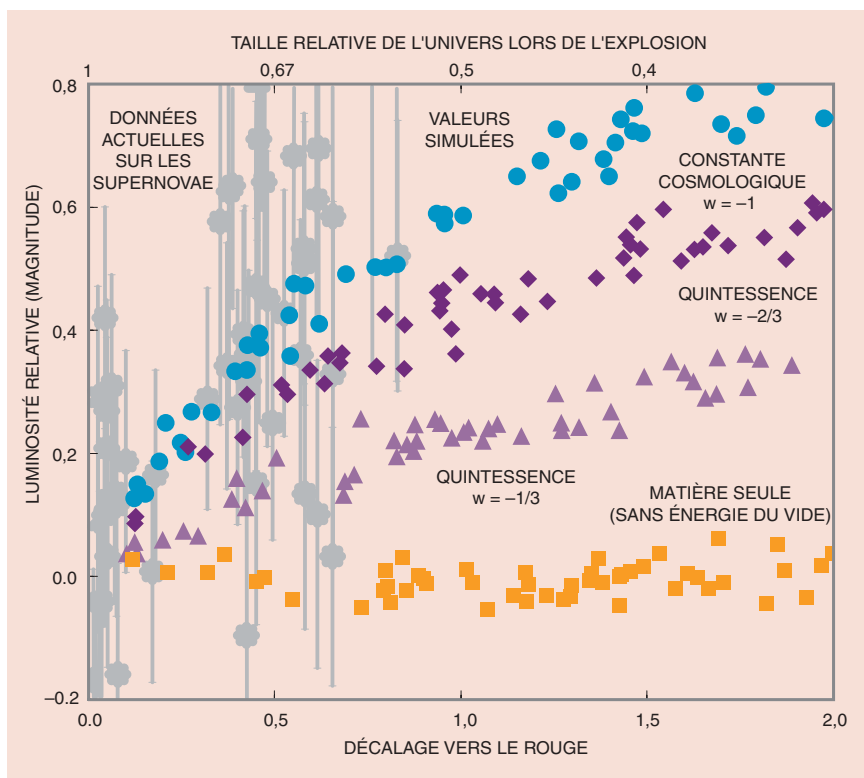




7. L'OBSERVATION DES SUPERNOVAE devrait permettre aux cosmologistes de trancher entre l'hypothèse de la quintessence et celle d'une énergie statique du vide. En effet, l'expansion cosmique accélère plus, dans cette dernière hypothèse, que si la quintessence existe. Plus l'expansion cosmique est rapide, 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.

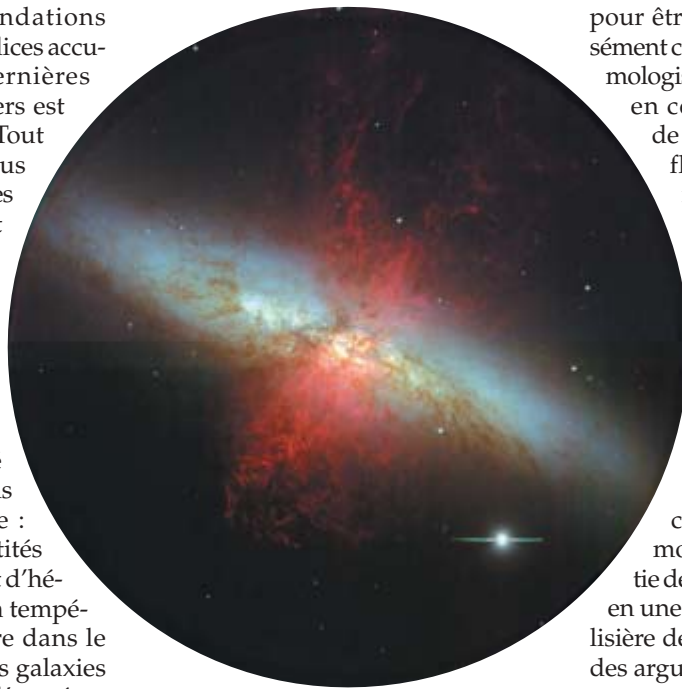
Par essence, la théorie du Big Bang décrit la façon dont notre Univers croît tout en se refroidissant. Vous l'avez remarqué : je n'ai pas parlé d'explosion : la théorie du Big Bang décrit seulement l'évolution de l'Univers, mais reste muette sur son origine.

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