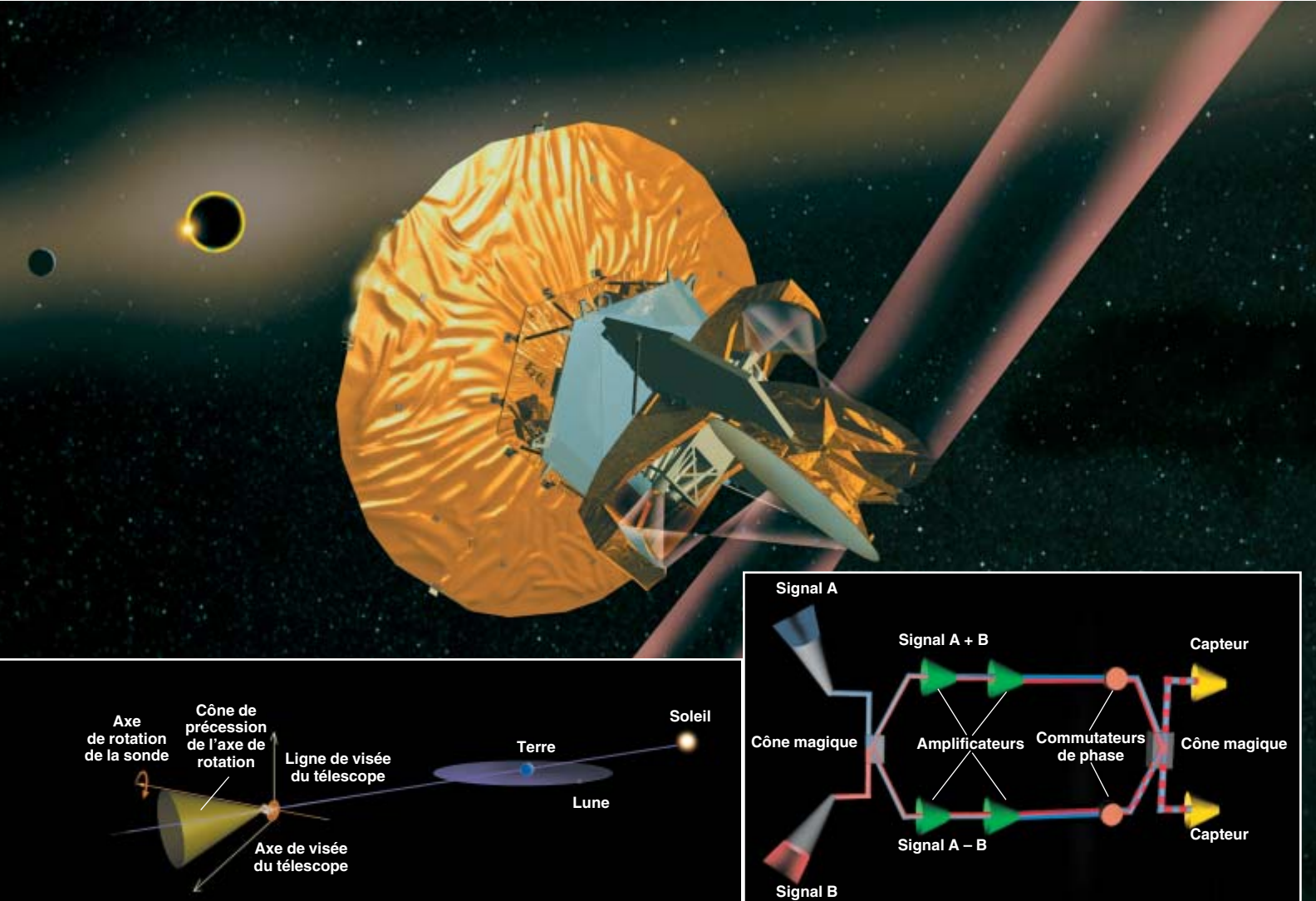




Planck, le successeur de MAP

L'Agence spatiale européenne prévoit de lancer en 2007 une mission pour compléter les résultats de MAP. Construit avec la participation des États-Unis et du Canada, le satellite *Planck* cartographiera le fond diffus cosmologique micro-onde dans dix bandes de fréquences (au lieu de cinq avec MAP). À cet effet, il emportera deux instruments : le premier observera le rayonnement de fond entre 30 et 100 gigahertz ; il est en voie de réalisation sous la direction de Nazzareno Mandolesi, de l'Institut Tesre de Bologne. Le second, dont Jean-Loup Puget, de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, supervise la construction, observera entre 100 et 900 gigahertz. Ces instruments mesureront les fluctuations de température (ou anisotropies) du fond diffus cosmologique micro-onde sur toute la voûte céleste avec une sensibilité de l'ordre de 6 millièmes de degré et une résolution angulaire de 0,1 degré. Cette sensibilité et cette résolution sont respectivement trois et deux fois meilleures que celles de MAP.

Les astrophysiciens ont sélectionné les fréquences d'observations de *Planck*, afin de détecter et de mesurer les émissions d'une autre origine que le fond diffus. Elles sont dues, par exemple, à la poussière galactique ou à certaines sources extra-galactiques lointaines, et parasitent le signal cosmologique diffus. Grâce au signal recueilli par *Planck*,

les astrophysiciens détermineront ces émissions parasites avec la plus grande précision possible. Ils obtiendront ainsi une carte d'une qualité inédite du fond diffus cosmologique micro-onde et de sa polarisation.

Planck permettra aux cosmologistes de tester les modèles qui décrivent l'Univers primordial (inflation, défauts topologiques...). De plus, les chercheurs détermineront, grâce aux données du satellite, la valeur des paramètres en fonction desquels sont formulés les différents modèles d'Univers. Ces «paramètres cosmologiques clés» comprennent notamment la constante de Hubble, le paramètre de décélération, la constante cosmologique...

Planck devrait aussi fournir un catalogue complet des amas de galaxies et des galaxies (de l'ordre de plusieurs milliers d'objets). Autant de données grâce auxquelles les astrophysiciens expliqueront mieux les processus de formation et d'évolution de ces grands objets cosmiques. Les observations faites par *Planck* leur permettront aussi de dresser une carte spectrale et spatiale de notre Galaxie, qui ira du domaine radio à l'infrarouge lointain. Les astrophysiciens s'en serviront pour étudier, notamment, les propriétés des poussières de notre Galaxie.

Nabila AGHANIM appartient à l'équipe *Planck* de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay.

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.

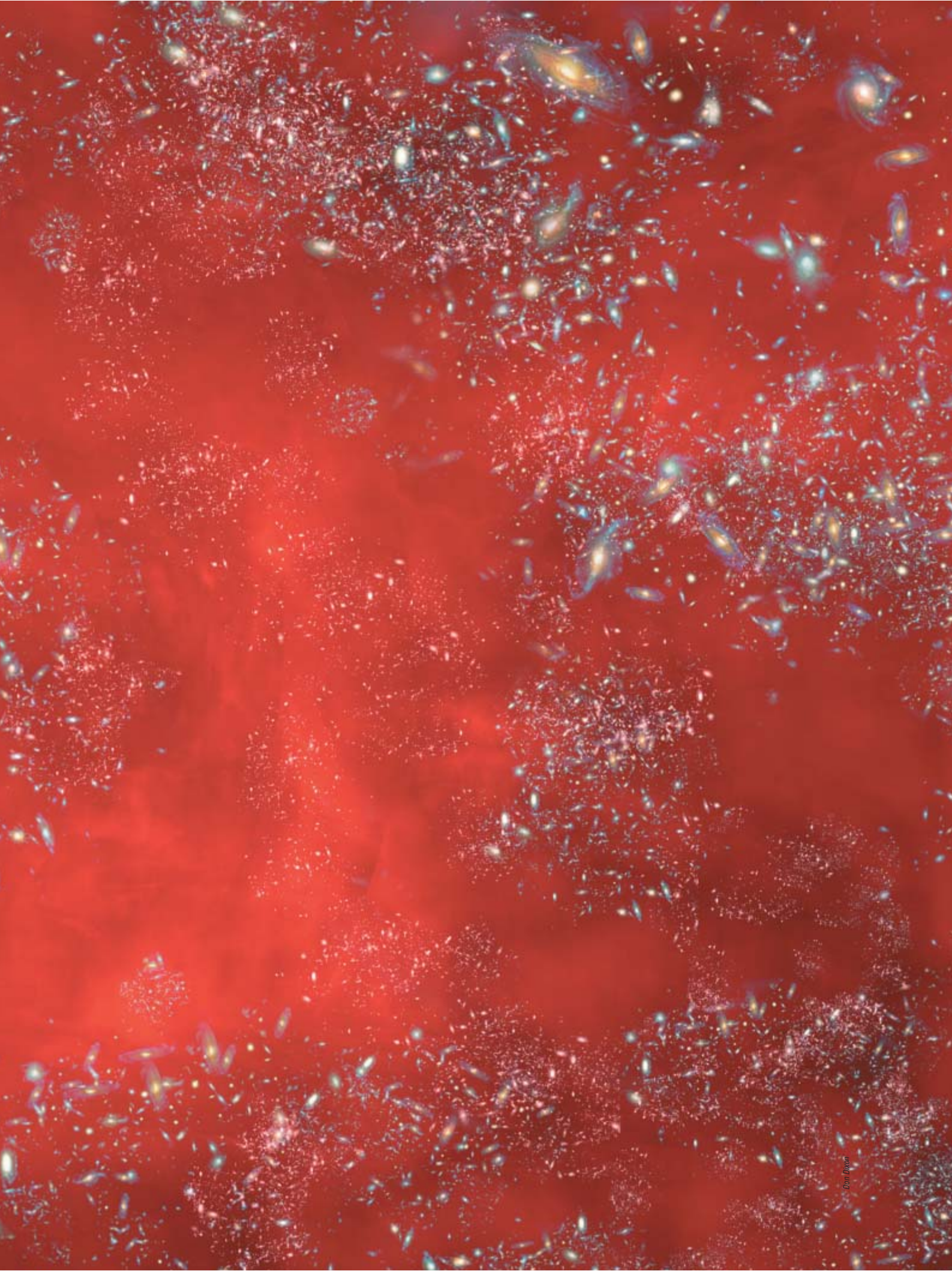
Les cosmologistes ont d'abord recherché des preuves de l'existence de cette énergie du vide inconnue. Après avoir accumulé des preuves convaincantes de son existence, ils en ont recherché l'origine. Selon l'explication la plus souvent évoquée, elle serait inhérente à la structure de l'espace. Même si 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

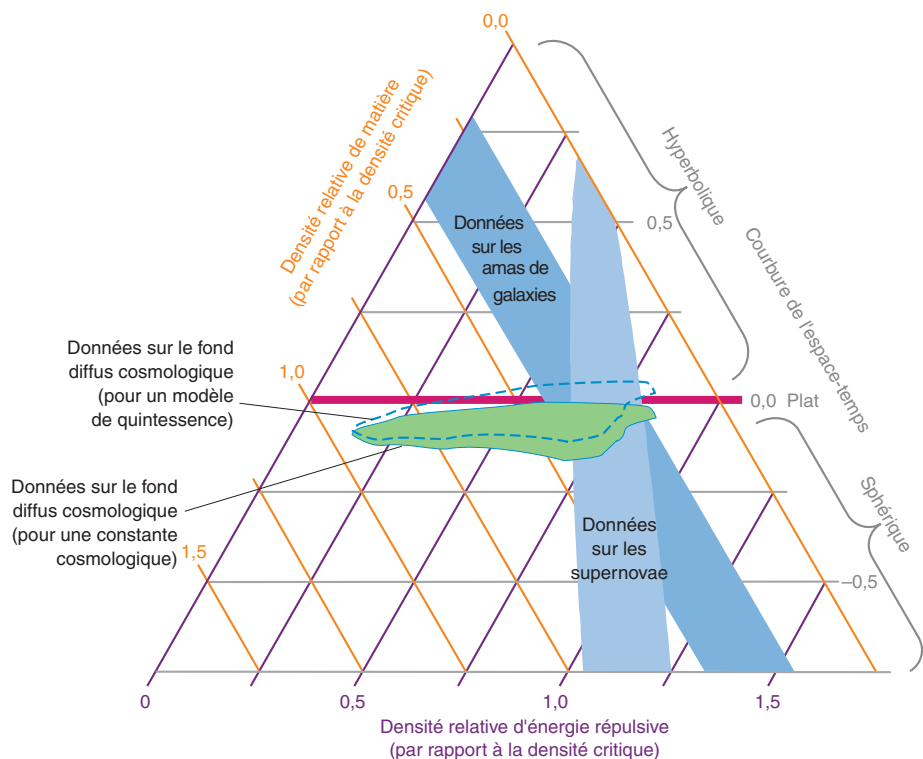
Quelle est la bonne option ? Jusqu'à présent, les physiciens des particules se sont servi de puissants accélérateurs pour découvrir de nouvelles formes d'interaction et de matière, et voilà que les observations faites dans le Cosmos mettent en évidence un nouveau type d'énergie. Cette énergie semble 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).

a pu s'accélérer, et l'Univers pourrait avoir plus de 12 milliards d'années. Les physiciens auraient ainsi une explication de l'âge apparent de l'Univers, dicté par celui des objets célestes les plus anciens.

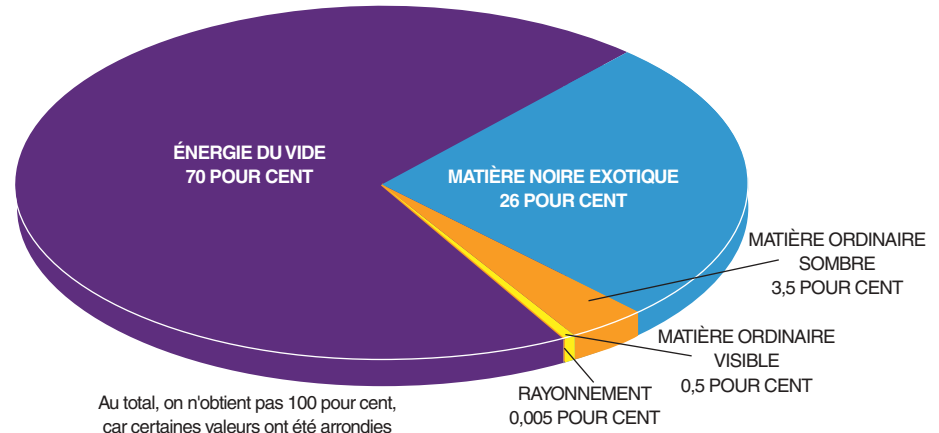
Ce raisonnement supposait que la répulsion gravitationnelle devait accélérer l'expansion de l'Univers... ce que l'on n'avait pas encore observé. Puis, en 1998, grâce à des mesures faites sur des supernovae éloignées, deux groupes d'astrophysiciens ont détecté un changement du taux d'expansion. Ils ont établi une accélération de l'Univers, et ce, exactement au rythme prédit par les partisans de l'hypothèse d'une importante énergie dans le vide.

En résumé, les arguments en faveur de l'existence d'une importante énergie du vide se résument à trois données : la densité moyenne de matière (visible et noire), la densité moyenne d'énergie du vide et la courbure de l'espace. Selon les équations de la relativité générale, la valeur de chacune de ces grandeurs doit être compatible avec un Univers à la densité critique. Les différentes combinaisons possibles sont représentées sur un graphe triangulaire (voir la figure 2). Les trois ensembles d'observations (la matière visible, le fond diffus cosmologique micro-ondes et les supernovae) correspondent à trois zones qui se recouvrent justement sur la ligne de courbure nulle. Un scénario comportant une forte énergie du vide semble donc incontournable !

De l'implosion à l'explosion

Étant donné que notre vécu quotidien nous confronte à une matière «ordinaire» qui attire, il nous est difficile de nous représenter comment le vide peut être répulsif et avoir une pression négative. Dans la loi de gravitation de Newton, la pression ne joue aucun rôle ; la gravitation dépend uniquement de la masse. Dans la loi de gravitation d'Einstein, l'intensité des forces gravitationnelles dépend de la masse, mais également de toutes les formes d'énergie, de la pression.

Le signe de la force gravitationnelle est déterminé par une combinaison de la densité d'énergie totale et de la pression. Si la pression est positive, comme dans le cas d'un rayonnement, celui de la matière visible et celui de la matière noire, alors le résul-



3. L'UNIVERS est essentiellement constitué d'énergie «répulsive», qui représente 70 pour cent de sa masse. Elle trouve son origine dans la densité d'énergie constante du vide (représentée par la constante cosmologique), ou dans celle d'un champ quantique, nommé quintessence. Les autres constituants sont la matière noire, dont on pense qu'elle est composée de particules élémentaires exotiques, et finalement la matière ordinaire (visible ou invisible) et un peu de rayonnement.

tat est positif et la gravitation est attractive. Si, au contraire, la pression est suffisamment négative pour que la résultante soit négative, la gravitation est répulsive. Les cosmologistes utilisent d'ordinaire le rapport de la pression sur la densité d'énergie, qu'ils appellent équation d'état, et qu'ils notent w . Pour un gaz ordinaire, w est positif et proportionnel à la température. Toutefois, il existe des systèmes où w est négatif. Quand sa valeur est inférieure à $-1/3$, la gravitation devient répulsive.

Dès qu'il possède une densité d'énergie non nulle, le vide est un système de ce type. Dans le vide, la loi de la conservation de l'énergie impose que la vitesse de variation de la densité d'énergie (sa dérivée par rapport au temps) soit proportionnelle à $w + 1$. Or, par définition, la densité d'énergie du vide ne varie pas, ce qui implique que la quantité $w + 1$ s'annule ; cela n'est possible que si $w = -1$. Puisque cette valeur est inférieure à $-1/3$, la pression du vide est négative.

Que signifie une pression négative ? La pression des gaz chauds est positive, c'est-à-dire que les atomes et le rayonnement exercent une poussée sur les parois du récipient, dirigée vers l'extérieur (l'effet d'une pression positive s'oppose à celui des forces gravitationnelles). Une pression négative ferait le contraire : elle attirerait les parois du récipient. Imaginons qu'une interaction entre atomes s'oppose à l'énergie cinétique et provoque l'implosion du gaz. Un tel «gaz implosif» aurait une pression négative, et le récipient qui le contien-

drait s'effondrerait sur lui-même : la pression qui s'exercerait sur la face externe des parois serait supérieure à celle qui s'exercerait sur la face interne de ces parois. Curieusement, en relativité générale, une pression négative s'oppose aux forces gravitationnelles répulsives qui lui donnent naissance.

Dans un ballon, l'effet gravitationnel d'un gaz implosif serait infime. Imaginez maintenant que l'on remplisse l'espace entier d'un tel gaz. Il n'y aurait alors plus de surface frontière ni de pression externe. Le gaz n'aurait rien à repousser, de sorte que sa pression négative n'aurait aucun effet direct. Son seul effet serait gravitationnel : il serait répulsif. Il étirerait l'espace, accroîtrait son volume et, de ce fait, la quantité d'énergie du vide. La tendance à l'expansion de l'espace-temps se renforcerait, ce qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers constatée. L'augmentation de l'énergie du vide se ferait aux dépens du champ gravitationnel.

Ces concepts peuvent sembler étranges, et Einstein lui-même les trouvait difficiles à admettre. Il considérerait l'idée d'un Univers statique, qui impose l'existence d'une énergie statique du vide (ou constante cosmologique), comme une erreur regrettable à réparer au plus vite. Las ! Les choses ne se passèrent pas ainsi. Une fois introduite, la constante cosmologique n'allait plus disparaître. Les théoriciens réalisèrent vite que les champs quantiques impliquent l'existence d'une densité d'énergie finie dans le vide, la manifestation de l'existence de

fluctuations quantiques à la faveur desquelles se créent des paires de particules «virtuelles» dans le vide. Quand on estime l'énergie du vide produite par tous les champs connus, on obtient une valeur énorme : elle serait de 120 ordres de grandeur supérieure à la densité d'énergie due à la matière. Bien qu'il soit difficile de se représenter une telle valeur, cela signifie que les particules virtuelles évanescentes produisent une densité d'énergie constante et positive, associée à une pression négative. Toutefois, si cette estimation est correcte, l'expansion serait telle que les galaxies, voire les atomes, seraient désagrégés. À l'évidence, cette estimation de l'énergie du vide était erronée.

Une improbable précision

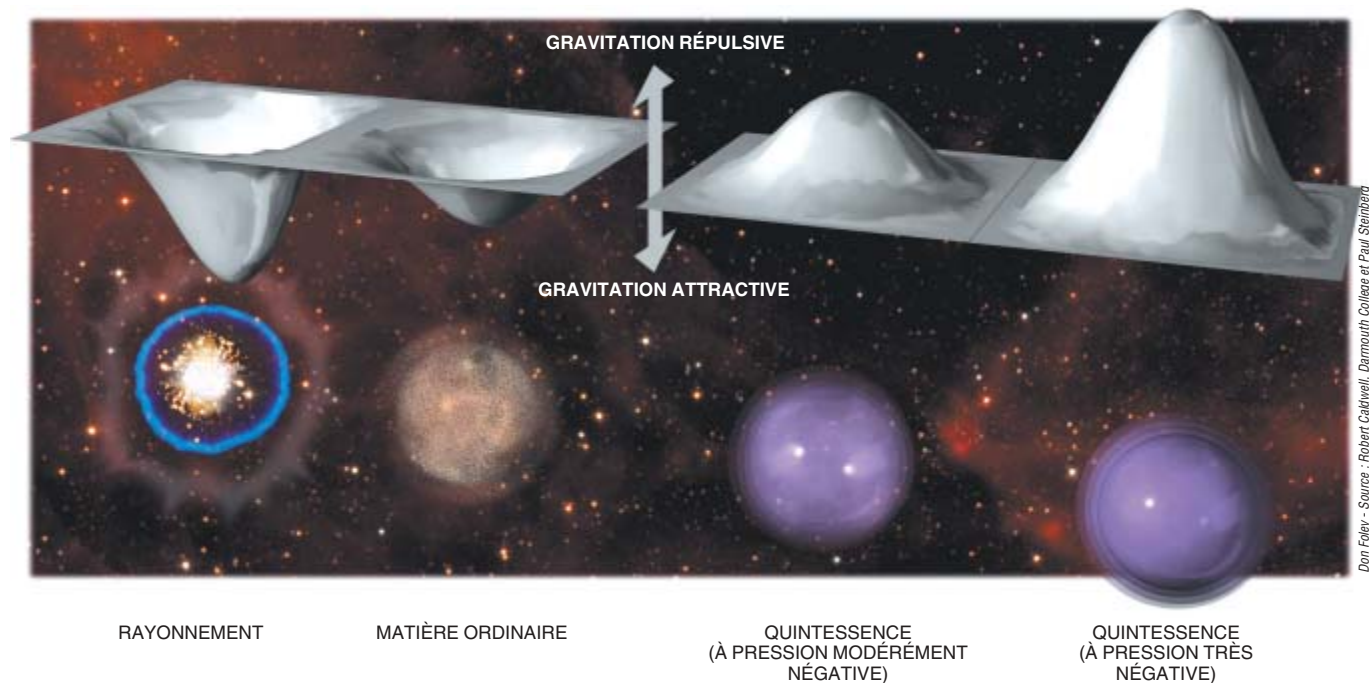
Encore fallait-il expliquer pourquoi. Selon l'une des hypothèses envisagées, une symétrie de la physique fondamentale, encore inconnue, annule des effets de grande ampleur, réduisant ainsi à l'extrême l'énergie du vide. Ainsi, les fluctuations quantiques associées à la création de paires de particules virtuelles dont le spin est un demi-entier (les quarks et les électrons, par exemple) auraient une contribution positive à l'énergie et celles associées à la création de paires de

particules à spin entier (les photons, par exemple) auraient une contribution négative à l'énergie. Les deux contributions se compenseraient. Dans la théorie dominante en physique des particules, le modèle standard, une telle compensation n'a pas lieu. Toutefois, les physiciens des particules explorent des extensions de leur modèle standard où cette compensation se produit : ces extensions sont dites supersymétriques. Seule difficulté : la supersymétrie est respectée aux très hautes énergies, mais pas aux basses énergies. C'est pourquoi les théoriciens recherchent des mécanismes susceptibles d'expliquer que la compensation subsiste à basse énergie.

Une autre approche consiste à accepter l'idée que l'énergie du vide n'est pas nulle, c'est-à-dire que le mécanisme de compensation ne serait pas parfait. Les fluctuations quantiques à l'origine de l'énergie du vide ne s'annuleraient pas parfaitement, mais laisseraient un résidu de 120 ordres de grandeur plus petit que la valeur prévue par les physiciens des particules à partir de tous les champs connus. Dans ce cas, l'énergie du vide pourrait effectivement représenter les deux tiers manquants de l'énergie de l'Univers. Quel mécanisme pourrait réduire à ce point l'énergie du vide avec une telle précision ? Bien que l'énergie du vide

soit l'équivalent d'une énorme masse, elle est répartie dans un si vaste espace que, localement, elle représente une densité d'énergie inférieure à quatre électronvolts par millimètre cube. Pour un physicien des particules, cette valeur infime est difficilement concevable : la plus faible des forces connues dans la nature met en jeu une densité d'énergie 10^{50} fois supérieure !

Si l'on extrapole dans le passé, l'existence d'une énergie du vide conduit à une situation encore plus paradoxale. Aujourd'hui, la matière et l'énergie du vide ont des densités moyennes comparables, mais, il y a des milliards d'années, quand elles sont apparues, l'Univers avait la taille d'un pamplemousse : la matière était plus dense d'une centaine d'ordres de grandeur. En revanche, l'énergie statique du vide, c'est-à-dire la constante cosmologique, avait la même valeur qu'aujourd'hui. En d'autres termes, les phénomènes physiques qui sont à l'origine du déploiement de l'Univers auraient créé une partie d'énergie du vide pour 10^{100} parties de matière. Si ce genre de proportion est envisageable dans le cadre d'une idéalisation mathématique, il est invraisemblable en physique. Les physiciens n'admettent pas la possibilité d'un ajustage aussi fin et cherchent pour cette raison à s'affranchir de la constante cosmologique.



Don Foley - Source : Robert Caldwell, Dartmouth College et Paul Steinberg

4. SELON LA PRESSION qui règne, une quantité donnée d'énergie dans l'espace exerce une force gravitationnelle attractive ou répulsive. Quand cette pression est positive ou nulle, comme dans le cas d'un rayonnement et de la matière ordinaire, la gravitation est attractive (les creux, à gauche, représentent les puits

d'énergie potentielle associés à cette situation). La pression qui règne au sein de la quintessence est négative, de sorte que les forces gravitationnelles qu'elle engendre sont répulsives (les bosses, à droite, représentent les énergies potentielles associées à cette situation).

Travaux des champs

Heureusement, l'existence d'une énergie statique dans le vide n'est pas la seule cause qui expliquerait une pression négative. Une autre serait une forme d'énergie qui, contrairement à l'énergie statique du vide, varierait dans le temps et dans l'espace. Toutes les possibilités envisageables dans ce cadre sont regroupées sous le terme général de «quintessence». Quelle que soit la nature de la quintessence envisagée, le premier terme de l'équation d'état w n'a pas une valeur définie, mais il doit être inférieur à $-1/3$ pour que la gravité soit répulsive.

La quintessence peut prendre des formes variées. Dans le modèle le plus simple, l'énergie du champ quantique varie si lentement qu'elle ressemble, au premier abord, à une énergie statique du vide (constante cosmologique). Cette idée provient de la cosmologie inflationniste, où un champ cosmique – nommé inflaton – aurait été le moteur de l'expansion dans l'Univers primordial. Toutefois, la quintessence est bien moins forte que l'inflaton. Cette hypothèse fut étudiée pour la première fois, il y a une dizaine d'années, par trois chercheurs : Christof Wetterich, de l'Université de Heidelberg, Bharat Ratra, à l'Université du Kansas, et James Peebles, à l'Université de Princeton.

Dans la théorie quantique, les mécanismes physiques sont décrits soit en termes de champs, soit en termes de particules. Quelles seraient les caractéristiques d'une particule, dans la théorie de la quintessence ? La quintessence a une densité d'énergie si faible et évolue si lentement qu'une particule ayant la taille d'un superamas de galaxies aurait une masse quasi nulle ! C'est pourquoi la description de la quintessence en termes de champs est plus appropriée. Un champ est une distribution continue d'énergie qui associe à chaque point de l'espace une valeur numérique : l'intensité du champ en ce point. L'énergie correspondant à ce champ a une composante cinétique, qui dépend de la variation dans le temps de l'intensité du champ, et une composante potentielle, qui dépend seulement de cette intensité. Quand le champ évolue, l'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle est modifié.

Rappelons que, dans l'hypothèse d'une énergie du vide constante, les pressions négatives résultaient de la

conservation de l'énergie, selon laquelle toute variation de la densité d'énergie est proportionnelle à la somme de la densité d'énergie (positive) et de la pression. Dans le cas de la densité statique du vide, cette somme est nulle, de sorte que la pression doit être négative. Dans le cas de la quintessence, l'énergie du vide évolue dans le temps, mais suffisamment lentement pour que la pression qui règne dans le vide reste négative. Dans ces conditions, le champ associé à la quintessence a une énergie potentielle supérieure à son énergie cinétique.

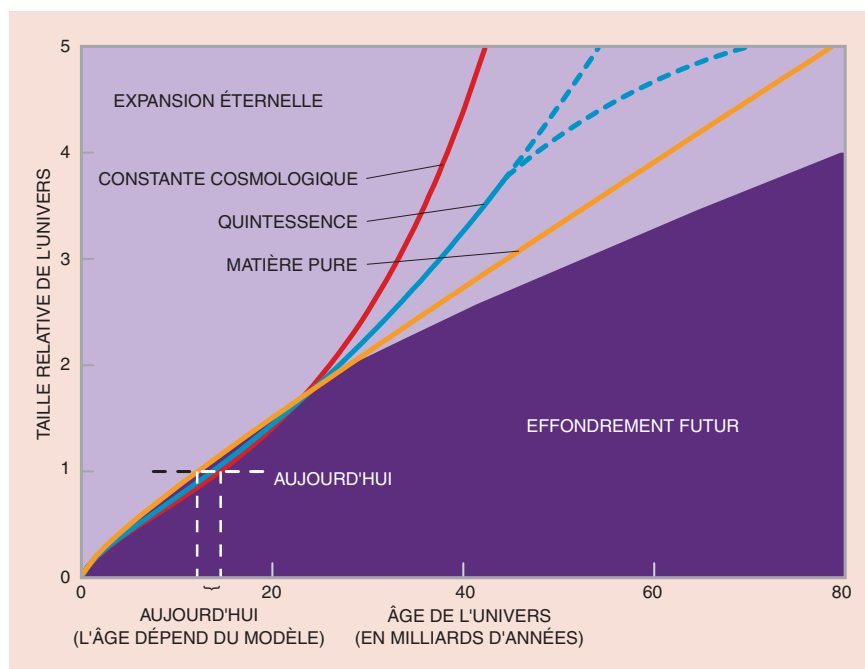
Puisque la pression associée à la quintessence est moins négative que celle associée à une densité statique du vide, l'expansion qui en découle est moins rapide. C'est grâce aux observations que l'on tranchera entre quintessence et densité statique du vide. Aujourd'hui on constate que la quintessence s'accorde mieux avec les données disponibles, mais la différence n'est pas significative. Les deux théories diffèrent aussi par le fait que, contrairement à un vide statique, le champ de quintessence subit diverses évolutions complexes. Ainsi, la valeur du rapport w peut être tour à tour positive, puis négative, puis à nouveau

positive... Elle peut aussi varier d'un endroit de l'Univers à l'autre. Ces variations sont certainement infimes, mais l'étude du fond diffus cosmologique devrait les révéler.

De surcroît, le champ de quintessence peut aussi être perturbé. Des ondes s'y propagent exactement comme les ondes sonores dans l'air. Les cosmologistes traduisent cette idée dans leur jargon en parlant de la «mollesse» de la quintessence, par opposition à la rigidité de la constante cosmologique d'Einstein. Notons que toutes les formes d'énergies connues sont plus ou moins «molles», et tolèrent la propagation d'ondes. Sans doute la densité d'énergie constante (rigide) du vide n'est-elle qu'un cas idéal, qui n'existe pas dans la nature. Un Univers où la quintessence aurait un rapport w proche de -1 représente peut-être l'approximation la plus raisonnable.

La quintessence et les «branes»

Présenter la quintessence comme un champ est une première étape, mais quelle serait l'origine de ce champ ? Les physiciens des particules expliquent divers phénomènes, de la



5. L'EXPANSION DE L'UNIVERS suit un rythme différent selon la forme d'énergie qui prédomine. Si la matière domine, l'expansion de l'Univers se ralentit (courbe en orange). Si c'est une forme d'énergie constante dans le vide (la constante cosmologique) qui domine, l'expansion de l'Univers accélère (courbe en rouge). La quintessence est un cas intermédiaire : quand elle domine, l'expansion de l'Univers s'accélère, mais moins que dans le cas de la constante cosmologique (courbe en bleu). Selon les conditions, l'accélération se poursuit ou non (courbes en pointillés).

Jana Brenning - Source : Robert Caldwell, Darrouh Colle et Paul Steinhardt

structure des atomes à l'origine de la masse, mais restent perplexes quand il s'agit de la quintessence. Les théories des particules élémentaires font intervenir de nombreuses sortes de champs, dont les comportements semblent adéquats, mais dont on connaît si mal l'énergie cinétique et l'énergie potentielle que l'on ignore lequel de ces champs, s'il y en a un, pourrait produire une pression négative.

L'une des théories exotiques les plus récentes stipule que la quintessence naît de la physique d'un Univers qui aurait des dimensions supplémentaires. L'idée semble d'autant plus intéressante que la théorie des cordes en prévoit. Depuis plusieurs années, les physiciens étudient cette théorie qui combine la relativité générale et la mécanique quantique, au sein d'un édifice théorique unifié des interactions fondamentales. La théorie des cordes prévoit l'existence de dix dimensions, dont quatre nous sont familières : les trois dimensions spatiales et le temps. Les six autres dimensions sont cachées, enroulées sur elles-mêmes, formant de minuscules sphères dont le « rayon » est trop petit pour être détecté (du moins avec les instruments à notre disposition aujourd'hui). Dans la théorie dite *M*, une version récente de la théorie des cordes, une 11^e dimension vient s'ajouter. La matière ordinaire serait confinée sur

deux « surfaces » à trois dimensions : des « branes » (pour membranes), séparées par une distance infime dans la onzième dimension.

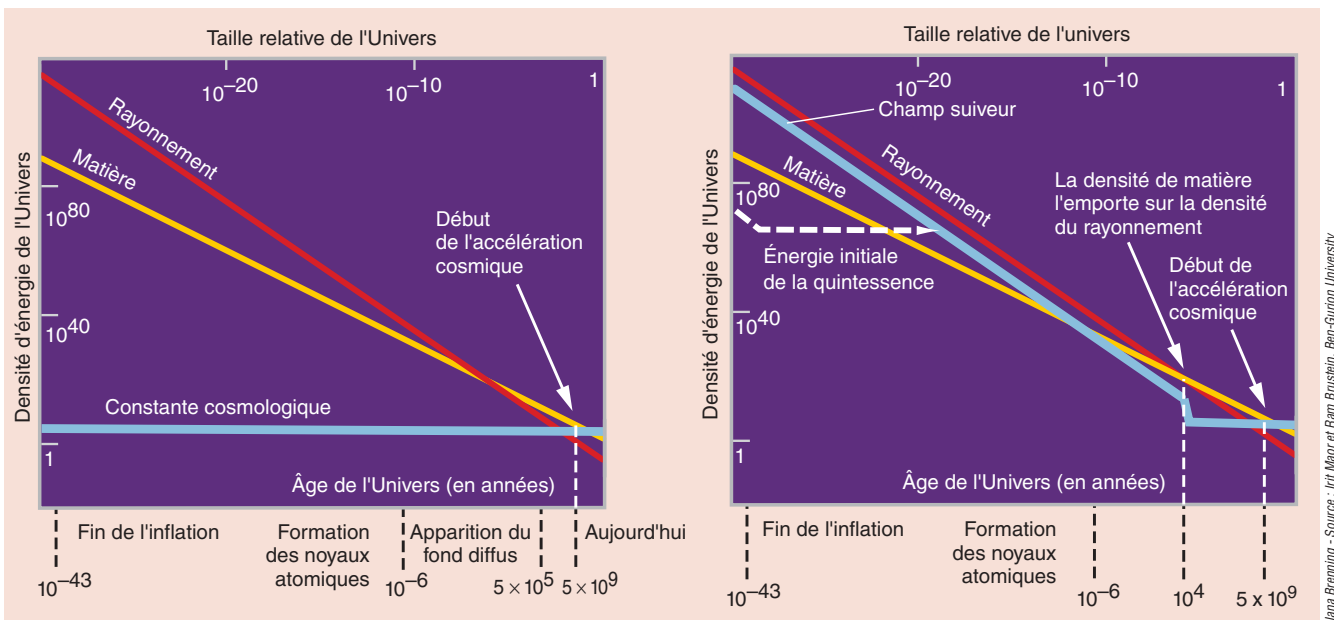
Nous ne voyons pas ces dimensions supplémentaires, mais, si elles existent, nous devrions les percevoir indirectement. En fait, la présence de dimensions enroulées ou de branes proches aurait le même effet qu'un champ. La valeur que prend le champ en chaque point de l'espace correspondrait au rayon des branes ou à leur distance. Or, sous l'effet d'un champ de quintessence, des branes devraient précisément évoluer avec l'expansion de l'Univers.

Quelle coïncidence !

Quelle que soit l'origine de la quintessence, elle a une propriété qui peut résoudre l'épineux problème de l'ajustement fin évoqué plus haut : elle est dynamique. Une façon d'envisager le problème est de se demander pourquoi l'accélération cosmique a commencé à un moment particulier de l'histoire de l'Univers. Créée quand l'Univers n'avait que 10^{-35} seconde, l'énergie du vide, qui engendre les effets gravitationnels répulsifs, a dû rester dans l'ombre pendant près de dix milliards d'années, soit pendant une durée 10^{50} fois supérieure à celle qui a précédé sa naissance ! C'est seu-

lement à ce moment-là que son effet gravitationnel aurait dépassé celui de la matière et que l'accélération de l'expansion de l'Univers se serait enclenchée. Est-ce une coïncidence que l'expansion de l'Univers accélère au moment même où des créatures pensantes apparaissent, c'est-à-dire nous ? Pourquoi l'évolution de la matière (vivante) et celle de l'énergie du vide semblent-elles liées ?

Si c'est la nouvelle forme d'énergie observée par les cosmologistes qui détermine la constante cosmologique, la coïncidence est presque inexplicable. Certains proposent une explication centrée sur l'homme : peut-être notre Univers n'est-il qu'un univers parmi une multitude d'autres, et la densité d'énergie du vide aurait des valeurs différentes, mais fixes dans chacun d'eux. Les Univers dont la densité d'énergie est très supérieure à quatre électronvolts par millimètre cube sont peut-être fréquents, mais ils subissent une expansion trop rapide pour former des étoiles et des planètes, ou favoriser la vie. Les Univers dont la densité d'énergie du vide est beaucoup plus faible semblent rares et improbables. Par hasard ou parce que c'est le nôtre, notre Univers aurait la densité d'énergie optimale. Ce n'est que dans ce « meilleur des mondes possibles » que des créatures intelligentes, capables de méditer sur la



6. SI L'ÉNERGIE DU VIDE EST STATIQUE (c'est l'hypothèse de la constante cosmologique), la densité d'énergie du vide doit être ajustée de façon ultrafine pour reproduire le fait qu'elle a récemment dépassé la densité d'énergie de la matière (à gauche). En revanche, si la quintessence est constituée d'un « champ suiveur » (à droite), sa

densité converge vers une même ligne (en bleu), quelle que soit sa valeur au début de l'Univers. La courbe de la densité du champ suiveur suit celle de la densité de rayonnement jusqu'à ce que la densité de matière prenne le dessus. Cela a pour effet de geler l'évolution du champ suiveur et de déclencher l'accélération cosmique.

nature de l'Univers, existeraient. Un argument conçu pour expliquer la présence de l'homme dans l'Univers est-il toutefois acceptable?

Les champs dits «suiveurs», une autre forme de quintessence, fournissent une solution plus plausible. Les équations qui les décrivent correspondent à un comportement classique d'attracteur, tels ceux que l'on rencontre dans certains systèmes chaotiques. Un champ suiveur évolue d'une façon dynamique et converge toujours vers la même solu-

tion quelles que soient les conditions initiales. Par analogie, une bille lancée dans une baignoire vide finit toujours par tomber dans le trou d'évacuation de l'eau, quel que soit son point de départ. Son comportement est à la fois chaotique et fixé dans certaines limites.

De même, la densité d'énergie d'un champ suiveur n'a pas besoin d'être fixée dès l'origine, car le champ suiveur s'ajuste vite de lui-même à cette valeur. Il se retrouve sur une trajectoire, où sa densité d'énergie reste

un rapport quasi constant de la densité de rayonnement et de matière. En ce sens, la quintessence imite la matière et le rayonnement, bien que sa composition soit totalement différente. Ce phénomène de mimétisme se produit parce que la densité de rayonnement et de matière détermine le taux d'expansion cosmique qui, à son tour, impose les variations de la densité de quintessence. En y regardant de plus près, on s'aperçoit que ce rapport croît lentement. Ce n'est qu'au bout de plusieurs millions, voire

La quintessence en physique des particules

Pour les physiciens des hautes énergies, l'existence d'une constante cosmologique non nulle est un problème déconcertant. De leur point de vue, en effet, la constante cosmologique est la densité d'énergie du vide. Cependant le vide quantique, même en l'absence de matière, contient les fluctuations quantiques de tous les champs de matière virtuellement présents dans l'Univers. Une simple estimation de la densité d'énergie qui en résulte, fondée sur les échelles de masse des particules connues, montre que la constante cosmologique (l'énergie du vide) devrait être plus de 100 ordres de grandeur supérieure à celle qui est observée!

Jusqu'à présent, les physiciens des hautes énergies s'accommodaient de cette situation en supposant l'existence d'un mécanisme de compensation, non élucidé, qui annulerait exactement les contributions quantiques des divers champs connus. Les observations décrites dans l'article de Jeremiah Ostriker et de Paul Steinhardt remettent tout en question. Que la constante cosmologique soit strictement nulle est une idée, qu'elle soit non nulle et incomparablement plus petite que toutes les formes d'énergie qui se rencontrent dans la nature en est une autre! C'est la structure du vide, au sens de la théorie quantique des champs, qui doit être revue.

La «quintessence» représente une tentative de réconcilier les observations cosmologiques et la physique des hautes énergies. En effet, si une forme de quintessence existe, la den-

sité d'énergie du vide est bien strictement nulle, mais l'état d'énergie minimale de l'Univers n'aurait pas encore été atteint. Le champ de quintessence serait encore en train d'évoluer vers un minimum d'énergie. Autrement dit, en plus de la matière ordinaire, des photons, des neutrinos et de la très énigmatique matière noire, l'Univers serait rempli d'un «condensat» de particules en train de s'évaporer; il jouerait le rôle d'une constante cosmologique, c'est-à-dire d'une énergie du vide constante. Malheureusement, un tel mécanisme n'est pas possible dans le cadre du modèle standard de la physique des particules.

En revanche, dans le cadre plus élaboré des théories de super-gravité ou plus généralement des super-cordes, ce mécanisme est plausible. Dans ces théories, tentatives de description de la physique des hautes énergies au-delà du modèle standard, on rencontre de nombreux champs sans manifestations concrètes (en laboratoire), mais dont la valeur dans le vide n'est pas fixée. Pierre Binétruy, de l'Université d'Orsay, a étudié cette situation et montré que les «condensats de fermions» (les fermions sont l'un des deux grands types de particules) produisent, dans certaines conditions, un potentiel semblable à un champ de quintessence.

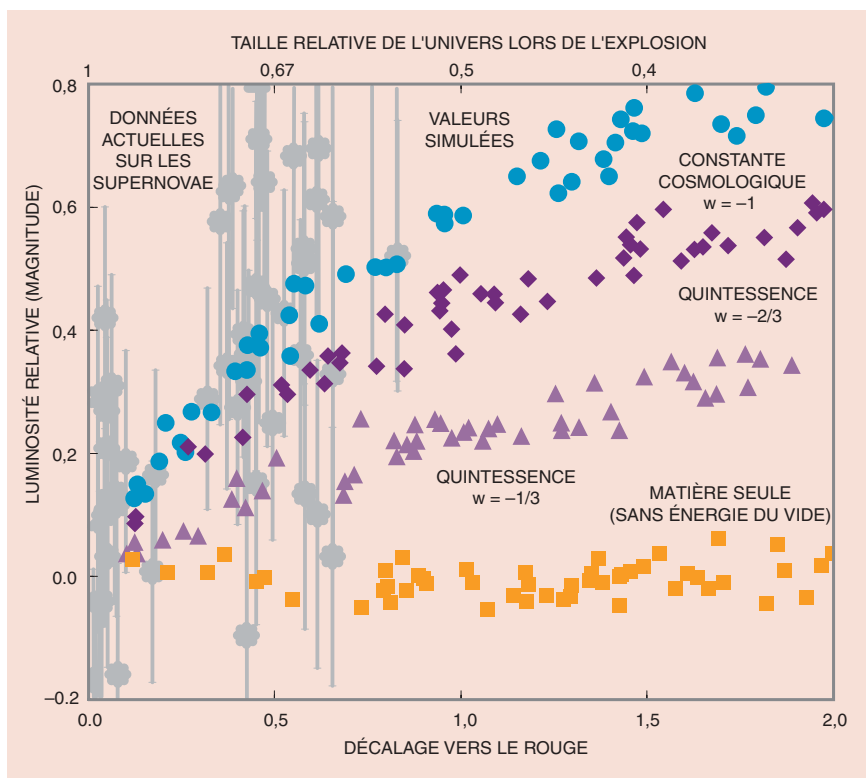
Parions que toute l'activité que suscite la quintessence ne sera pas sans «retombées» en physique des particules. Ceci n'a pas échappé aux physiciens théoriciens et aux astrophysiciens qui se sont lancés dans

une étude exhaustive de l'Univers avec quintessence. S'il existe, le champ de quintessence ne se manifeste pas seulement par son effet sur l'accélération de l'Univers mais comme l'ont souligné Philippe Brax, Jérôme Martin et Alain Riazuelo, du Centre d'Étude de Saclay et de l'Observatoire de Meudon, il aurait aussi un effet notable sur la vitesse de croissance des grandes structures du Cosmos.

Il est vraisemblable que l'étude indirecte du vide cosmologique nous renseignera sur sa nature. Nul doute que les grands projets d'observation du fond de rayonnement cosmologique, tels que *MAP* ou *Planck* y contribueront. Toutefois, c'est peut-être *DESCart* qui aura le fin mot de l'histoire.

Ce projet vise à cartographier les grandes structures de l'Univers afin d'y traquer les distorsions gravitationnelles. Lorsqu'une grande masse s'interpose entre nous et une source cosmique, le rayonnement qu'elle nous envoie en est modifié quel que soit le domaine de longueurs d'onde. Les astrophysiciens parlent d'effets de «lentille gravitationnelle». Or, l'intensité de tels effets dus à des objets très massifs, tels que des amas de galaxies ou des galaxies lointaines, reflète les propriétés géométriques globales de l'Univers. S'il existe une forme de quintessence, son existence ne devrait pas échapper aux observateurs du projet *DESCart*.

Francis BERNARDEAU,
Service de physique théorique,
CEA de Saclay



7. L'OBSERVATION DES SUPERNOVAE devrait permettre aux cosmologistes de trancher entre l'hypothèse de la quintessence et celle d'une énergie statique du vide. En effet, l'expansion cosmique accélère plus, dans cette dernière hypothèse, que si la quintessence existe. Plus l'expansion cosmique est rapide, plus les supernovae s'éloignent vite et plus leur luminosité est faible. Leur luminosité apparente est inférieure si la quintessence existe (les points violets) et supérieure si la densité d'énergie est constante dans l'espace (les points bleus). Aujourd'hui, les télescopes classiques ne suffisent pas à distinguer les différences de magnitude observées (en gris), mais une nouvelle sonde, *Super Nova Acceleration Probe*, devrait le permettre.

de milliards d'années, que la quintessence finit par s'imposer.

Pourquoi s'impose-t-elle précisément aujourd'hui ? Le début de l'accélération cosmique, qui aurait pu commencer dans un passé ancien ou, au contraire, dans l'avenir lointain, dépend du choix de certains paramètres dans la théorie des champs suiveurs. Cette constatation soulève à nouveau le problème de la coïncidence évoquée plus haut : pourquoi la présence d'une forte énergie dans le vide s'est-elle brusquement manifestée il y a peu de temps ? Un événement cosmique récent a-t-il déclenché l'accélération de l'expansion de l'Univers ? Certains astrophysiciens postulent qu'une transition se serait produite : le rayonnement diffus aurait cessé de représenter l'essentiel de l'énergie dans l'Univers, la matière prenant le dessus.

Selon la théorie du Big Bang, l'énergie de l'Univers se trouvait essentiellement sous forme de rayonnement. Puis, à mesure que

l'Univers s'est refroidi, le rayonnement a perdu son énergie plus vite que la matière. Lorsque l'Univers a atteint un âge de quelques dizaines de milliers d'années (il était encore très jeune), son équilibre énergétique s'est inversé en faveur de la matière. Ce changement a marqué le début de la domination de la matière, qui nous est favorable aujourd'hui. C'est alors que la gravitation a commencé à rassembler la matière pour former des galaxies et des structures à grande échelle. Au même moment, le taux d'expansion de l'Univers a changé.

Dans une variante du modèle des champs suiveurs, ce sont les événements déclenchés par cette inversion qui ont conduit à l'accélération cosmique actuelle. Pendant la majeure partie de l'histoire de l'Univers, la quintessence (le champ suiveur) est restée une composante insignifiante du Cosmos. Puis, quand la matière est devenue dominante, le taux d'expansion de l'Univers a augmenté, et la quintessence aurait cessé de se com-

porter ainsi. La pression de quintessence serait alors devenue négative. Sa densité n'aurait guère changé, mais aurait fini par dépasser celle de la matière qui diminue à mesure que l'Univers s'étend. Dans ce modèle, l'accélération de l'expansion de l'Univers coïnciderait avec l'apparition d'êtres intelligents, et ce ne serait pas un simple hasard. La formation des étoiles et des planètes nécessaires à la vie et la domination de la matière sur le rayonnement qui en aurait résulté aurait déclenché la transformation de la quintessence en une composante de l'Univers à pression négative.

Quel avenir pour l'Univers ?

À court terme, les cosmologistes vont tout mettre en œuvre pour détecter la quintessence, qui, si elle existe, doit avoir des effets observables. Parce que la valeur du rapport w (pression/densité d'énergie) diffère de celle qu'implique l'hypothèse de la constante cosmologique, elle produit un taux d'accélération cosmique légèrement différent. De nouvelles mesures des supernovae lointaines devraient nous permettre de distinguer les deux cas. Pour ce faire, les astronomes ont proposé deux campagnes d'observation : l'une, la sonde de mesure de l'accélération des supernovae (SNAP), sera embarquée à bord d'un satellite, tandis que l'autre, le télescope LASST (*Large-Aperture Synoptic Survey Telescope*) restera au sol. La quintessence aurait aussi un effet sur le rayonnement cosmologique diffus, que les satellites MAP (*Microwave Anisotropy Probe*) et Planck devraient détecter.

D'autres expériences devront mesurer la variation du nombre de galaxies en fonction de leur éloignement, c'est-à-dire, en termes d'astrophysiciens, de leur décalage vers le rouge. On déterminera ainsi comment le taux d'expansion de l'Univers a varié avec le temps. Une campagne de mesure au sol (DEEP pour *Deep Extragalactic Evolutionary Probe*) est prévue.

À long terme, il nous reste à faire le point sur les conséquences de ces étonnantes découvertes. Elles conduisent à une nouvelle interprétation de notre place dans le Cosmos, et celle-ci est pour le moins dégrisante !

Au commencement de tout (du moins celui qui a laissé les plus anciennes traces que nous observons), une brève période d'expansion accélérée – l'inflation – s'est produite dans les tout premiers instants qui ont suivi le Big Bang. L'Univers était alors quasiment dépourvu de matière, et un champ quantique ressemblant à un champ de quintessence (et, par conséquent, de pression négative) dominait. Pendant cette période, l'Univers a subi une inflation incomparablement plus rapide qu'au cours des 15 milliards d'années qui ont suivi cette expansion explosive. L'inflation terminée, le champ a cédé la place à un gaz chaud de quarks, de gluons, d'électrons (tous les constituants de la matière), de lumière et d'énergie du vide.

Ensuite, pendant plusieurs milliers d'années, l'Univers a été empli d'un rayonnement si dense que les atomes, et *a fortiori* les étoiles, ne pouvaient se former. Puis la matière a pris le dessus. Le rayonnement n'a alors cessé de se refroidir, la matière de se condenser en structures de plus en plus complexes. Cette époque, la nôtre, est également révolue : l'accélération cosmique est de retour. L'Univers tel que nous le connaissons, avec ses étoiles brillantes, ses galaxies et ses amas de galaxies, n'a apparemment été qu'un bref interlude. Au cours des quelques dizaines de milliards d'années à venir, la matière et l'énergie vont se diluer de plus en plus dans l'Univers. L'espace enflera alors trop vite pour que de nouvelles structures se forment. Le Cosmos deviendra de plus en plus inhospitalier pour les créatures vivantes. En bref, si l'accélération cosmique est due à la présence dans le vide d'une densité d'énergie constante, alors l'histoire de l'Univers est achevée : les planètes, les étoiles et les galaxies que nous voyons aujourd'hui sont l'apogée de l'évolution cosmique.

En revanche, si la quintessence est à l'origine de l'accélération cosmique, l'expansion de l'Univers se poursuivra éternellement, ou bien la quintessence disparaîtra, laissant la place à de nouvelles formes d'énergie et de rayonnement, capables d'occuper l'Univers. Étant donné la très faible densité de l'énergie du vide aux effets répulsifs, la matière issue de sa désintégration aura peut-être une énergie bien trop faible pour avoir des effets

notables. Selon l'un des scénarios envisagés, la disparition de la quintessence aboutira peut-être à la formation de bulles de vide. Les parois de ces bulles seraient le siège d'une activité intense. À mesure que la paroi reculerait, elle absorberait toute l'énergie libérée par la décroissance de la quintessence. Parfois, deux bulles entreraient en collision, provoquant un fantastique feu d'artifice au cours duquel des particules massives telles que des protons et des neutrons, voire des étoiles et des planètes, apparaîtraient.

Les habitants de ce Cosmos futur seraient perdus dans un monde très hétérogène, où la vie serait confinée dans quelques îlots très éloignés les uns des autres. Sauront-ils jamais que l'origine de leur Univers est le Cosmos homogène et isotrope que nous connaissons ? Devineront-ils que l'Univers a eu une vie antérieure, avant de mourir et de renaître ?

Les expériences à venir nous apporteront des éléments de réponse sur l'avenir de l'Univers. Nous saurons alors ce qui l'emporte d'une énergie statique du vide ou de la quintessence. La réponse dépendra de la place de la quintessence dans la nature. Existe-t-elle ? Joue-t-elle un rôle dans les rouages intimes de la nature, au sens de la théorie des cordes par exemple ? C'est à la frontière de l'infiniment petit et de l'infiniment grand que se trouve la réponse.

Jeremiah OSTRIKER et Paul STEINHARDT sont tous deux professeurs à l'Université de Princeton.

Jeremiah P. OSTRIKER et Paul STEINHARDT, *The Observational Case for a Low-density Universe with a Non-Zero Cosmological Constant*, in *Nature*, vol. 377, pp. 600-602, 19 octobre 1995.

Robert R. CALDWELL, Rahul DAVE et Paul J. STEINHARDT, *Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State*, in *Physical Review Letters*, vol. 80, n° 8, pp. 1582-1585, 23 février 1998.

Limin WANG, R. CALDWELL, J. Ostriker et Paul STEINHARDT, *Cosmic Concordance and Quintessence*, in *Astrophysical Journal*, vol. 530, n° 1, 1^{ère} partie, pp. 17-35, 10 février 2000.

Michael S. TURNER, *Why Cosmologists believe the Universe is accelerating*, in *Type Ia Supernovae : Theory and Cosmology*, Cambridge University Press, 2000.

Le sens caché de la cosmologie moderne

JAMES PEEBLES

Les nombreuses théories cosmologiques vous laissent perplexes? Tant mieux!

Nous vivons une époque fascinante pour les cosmologistes. Les découvertes pleuvent, les idées foisonnent et les recherches pour les valider battent leur plein. Toutes les hypothèses évoquées aujourd'hui ne peuvent être vraies ; elles se contredisent même en partie. Dès lors, comment repérer les véritables progrès? Voici comment je m'y prends.

Après d'interminables discussions, les cosmologistes ont enfin réussi à doter leur science de fondations solides. Toute une série d'indices accumulés au cours des 70 dernières années indique que l'Univers est en expansion et se refroidit. Tout d'abord, la lumière qui nous parvient des galaxies éloignées est décalée vers le rouge ; c'est bien ce que prédit la théorie si l'espace est en expansion, ce qui éloigne les galaxies les unes des autres. Deuxième indice, un rayonnement thermique emplit l'espace, comme cela doit être le cas si l'Univers a été plus dense et plus chaud dans le passé. Troisième indice : l'Univers contient des quantités importantes de deutérium et d'hélium, ce qui confirme que sa température a été bien supérieure dans le passé. Quatrième indice : les galaxies situées à des milliards d'années-lumière de nous ont les caractéristiques d'objets jeunes ; c'est normal, puisque leur lumière fut émise à une époque proche de celle où il n'y avait encore aucune galaxie! Dernier indice : la courbure de l'espace-temps semble liée au contenu matériel de l'Univers, ce qui, selon la théorie de la gravitation d'Einstein, la relativité générale, doit être vrai pour un Univers en expansion.

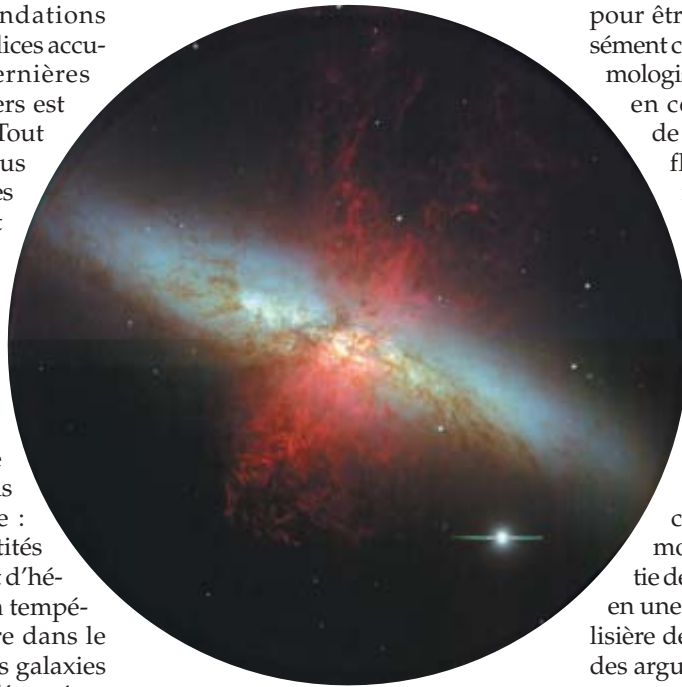
Par essence, la théorie du Big Bang décrit la façon dont notre Univers croît tout en se refroidissant. Vous l'avez remarqué : je n'ai pas parlé d'explosion : la théorie du Big Bang décrit seulement l'évolution de l'Univers, mais reste muette sur son origine.

Que ce soit en cosmologie ou dans une autre science, je compare généralement la mise au point de résultats scientifiques importants, tel celui d'un

la théorie «adverse» prônée par certains – le dernier modèle d'Univers stationnaire – ne contredit nullement la théorie d'un Univers en expansion qui se refroidit. En fait, s'il reste des controverses en cosmologie, elles concernent les «dépendances», la maison principale étant solidement bâtie.

Ainsi, on s'interroge sur l'état de l'Univers avant sa phase d'expansion. La théorie de l'inflation est la plus séduisante, mais elle manque d'«étais» pour être bien établie. Ce sont précisément ces états manquants que les cosmologistes recherchent. Si les mesures en cours confirment l'existence de signatures spécifiques de l'inflation, nous les rangerons au nombre des arguments forts en faveur de cette théorie. Toutefois, d'ici là, je ne parierai pas que l'inflation a bien eu lieu. Je ne critique pas cette théorie ; je dis simplement que la théorie de l'inflation est un courageux travail de pionnier, qui a encore besoin d'être validé.

Je suis davantage convaincu, avec d'autres cosmologistes, que la majeure partie de la masse de l'Univers consiste en une «matière noire», amassée à la lisière des galaxies. Nous avons aussi des arguments pour dire que l'infâme constante cosmologique d'Einstein ou quelque chose d'approchant serait un accélérateur de l'expansion de l'Univers. Il y a dix ans, les cosmologistes voyaient la matière noire comme une façon élégante d'expliquer le mouvement des étoiles et des gaz dans les galaxies. En revanche, la constante cosmologique déplaisait énormément à la plupart des astrophysiciens. Aujourd'hui, la majorité s'est ralliée au concept



Univers en expansion qui se refroidit, à la construction d'une charpente. Une fois un résultat expérimental obtenu, nous l'étayons à l'aide de diverses mesures croisées. Aujourd'hui, l'hypothèse d'un Univers en expansion est suffisamment étayée. De même, la théorie du Big Bang n'est plus remise en question sérieusement ; ses divers éléments s'adaptent trop bien entre eux. Même

Les principales théories cosmologiques

Concept	Appréciation	Commentaire
L'Univers est issu d'un état chaud et condensé.	Excellent	Multiples preuves convaincantes fournies par l'astronomie et de la physique.
L'Univers se comporte comme la théorie de la relativité générale le prévoit.	Très bon	A passé tous les tests jusqu'à présent, mais ils étaient peu contraignants.
La matière noire, constituée de particules exotiques, domine la dynamique des galaxies.	Bon	De nombreuses preuves indirectes, mais ces particules exotiques restent à identifier, et on doit trouver les failles des autres théories
L'essentiel de la masse de notre Univers est distribuée uniformément. Son effet est similaire à celui de la constante cosmologique d'Einstein : elle accélère l'expansion de l'Univers.	Assez bon	Les observations récentes sont encourageantes, mais de nouvelles mesures devront les confirmer, et les difficultés théoriques associées devront être résolues.
L'Univers est passé par une phase d'inflation.	Insuffisant	Théorie élégante, mais qui ne repose sur aucune preuve directe, et qui impose une extrapolation énorme des lois physiques.

Robert Gendler

de constante cosmologique ou au concept voisin de quintessence. Pour leur part, les physiciens des particules s'intéressent au défi que pose la constante cosmologique à la théorie quantique. Cette évolution rapide de la majorité des cosmologistes n'est pas le signe d'une versatilité particulière. Au contraire, elle témoigne d'une saine effervescence autour d'une structure solide, qui croît lentement. Nous sommes les élèves de la nature, et nos conceptions changent à mesure que les leçons du professeur portent leurs fruits.

Dans son cours sur l'évolution du cosmos, la nature nous donne des signes de l'accélération de l'expansion de l'Univers : la luminosité apparente des supernovae proches ou lointaines ; l'âge des étoiles les plus vieilles ; la courbure de la lumière au voisinage des masses distantes ; les fluctuations de température du fond cosmologique diffus. Ce faisceau d'indices est impressionnant, mais je reste mal à l'aise à propos de la constante cosmologique, notamment à cause de certaines contradictions possibles entre l'évolution des galaxies et leur distribution spatiale. La théorie d'un Univers en expansion

accélérée est un chantier. Si j'admire l'architecture de l'édifice qui se dessine, je ne suis pas pour autant prêt à emménager immédiatement.

Que penser des nombreux articles publiés sur l'évolution de la cosmologie contemporaine ? La recherche est un champ d'activités complexe et foisonnant, et même les spécialistes ont parfois des difficultés à avoir une vue d'ensemble. Dans ces conditions, comment peut-on trier le bon grain de l'ivraie ? On doit surtout se donner la peine de prendre connaissance des différents courants de pensée, ne pas se limiter à une seule opinion. Quand un résultat semble intéressant et qu'il est reproduit par plusieurs équipes, il commence à être

crédible surtout si les voies de sa démonstration diffèrent.

Avec le temps, l'inflation, la quintessence et les autres concepts débattus aujourd'hui seront soit intégrés dans l'édifice central de la cosmologie, soit abandonnés et remplacés par d'autres, mieux adaptés. En un sens, nous autres cosmologistes travaillons à supprimer notre propre emploi : nous serons au chômage quand la théorie de l'Univers aura été validée. Heureusement, l'Univers est... complexe, et nous ne sommes pas prêts de manquer de sujets de réflexion. Le désordre qui envahit la cosmologie n'est rien d'autre que l'agitation fertile qui règne sur tous les chantiers de construction.

James PEEBLES, professeur émérite à l'Université de Princeton, fut l'un des pionniers de l'étude du fond diffus cosmologique.

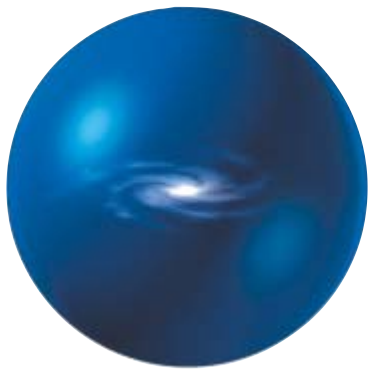
Alain BLANCHARD, *Histoire et géographie de l'Univers*, Belin-CNRS éditions, 2000.

James PEEBLES, David SCHRAMM, Edwin TURNER et Richard KRON, *L'évo-*

lution de l'Univers, in *Pour la Science*, décembre 1994.

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

Mario LIVIO et Alan SANDAGE, *The Accelerating Universe : Infinite Expansion, The Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos*, John Wiley & Sons, 2000.



Les cosmologies de repli

JOÃO MAGUEIJO

Au cas où les théories cosmologiques modernes échoueraient, il faut en rechercher d'autres.

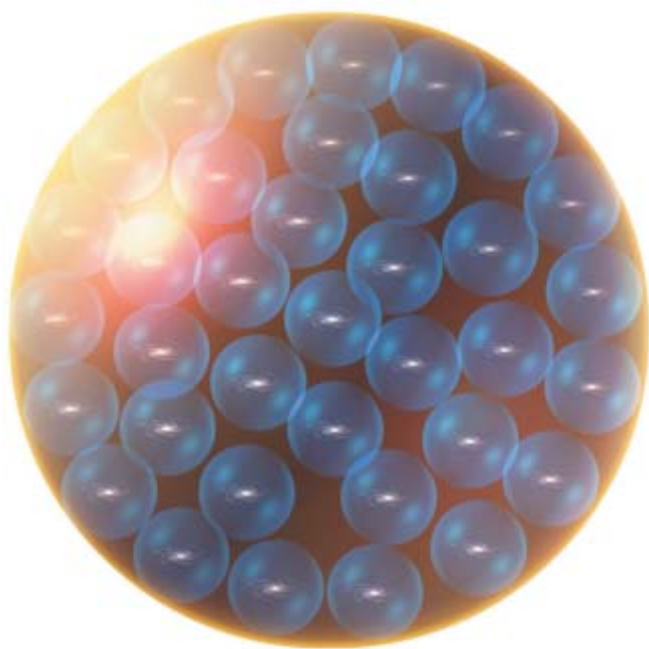
Bien sûr, la théorie de l'inflation a acquis une aura d'invincibilité, mais les théories concurrentes n'ont pas déposé les armes. Ainsi, la théorie de l'état stationnaire qui, jusqu'en 1960, était considérée par la majorité comme l'alternative la plus crédible de la théorie du Big Bang, garde une poignée de partisans. La théorie du pré-Big Bang, une variante de la théorie de l'inflation motivée par la théorie des cordes, a, elle aussi, plus d'un adepte. Toutefois, la théorie la plus provocatrice et la plus prometteuse est celle de la vitesse variable de la lumière (en anglais, *Varying Speed of Light*, VSL), sur laquelle, avec quelques collègues, nous travaillons depuis quelques années. Toutes ces théories peu orthodoxes ont au moins le mérite d'accroître encore la diversité haute en couleurs de la cosmologie. Elles sont aussi l'expression d'un doute lancinant : l'enthousiasme pour l'inflation et ses variantes ne cache-t-il pas une monstrueuse erreur d'interprétation ?

Les théories cosmologiques dominantes, telle l'inflation, reposent sur une hypothèse cruciale : la vitesse de la lumière et les autres constantes fondamentales ne varient pas avec le temps (ce sont des « constantes »). C'est sur ce postulat que repose l'inflation et ses phénoménales conséquences. Effectivement, ces constantes ne semblent pas évoluer, mais elles n'ont été testées au mieux que sur le dernier milliard d'années. En déduire que les constantes fondamentales n'ont pas changé depuis la naissance de l'Univers relève d'une extrapolation audacieuse. Que se passerait-il si, comme la température et la densité de l'Univers, les « constantes » fondamentales variaient au cours du temps ?

Notons que les physiciens ont moins de scrupules à faire varier certaines constantes que d'autres. Ainsi, la constante fondamentale de la gravitation, G , ou encore la charge élémentaire, e , ont déjà subi de semblables manipulations théoriques sans déclencher de protestations. En fait, depuis Paul Dirac et ses travaux sur la variation des constantes, dans les années 1930, jusqu'aux plus récentes des théories des cordes, la variation de G a toujours été à la mode. La vitesse de la lumière, c , au contraire, semble inviolable. C'est sans doute parce que la constance de la vitesse limite universelle est l'un des fondements de la théorie de la relativité. Cette théorie ensorcelle tellement les physiciens qu'ils ont introduit c dans tous leurs outils mathématiques. Ce n'est pas que les physiciens trouvent choquante l'idée de faire varier la vitesse de la lumière, c'est qu'ils ne peuvent même pas la concevoir.

Il serait temps que les cosmologistes perdent leurs œillères. Rappelons que la raison d'être de la théorie de l'inflation est de résoudre une difficulté de la théorie du Big Bang : le « paradoxe de l'horizon ». La lumière, ou toute autre forme d'interaction ne peut avoir parcouru qu'une distance finie depuis la naissance de l'Univers. Ainsi, lorsque l'Univers était âgé de un an, elle n'avait parcouru qu'une année-lumière. Des lignes d'horizon divisent donc l'Univers, et le séparent en régions qui ne peuvent « se voir ».

Cette vision à courte distance dans l'Univers est contraignante. Elle empêche les cosmologistes d'expliquer divers phénomènes cosmiques à partir des interactions connues en physique, au premier rang desquels l'uniformité de



Toutes les illustrations par Alfred Kamajian

1. L'UNIVERS JEUNE – il avait tout juste un an – était subdivisé en sphères isolées, séparées par des « horizons » d'une année-lumière de rayon (les sphères bleues). Aujourd'hui, l'horizon est une sphère d'environ 15 milliards d'années-lumière de rayon (la sphère rouge), qui contient un nombre incommensurable de telles poches. Ce qui intrigue les astrophysiciens, c'est que, malgré leur isolement initial, toutes ces poches sont quasi identiques aujourd'hui. La théorie de l'inflation explique cette mystérieuse uniformité, et c'est là sa plus grande réussite.

l'Univers primordial. Quand on se limite à la théorie standard du Big Bang, on ne peut expliquer l'uniformité de l'Univers primordial qu'au prix d'un ajustement ultra-fin (quasi métaphysique) des conditions initiales.

La théorie de l'inflation résout habilement cette difficulté. Elle admet que, dans un Univers en expansion, la distance qui sépare une onde lumineuse de son point de départ est supérieure à la distance qu'elle a parcourue, parce que l'expansion ne cesse d'étirer l'espace déjà parcouru. Faisons une analogie : un conducteur roule à 60 kilomètres par heure. Au bout d'une heure, il a parcouru 60 kilomètres, mais si, pendant ce temps, la chaussée s'est étirée, la distance qui le sépare de son point de départ dépasse la distance parcourue. La théorie inflationniste postule que l'Univers primordial s'est enflé si vite que la distance parcourue par la lumière a été phénoménale. Des régions qui, sinon, seraient restées séparées, ont pu communiquer, et ont adopté la même température et la même densité. Puis, quand l'inflation a été terminée, ces régions ont commencé à se séparer.

Un tel scénario aurait pu se produire aussi si la lumière se propageait dans l'Univers primordial plus rapidement qu'aujourd'hui. La « lumière rapide » a pu relier des régions de l'Univers, qui, sinon, seraient restées séparées. De cette façon, ces régions se seraient homogénéisées. Puis, avec le ralentissement de la lumière, elles auraient perdu le contact.

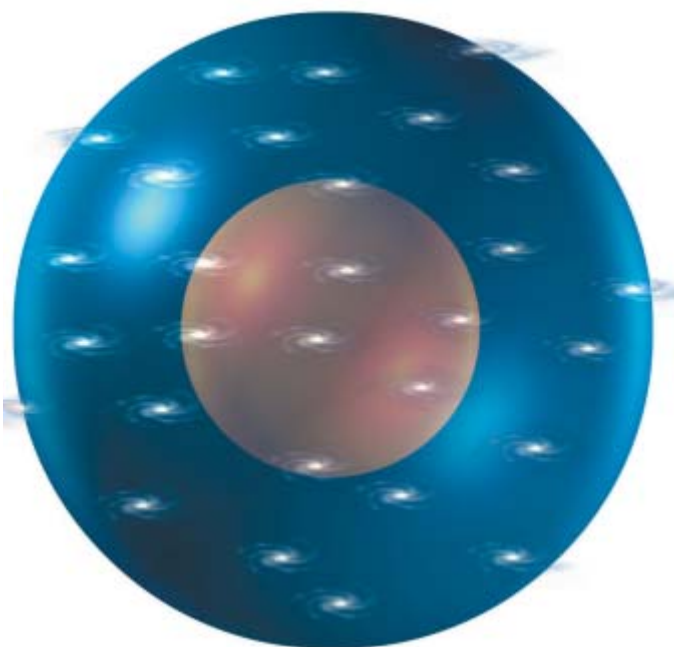
C'est autour de cette idée fondatrice qu'Andreas Albrecht, de l'Université de Californie, John Barrow, de l'Université de Cambridge, et moi-même, avons élaboré la théorie de la vitesse variable de la lumière. Contrairement à une idée reçue, notre objectif n'était pas d'ennuyer les partisans de l'inflation, dont A. Albrecht est l'un des

pères fondateurs. Nous voulions plutôt mettre en évidence les forces et les faiblesses de la théorie de l'inflation en explorant d'autres chemins.

La mise au point de notre théorie nous a naturellement obligé à repenser les fondements de la physique et leurs conséquences. Nous avons d'abord mené une attaque téméraire et d'une violence extrême contre la relativité générale, sans pour autant lui contester le mérite de résoudre plusieurs questions épineuses, notamment celle de la géométrie plane de l'Univers. Notre théorie explique, par exemple, pourquoi la constante cosmologique a aujourd'hui une valeur infime, mais non nulle. La raison en est que la densité d'énergie du vide, que représente la constante cosmologique, dépend beaucoup de la vitesse de la lumière. Une baisse de la valeur de c réduit la densité d'énergie du vide à une valeur négligeable, tandis que, normalement, elle prédomine. En revanche, dans les autres théories, on ne peut « diluer » l'énergie du vide.

Toutefois, notre théorie n'est qu'une possibilité parmi d'autres. Aujourd'hui, des astrophysiciens tentent de réconcilier la théorie de la vitesse variable de la lumière avec la relativité. John Moffat, de l'Université de Toronto, et Ian Drummond, à Cambridge, ont proposé des formulations plus prudentes de la théorie de la vitesse variable de la lumière, que les spécialistes de la relativité acceptent mieux. En fin de compte, il apparaît que le dogme d'une vitesse de la lumière constante n'est pas un postulat indispensable de la relativité. Si notre Univers est bien, comme le prévoit la théorie des cordes, une membrane tridimensionnelle dans un espace de dimension plus élevée, la vitesse apparente de la lumière pourrait varier dans notre espace à trois dimensions sans que la valeur de la « vraie » constante fondamentale ne change.

La vérification expérimentale seule dira si la nature a choisi de jouer avec la valeur de c ou si elle préfère l'inflation. Pour le moment, la théorie de la vitesse variable de la lumière est moins élaborée que celle de l'inflation, et elle devra faire des prévisions claires, sur la température du fond cosmologique diffus micro-onde, par exemple. Notons que certaines expériences laissent penser que la constante de structure fine pourrait ne pas être... constante. Or, cette constante qui caractérise les interactions électromagnétiques dépend directement de c . Ses variations seraient donc liées à celles de la vitesse de la lumière. Il reste à vérifier que les résultats de ces expériences résistent à un examen plus poussé. Il n'en demeure pas moins que l'idée d'une vitesse variable de la lumière reste un défi théorique. Elle se distingue de la théorie de l'inflation, notamment parce qu'elle remet en question les fondements de la physique. Marginale pour l'instant, elle représente une première exploration de la jungle des possibles.



2. L'INFLATION n'est pas la seule solution possible au paradoxe de l'horizon. Peut-être que, dans les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial, la lumière se propageait un milliard de fois plus vite qu'aujourd'hui, voire davantage. Cette lumière rapide illuminait des régions de l'espace plus vastes qu'aujourd'hui (la sphère bleue). À mesure que la vitesse de la lumière diminuait, l'horizon apparent (la sphère orange) s'est rétréci. D'après cette conception, nous ne voyons aujourd'hui qu'une partie de la poche originelle ; le mystère de l'uniformité apparente de l'Univers serait résolu.

João MAGUEIJO est maître de conférences en physique théorique à Londres (*Imperial College*).

Andreas ALBRECHT et João MAGUEIJO, *Time Varying Speed of Light as a Solution to Cosmological Puzzles*, in *Physical Review D*, vol. 59, n° 4, 15 février 1999.

João MAGUEIJO et KIM BASKERVILLE, *Big Bang Riddles and Their Revelations*, in *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 357, n° 1763, pp. 3221-3236, 15 décembre 1999.

João MAGUEIJO, *Covariant and Locally Lorentz-Invariant Varying Speed of Light Theories*, in *Physical Review D*, vol. 62, n° 10, 15 novembre 2000.
