle phase d'inflation. Si c'est le cas, le futur de l'Univers sera radicalement différent de ce que les cosmologistes envisageaient, il y a seulement dix ans.

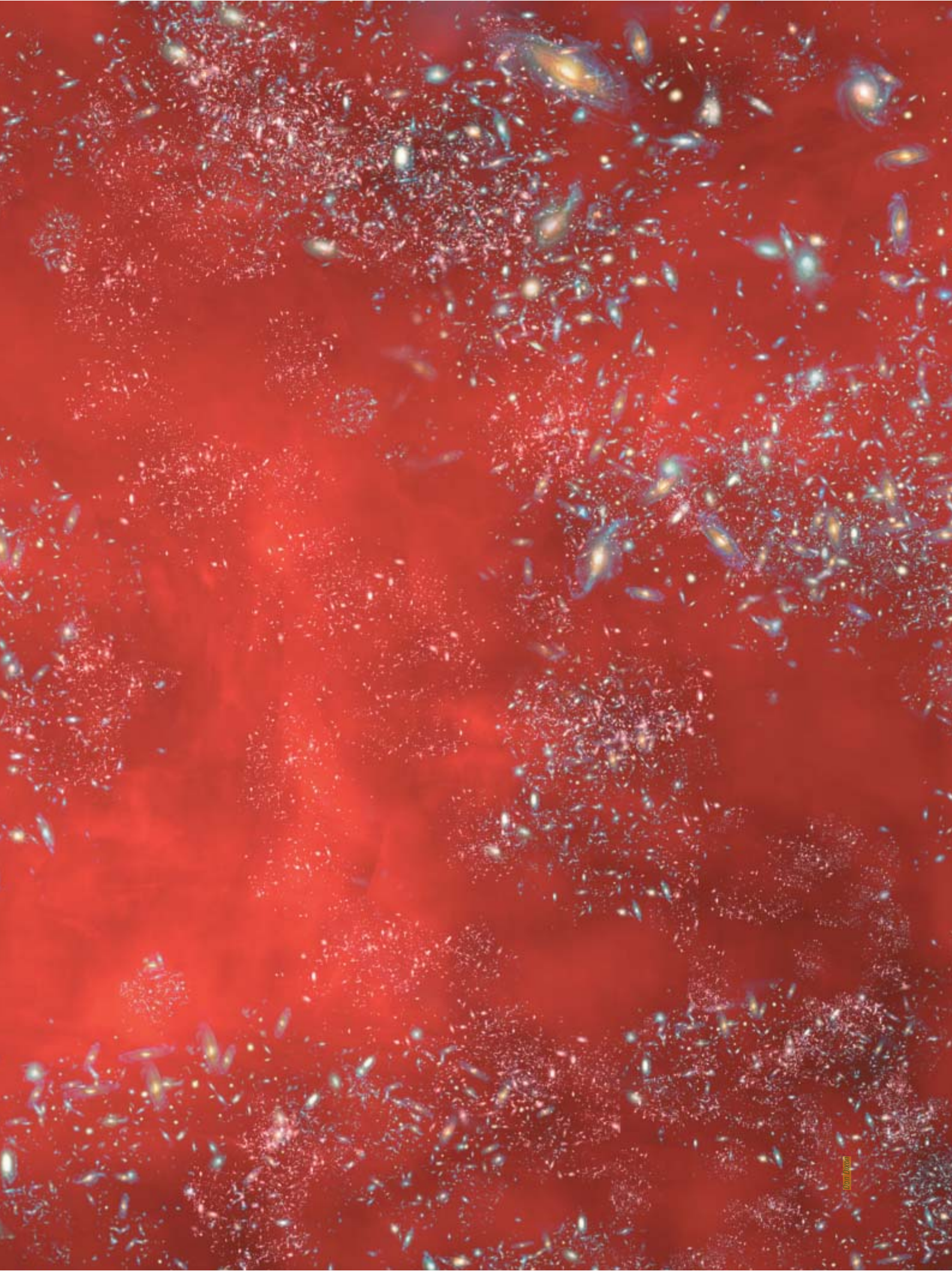
Les cosmologistes ont d'abord recherché des preuves de l'existence de cette énergie du vide inconnue. Après avoir accumulé des preuves convaincantes de son existence, ils en ont recherché l'origine. Selon l'explication la plus souvent évoquée, elle serait inhérente à la structure de l'espace. Même si une portion de l'espace était entièrement vide, dépourvue de matière et de rayonnement, elle contiendrait encore cette énergie. Cette conception de l'énergie du vide est déjà ancienne : Albert Einstein l'introduisit dès 1917, lors de sa tentative de construction d'un modèle statique de l'Univers. Comme la plupart des grands physiciens du passé, Einstein était persuadé que l'Univers est «stationnaire», c'est-à-dire qu'il n'est ni en expansion ni en contraction. Pour que cet état stationnaire soit compatible avec sa théorie de la relativité générale, il dut introduire une densité d'énergie constante associée au vide ou, selon ses propres termes, une «constante cosmologique». Il ajusta

cette constante de sorte que les forces de gravitation répulsives équilibrent parfaitement les forces de gravitation attractives dues à la matière.

Puis les astronomes découvrirent que l'Univers est en expansion. Einstein regretta alors son artifice, le considérant comme son erreur la plus grossière. Ce jugement était sans doute hâtif. Si la constante cosmologique était légèrement supérieure à la valeur proposée par Einstein, les forces gravitationnelles répulsives l'emporteraient sur les forces gravitationnelles attractives, et, par conséquent, l'expansion de l'Univers s'accélérerait.

Aujourd'hui, de nombreux cosmologistes envisagent une autre explication de l'expansion accélérée de l'Univers : la quintessence. Le terme désigne un hypothétique champ quantique en évolution dynamique proposé par Robert Caldwell, Rahul Dave et l'un d'entre nous (Paul Steinhardt), afin d'expliquer la présence partout dans l'Univers d'une nouvelle forme d'énergie créant des forces répulsives. Le terme quintessence désigne la «quinte essence», littéralement le «cinquième élément» qui, avec la terre, l'air, l'eau et le feu, composaient l'Univers selon les Grecs. Substance éphémère, le cinquième élément servait à empêcher la Lune et les planètes de s'effondrer au centre de la sphère céleste. Les trois physiciens ont repris cette notion pour désigner le champ répulsif ou «antigravitationnel» qui évite l'effondrement de l'Univers.

1. À L'ÉCHELLE OÙ LES GALAXIES ne sont que des gouttelettes, une étrange énergie du vide, la quintessence, dicte sa loi.



L'idée d'un comportement dynamique de l'Univers (avec des accélérations ou des décélérations) associé à la quintessence séduit les cosmologistes. La principale difficulté inhérente à toute théorie de la quintessence tient à la quantité d'énergie du vide présente dans l'Univers : excessive, elle aurait entravé la formation des étoiles et des galaxies dans l'Univers primitif ; insuffisante, ses effets seraient imperceptibles aujourd'hui. Au sens d'Einstein, l'énergie du vide est complètement inerte, et sa densité n'évolue pas dans le temps. Si nous supposons que la densité d'énergie du vide n'a jamais varié, comment expliquer les effets répulsifs découverts récemment ? La seule solution est d'admettre que la valeur de la constante cosmologique (de l'énergie inhérente au vide) a été ajustée une fois pour toutes au moment de la création de l'Univers. Une autre solution existe si tout ou partie de l'énergie du vide est due à la quintessence. Cette dernière interagit avec la matière et évolue dans le temps ; elle se serait naturellement ajustée pour atteindre la valeur observée aujourd'hui.

L'énergie manquante

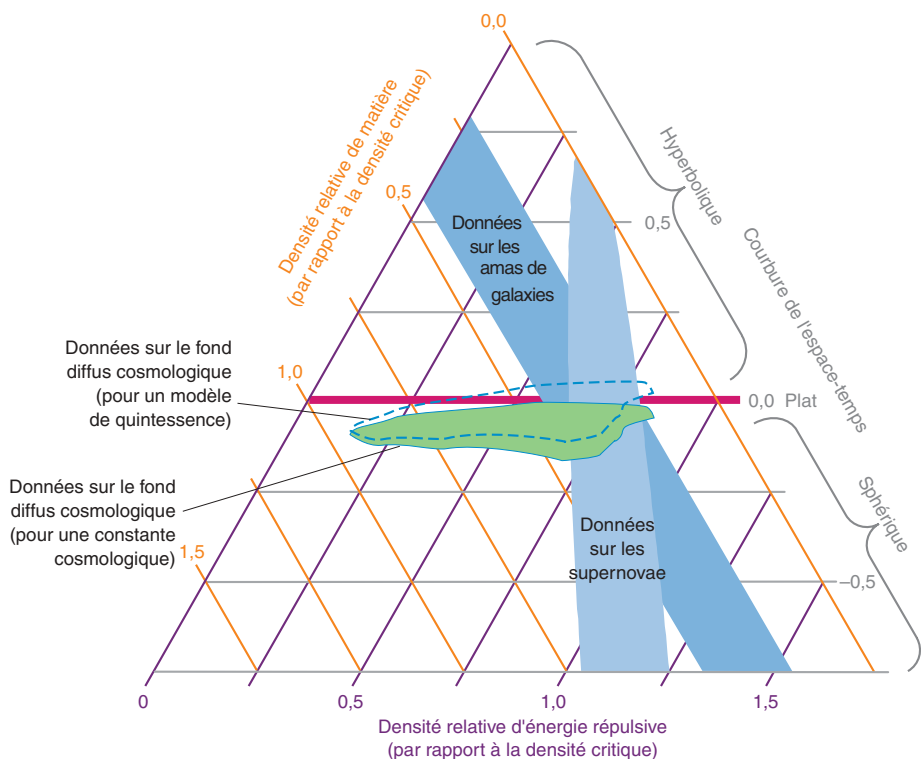
Quelle est la bonne option ? Jusqu'à présent, les physiciens des particules se sont servi de puissants accélérateurs pour découvrir de nouvelles formes d'interaction et de matière, et voilà que les observations faites dans le Cosmos mettent en évidence un nouveau type d'énergie. Cette énergie semble impossible à étudier par les méthodes classiques de la physique des particules, car elle interagit très peu avec la matière. Selon qu'elle sera inerte ou dynamique, son rôle dans la théorie unifiée de la nature dont rêvent les physiciens des particules sera différent. Eux qui ne scrutent d'ordinaire que l'infiniment petit dans leurs accélérateurs découvrent un nouveau et gigantesque laboratoire : l'Univers observé par les astrophysiciens.

L'hypothèse qu'il existe (dans le vide) une énergie aux effets répulsifs s'est petit à petit étayée au cours des dix dernières années. Un premier pas fut franchi lors de la réalisation d'un recensement le plus complet possible des galaxies et des amas de galaxies.

Diverses méthodes furent employées : observations dans le visible, dans le domaine des ondes radio et dans celui des rayons X. Cette étude confirma que la masse totale des éléments chimiques et de la matière noire ne peut expliquer que le tiers environ de la valeur de la densité d'énergie de l'Univers prévue par les théoriciens. Nommée densité critique, cette valeur est celle pour laquelle l'Univers est plat (rappelons que la courbure de l'Univers dépend de la quantité d'énergie qu'il contient).

Constatant un écart entre la valeur observée et la densité critique, de nombreux cosmologistes ont conclu que les théoriciens s'étaient trompés. La densité d'énergie observée par recensement de la matière impliquait un Univers hyperbolique et en incassante expansion. Toutefois, de nouvelles observations ont balayé cette possibilité. La répartition des zones chaudes et froides dans le fond diffus cosmologique – un rayonnement micro-onde uniformément réparti dans tout l'espace, censé être un vestige de l'explosion primordiale – a confirmé que l'espace est bien plat, et donc que la densité d'énergie moyenne de l'Univers est égale à la densité critique prévue par les théoriciens. Un simple calcul arithmétique montre alors que l'origine de deux tiers de l'énergie de l'Univers n'est pas identifiée.

Quelle que soit sa nature, cette composante n'absorbe aucune lumière et n'en émet pas, sinon elle aurait été détectée depuis longtemps. Elle ressemble donc à la matière noire, sauf en un point : les forces gravitationnelles qu'elle produit sont répulsives. Si ce n'était pas le cas, elle serait attirée par les galaxies et par les amas, où elle perturberait le mouvement de la matière visible. Or, rien de semblable ne se produit. Un autre aspect milite en faveur de l'existence d'une énergie du vide aux effets répulsifs. Son existence pourrait expliquer le « paradoxe des âges », qui gêne les cosmologistes depuis le début des années 1990. Quand on calcule l'âge de l'Univers à partir de la vitesse d'expansion cosmique actuelle, en supposant qu'elle diminue, on trouve que l'Univers aurait 12 milliards d'années. Or, on déduit de diverses mesures que certains objets célestes ont 15 milliards d'années. Toutefois, s'il existe des forces répulsives, l'expansion cosmique



Jana Brenning - Source : Paul Steinhardt

2. LES VALEURS POSSIBLES des trois caractéristiques clés de l'Univers sont représentées sur ce graphe. Si l'Univers est plat, comme le suggère la théorie de l'inflation (l'expansion explosive de l'Univers à ses débuts), les différentes observations (les surfaces en couleur) et la ligne (en rouge) représentant un univers à courbure nulle doivent se recouvrir. C'est le cas ! Notons que les données sur les anisotropies du fond diffus cosmologique donne un meilleur recouvrement dans l'hypothèse où l'énergie du vide suit un modèle de quintessence (contour en pointillés) plutôt que celui de la constante cosmologique (zone verte).