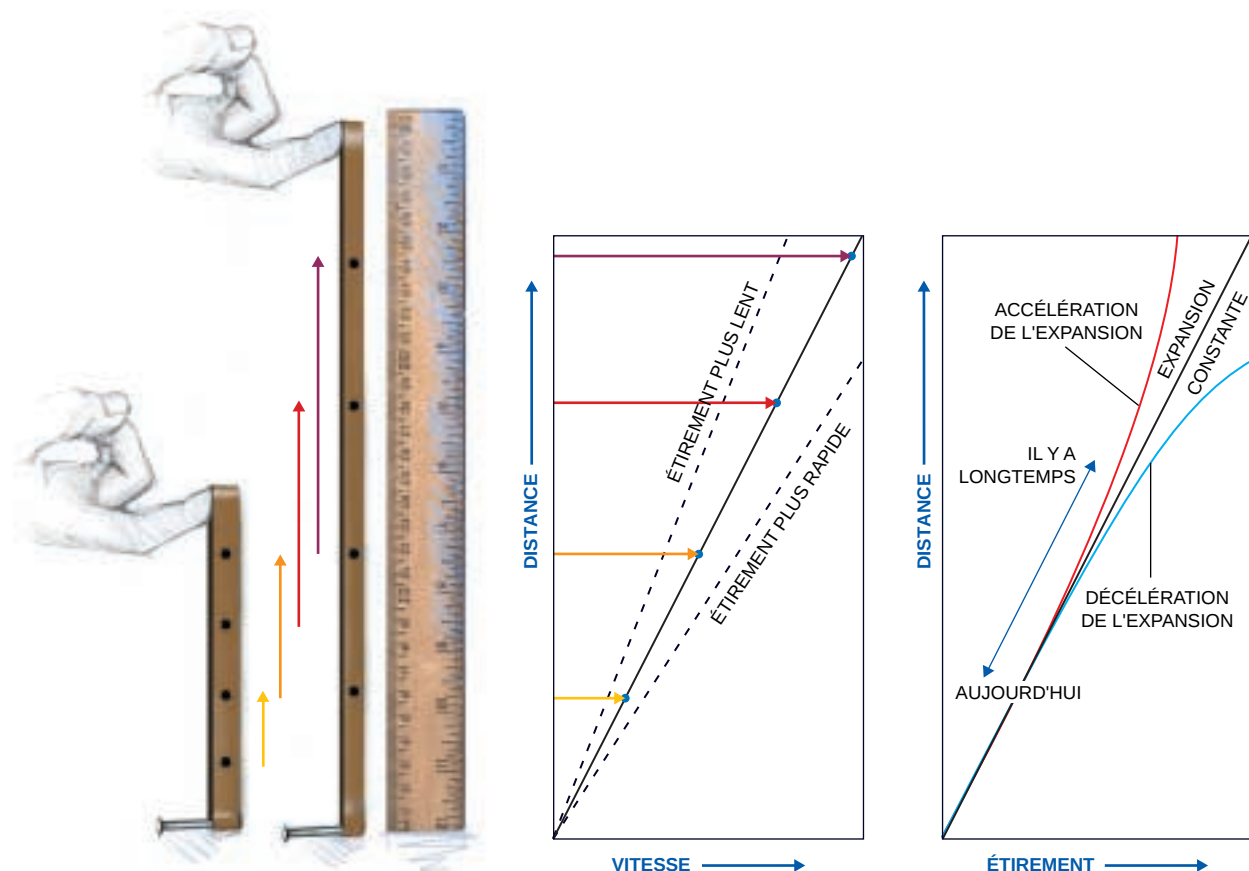




4. UN ÉLASTIQUE que l'on tend montre la relation linéaire entre la vitesse de récession des galaxies et leur distance. Étirons un élastique à une vitesse constante. La vitesse de différents points peints sur l'élastique est indiquée par la longueur des flèches colorées. Par exemple, le point le plus proche de l'origine se déplace le moins, et sa vitesse est la plus faible (flèche jaune). En revanche, le point le plus éloigné se déplace plus, et sa vitesse est supérieure (flèche violette). Lorsque l'on porte sur un diagramme la distance en fonction de la

vitesse, la pente de la droite donne la vitesse d'expansion de l'élastique (graphique de gauche). Si cette vitesse change au cours du temps, la pente change également (graphique de droite). Supposons que l'origine du graphique représente la Terre aujourd'hui ; les temps plus reculés se placent vers le coin supérieur droit, car ils correspondent aux grandes distances. Si la vitesse d'expansion était plus lente par le passé, la ligne se courberait vers le haut (ligne rouge). Si cette vitesse était supérieure, elle se courberait vers le bas (ligne bleue).

l'étoile qui explose émerge distinctement de sa galaxie hôte.

Après l'étude et l'analyse de dizaines de supernovae à grand décalage vers le rouge, une surprise nous attendait : les supernovae sont moins lumineuses que prévu. La différence est mince : les supernovae lointaines sont en moyenne 25 pour cent plus faibles que ce que prévoyait la théorie, mais ce résultat suffit à remettre en question les théories cosmologiques anciennes.

Avant de balayer les anciennes théories, les astronomes se sont demandé s'il existait une explication plus simple à la relative faiblesse de ces supernovae lointaines. Des poussières cosmiques situées dans le milieu intergalactique ou dans les galaxies où ont explosé les supernovae absorberaient-elles une partie de leur lumière ? Vraisemblablement pas, car les poussières atténuent plus la lumière bleue que la lumière rouge, de sorte que les supernovae seraient plus rouges qu'elles ne le sont en réalité (le phénomène est le même que celui qui fait rougir le soleil couchant). Or, nous n'observons pas une telle atténuation. De surcroît, la poussière cosmique ne

semble pas répartie uniformément dans l'espace, de sorte que la lumière de quelques supernovae seulement rencontrerait ces « nuages de poussières » et serait atténuée. Or, les supernovae ont presque toujours la même luminosité.

Une autre perturbation possible serait l'effet de lentille gravitationnelle, c'est-à-dire la courbure des rayons lumineux au voisinage des galaxies. Parfois, cet effet augmente la luminosité des sources, mais, le plus souvent, il la réduit ; des lentilles gravitationnelles pourraient donc atténuer l'éclat des supernovae lointaines. En fait, les calculs montrent que cet effet ne devient important que pour des sources plus éloignées que les supernovae que nous étudions, de sorte que nous pouvons écarter cette possibilité.

Enfin, nous craignons que les supernovae lointaines ne diffèrent des supernovae proches, émanant peut-être d'étoiles plus jeunes qui auraient contenu moins d'éléments lourds que les étoiles des galaxies plus mûres. Bien que nous ne puissions éliminer cette hypothèse, notre analyse tente déjà de prendre ces différences en compte. Ces

ajustements semblent fonctionner lorsque nous les appliquons aux galaxies proches, dont les supernovae présentent une grande dispersion d'âges, de compositions et de types.

Comme aucun de ces effets élémentaires ne s'accorde aux observations, nous pensons que la faiblesse inattendue des supernovae lointaines résulte de la structure du cosmos. Deux propriétés différentes de l'espace et du temps peuvent y contribuer.

D'abord, l'espace pourrait avoir une courbure négative. Une telle courbure se comprend mieux à l'aide d'une analogie bidimensionnelle. Les créatures vivant dans un monde bidimensionnel parfaitement plat (comme les personnages du roman *Flatland*, d'Edwin Abbott) trouveraient qu'un cercle de rayon r a une circonférence exactement égale à $2\pi r$. En revanche, si leur monde était en forme de selle, avec une courbure négative (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, page 50), la circonférence d'un cercle de rayon r serait supérieure à $2\pi r$.

La plupart des cosmologistes supposent, pour diverses raisons théoriques,

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.

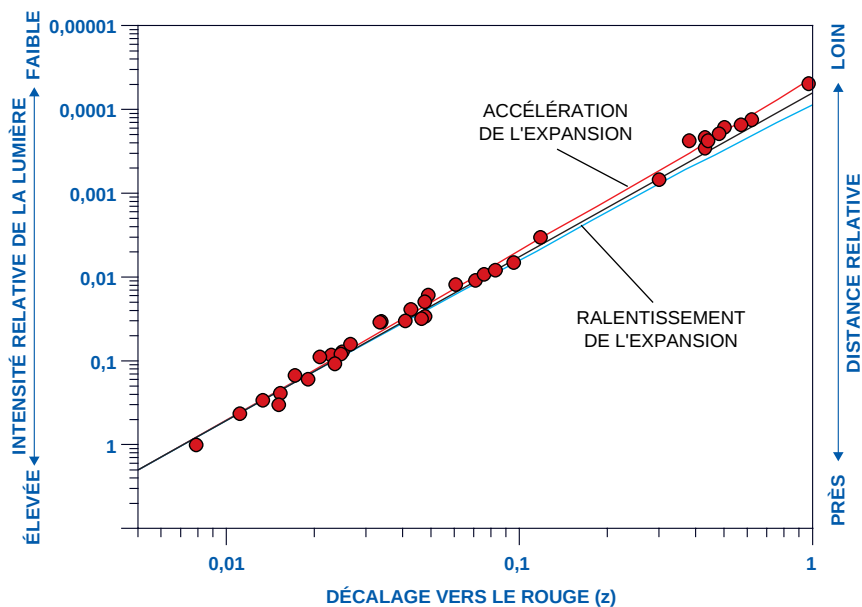
Les supernovae lointaines seraient également plus faibles que prévu si elles étaient plus loin que ne l'indique leur décalage vers le rouge. Autrement dit, les supernovae auraient un décalage vers le rouge inférieur à ce que l'on attendrait d'objets si lointains. Pour expliquer le décalage vers le rouge 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*.