

que notre espace tridimensionnel, n'est pas courbé. Toutefois, s'il avait une courbure négative, l'énorme sphère de rayonnement produite par une supernova ancienne aurait une superficie plus grande que dans un espace géométriquement plat : de ce fait, la source nous paraîtrait plus faible qu'elle ne l'est en réalité.

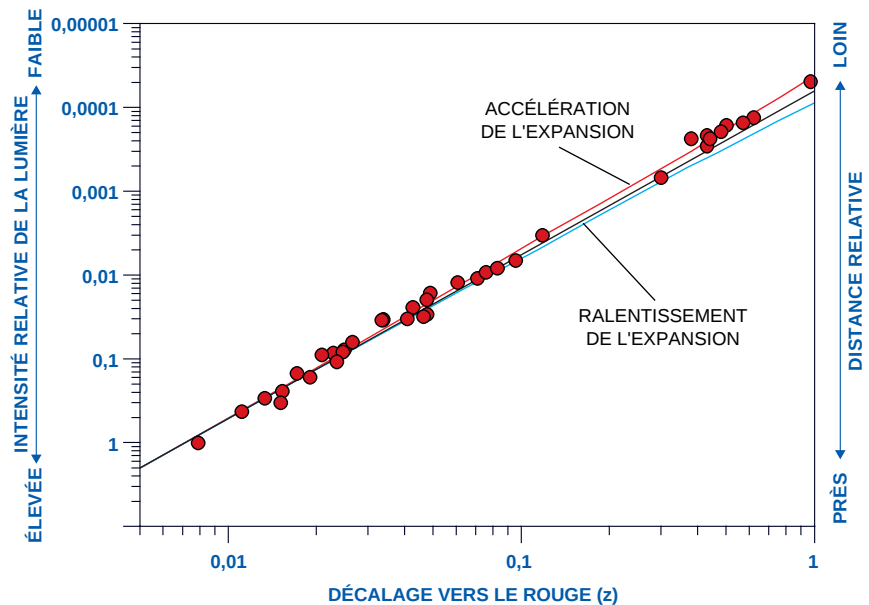
Les supernovae lointaines seraient également plus faibles que prévu si elles étaient plus loin que ne l'indique leur décalage vers le rouge. Autrement dit, les supernovae auraient un décalage vers le rouge inférieur à ce que l'on attendrait d'objets si lointains. Pour expliquer le décalage vers le rouge inférieur, les cosmologistes postulent que l'Univers s'est dilaté plus lentement par le passé qu'ils ne l'avaient prévu, tirant moins la lumière qu'il emporte.

La force

Pourquoi l'expansion cosmique ralentit-elle moins vite que prévu ? Dans un univers composé de matière ordinaire, la gravité ralentit progressivement l'expansion. Un faible ralentissement, comme l'indiquent les mesures sur les supernovae, implique une faible densité globale de matière dans l'Univers.

Bien que cette conclusion s'oppose aux idées théoriques anciennes, elle s'accorde avec d'autres indices. Par exemple, les astronomes ont observé que certaines étoiles semblent plus vieilles que l'Univers. C'est évidemment impossible, mais si le cosmos s'est dilaté plus lentement par le passé, ainsi que l'indiquent les supernovae, l'Univers est plus vieux qu'on ne le croyait, et la contradiction disparaît. Les nouveaux résultats s'accordent également bien avec d'autres tentatives récentes pour déterminer la quantité totale de matière, comme les études des amas de galaxies (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, *Pour la Science*, février 1999).

Les nouvelles mesures de la densité de matière dans l'Univers nous éclairent aussi sur la courbure de l'Univers, car, selon la relativité générale, courbure et expansion sont liées : la matière montre à l'espace-temps comment se courber, et l'espace-temps montre à la matière comment se mouvoir. Une faible densité de matière correspond à une courbure négative, ainsi qu'à un faible ralentissement de l'expansion. Si l'Univers est presque vide, la courbure négative est maximale,



David Schneider, d'après C. Hogan, R. Kirshner et N. Suntzeff

5. LA LUMINOSITÉ DES SUPERNOVAE ne varie pas, en fonction du décalage spectral (points rouges), comme le prévoyaient de nombreux théoriciens : l'expansion de l'Univers ne ralentit pas aussi vite que si l'Univers était «plat» (ligne bleue) et que si la constante cosmologique était nulle (pas d'énergie du vide). Les observations montrent que l'Univers ne contient que 20 pour cent de la matière nécessaire pour le rendre plat (ligne noire). L'expansion semble même accélérer, peut-être à cause d'une constante cosmologique non nulle (ligne rouge).

de sorte que l'atténuation des objets lointains est forte.

La grande surprise vient de ce que les supernovae que nous observons sont plus faibles que prévu, même pour un Univers presque vide (qui possède une courbure négative maximale). Nos observations semblent indiquer que l'expansion accélère progressivement. Un Univers composé uniquement de matière ordinaire ne peut croître de cette manière, parce que la gravité est toujours attractive. Cependant, conformément à la théorie d'Einstein, l'expansion peut accélérer si de l'énergie remplit l'espace partout. Cette étrange «énergie du vide» figure dans les équations d'Einstein sous la forme d'une constante dite cosmologique. Contrairement aux formes ordinaires de masse et d'énergie, l'énergie du vide agirait comme une gravité répulsive qui peut écarteler l'Univers à des vitesses croissantes (voir

L'antigravité, par Lawrence Krauss, page 42). Une fois cette possibilité extraordinaire admise, nous pouvons parfaitement expliquer nos observations, même en conservant la géométrie plate chère aux théoriciens.

Ainsi, ce résultat est le plus excitant que nous pouvions espérer : une forme d'énergie étrange communiquerait une force répulsive à longue portée. Toutefois, il est si surprenant que nous demeurons raisonnablement sceptiques. Heureusement, des progrès de la technique d'observation, tels les nouveaux détecteurs infrarouges et le télescope spatial de nouvelle génération, permettront bientôt de tester nos conclusions. Ces instruments plus précis et plus fiables nous permettront aussi de percevoir des balises encore plus faibles que celles qui s'allument il y a encore plus longtemps dans des galaxies beaucoup, beaucoup plus lointaines.

Craig HOGAN dirige le département d'astronomie de l'Université de Washington. Robert KIRSHNER enseigne l'astronomie à l'Université Harvard. Nicholas SUNTZEFF est astronome à l'observatoire de Cerro Tololo, au Chili.

Craig J. HOGAN, *The Little Book of the Big Bang*, Springer-Verlag, 1998.

S. PERLMUTTER et al., *Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe*, (*The Supernova Cosmology Pro-*

ject), in *Nature*, vol. 391, pp. 51-54, 1^{er} janvier 1998

Adam G. RIESS et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, in *Astronomical Journal*, vol. 116, n° 3, pp. 1009-1038, septembre 1998.

S. PERLMUTTER et al., *Measurement of W_n and W_s from 42 High Redshift Supernovae*, astro-ph/9812133, à paraître dans *Astrophysical Journal*.



L'antigravité

LAWRENCE KRAUSS

Certains cosmologistes expliquent les nouvelles observations des astronomes à l'aide d'équations qui comprennent un terme découvert par Einstein : la constante cosmologique.

En 1946, George Orwell écrivait : « Voir ce qui se trouve devant son nez demande un effort constant. » C'est bien le cas en cosmologie.

L'Univers est tout autour de nous, nous en faisons même partie, mais les cosmologistes sont parfois obligés d'explorer ses confins pour glaner des informations sur les mécanismes qui ont conduit à notre existence sur la Terre. Les scientifiques croient en une simplicité des principes sous-jacents de la nature, mais démêler leur écheveau n'est pas une mince affaire, car les indices peuvent être subtils. Les récentes observations d'explosions stellaires lointaines l'ont bien montré. Contre toute attente, l'analyse de ces supernovae indique que l'expansion de l'Univers accélère au lieu de ralentir.

Depuis 1929, les astronomes savent que l'Univers se dilate : Edwin Hubble montra que les galaxies lointaines s'écartent les unes des autres comme si l'Univers était en expansion uniforme. À ces mouvements de récession s'oppose la gravité collective des amas de galaxies et de toutes les planètes, étoiles, gaz et poussières qu'elles contiennent. Même l'attraction gravitationnelle d'une plume ralentit, d'une quantité infime, l'expansion cosmique. Voici une dizaine d'années, théorie et observations ont semblé montrer que l'Univers contenait suffisamment de matière pour ralentir l'expansion sans jamais l'arrêter. En jargon géométrique, qu'Albert Einstein encourageait, l'Univers semblait « plat ».

L'Univers plat est intermédiaire entre deux autres géométries possibles, dites « ouverte » et « fermée ». Dans la lutte de la matière contre l'expansion du Big Bang, le cas ouvert représente la victoire de l'expansion : l'Univers

se dilate indéfiniment. Dans le cas fermé, la gravité l'emporterait, et l'expansion serait suivie d'une contraction : l'Univers finirait en s'écrasant sur lui-même. L'Univers est un peu comme une fusée : si on lance celle-ci à une vitesse supérieure à la vitesse de libération, la fusée échappe à l'attraction gravitationnelle et s'éloigne vers l'infini (cas ouvert) ; si on lance la fusée à une vitesse inférieure, elle finit par retomber sur Terre (cas fermé) ; enfin, si la vitesse initiale est exactement égale à la vitesse de libération, la fusée reste en orbite (cas plat).

Dans les années 1980, pour résoudre certains paradoxes de la théorie classique, les cosmologistes proposent la théorie de l'inflation. Selon cette théorie, un très court instant après le Big Bang, l'Univers s'est dilaté extrêmement rapidement, et l'Univers que nous habitons serait alors plat, en équilibre parfait entre les deux tendances antagonistes. Bien que l'Univers semble contenir trop peu de matière visible pour être plat, la dynamique céleste indique qu'il existe beaucoup de matière invisible. La majeure partie de la matière dans les galaxies et dans les amas de galaxies échappe aux télescopes. Il y a une dizaine d'années, j'ai nommé « quintessence » cette matière sombre, reprenant le terme utilisé par Aristote pour qualifier l'éther, la matière invisible supposée imprégner tout l'espace et dont l'idée a été reprise au XIX^e siècle (voir *La matière sombre dans l'Univers*, par Lawrence Krauss, in *Pour la Science*, février 1987).

Pourtant un solide faisceau de preuves montre aujourd'hui que même la matière invisible ne suffit pas à rendre l'Univers plat. Peut-être l'Univers n'est-il pas plat, mais

Alfred T. Kamajian