



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



1. LE «VIDE» N'EST PAS VIDE : l'espace est peuplé de particules élémentaires qui surgissent et disparaissent trop rapidement pour être détectables. Leur présence est prévue par la mécanique quantique et par la relativité restreinte. L'énergie combinée de toutes ces particules «virtuelles», comme d'autres formes d'énergie, exercerait une force à longue portée soit attractive, comme la gravitation, soit répulsive selon des principes physiques qui ne sont pas encore compris. Aux échelles macroscopiques, cette énergie agirait comme la constante cosmologique proposée par Albert Einstein.

ouvert, auquel cas les cosmologistes doivent modifier – voire rejeter – la théorie de l’inflation (voir *L’inflation de l’Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, page 50). En tout cas, si l’Univers est réellement plat, ses constituants principaux ne peuvent être ni de la matière visible, ni de la matière sombre, ni du rayonnement. L’Univers serait alors composé principalement d’une forme plus «éthérée» d’énergie, qui occuperait l’espace vide, y compris celui qui se trouve juste sous notre nez.

Attraction fatale

L’idée d’une telle énergie a une histoire longue et mouvementée. Elle commence avec la publication de la théorie de la relativité générale par Einstein, plus de dix ans avant que Hubble ne démontre l’expansion de l’Univers. En

reliant l’espace au temps et à la matière, la relativité promettait ce qui avait été jusque-là impossible : une compréhension de la dynamique des objets dans l’Univers et aussi de l’Univers lui-même. Toutefois, Einstein restait insatisfait de sa théorie, car, contrairement aux autres forces fondamentales qui s’exercent sur la matière, la gravité n’est qu’attractive. Or cette implacable attraction gravitationnelle de la matière entraînerait finalement la contraction de l’Univers. Ne croyant pas à cette idée, Einstein ajouta à ses équations, un «terme cosmologique», qui stabilisait l’Univers par une nouvelle force à longue portée. Une valeur positive de ce terme devait représenter une force répulsive, une sorte d’antigravité, qui soutiendrait l’Univers contre son propre poids.

Quelques années après, quand on découvrit l’expansion de l’Univers,

Einstein reconnut que l’ajout de cette constante était sa «plus grande erreur». Il l’abandonna cinq ans après son introduction. En 1923, dans une lettre au mathématicien Hermann Weyl, Einstein écrivit que «si le monde n’est pas quasi statique, alors au diable le terme cosmologique» (voir la figure 3). Comme l’éther avant lui, cette constante semblait vouée aux oubliettes de l’histoire.

Les physiciens étaient également heureux de se débarrasser de cet intrus. Dans la théorie de la relativité générale, l’énergie est la source des forces gravitationnelles (attractives ou répulsives), et la matière est simplement une forme d’énergie. La constante cosmologique est toutefois de nature différente : l’énergie qui y est associée ne dépend pas de la position ou du temps, d’où le terme «constante cosmologique». La force engendrée par la constante cosmologique opère même en l’absence totale de matière ou de rayonnement. Par conséquent, sa source doit être une énergie curieuse, qui réside dans l’espace vide. La constante cosmologique, comme l’éther, dote le vide d’une aura quasi métaphysique. Avec son abandon, la nature redevenait raisonnable.

Le redevenait-elle vraiment ? Dans les années 1930, le fantôme de la constante cosmologique réapparut lorsque les physiciens cherchèrent à combiner les lois de la mécanique quantique et celles de la théorie de la relativité restreinte. Paul Dirac et, plus tard, Richard Feynman, Julian Schwinger et Shinichiro Tomonaga montrèrent que l’espace vide est plus compliqué qu’on ne l’imaginait : des particules élémentaires surgissent spontanément du néant et y retournent, pour peu que leur durée de vie soit si courte que personne ne puisse la mesurer directement. Ces particules virtuelles peuvent sembler aussi abracadabrantes que des anges assis sur une tête d’épingle, mais la différence existe : ces particules invisibles engendrent des effets mesurables, telles des modifications des énergies possibles pour les électrons dans les atomes ou des forces entre des plaques métalliques proches (voir la figure 4). La théorie des particules virtuelles rend compte des observations jusqu’à la neuvième décimale (habituellement, les anges n’ont pas d’effet sur les atomes). Autrement dit, le vide n’est pas vide.

Types de matière			
Type	Composition probable	Indice principal	Contribution approximative à Ω
Matière visible	Matière ordinaire (composée principalement de protons et de neutrons) qui forme étoiles, poussières et gaz	Observations télescopiques	0,01
Matière sombre baryonique	Matière ordinaire trop faible pour être vue, peut-être naines brunes ou noires (objets compacts massifs du halo, ou MACHO)	Calculs de la nucléosynthèse dans le Big Bang et proportion du deutérium	0,05
Matière sombre non baryonique	Particules exotiques comme les «axions», les neutrinos massifs ou les particules massives faiblement interagissantes (WIMP)	La gravité de la matière visible est insuffisante pour expliquer les vitesses orbitales des étoiles au sein des galaxies et des galaxies dans les amas	0,3
«Matière sombre» cosmologique	Constante cosmologique (énergie de l’espace vide)	Le rayonnement du fond diffus cosmologique suggère un cosmos plat, mais il n’y a pas assez de matière baryonique ou non baryonique pour cela	0,6

2. L’UNIVERS contient des milliards et des milliards de galaxies, chacune contenant un nombre tout aussi grand d’étoiles. Pourtant l’essentiel de la masse de l’Univers semble constitué de «matière sombre», dont l’identité reste incertaine. La constante cosmologique, si son existence se confirme, agirait comme une forme encore plus exotique de matière sombre aux échelles cosmologiques. La quantité Ω est le quotient de la densité de matière ou d’énergie par la densité à laquelle l’Univers serait plat.

La réalité virtuelle

Si les particules virtuelles changent les propriétés des atomes, modifient-elles aussi l'expansion de l'Univers? En 1967, l'astrophysicien soviétique Yakov Zeldovich a montré que l'énergie des particules virtuelles devait agir précisément comme l'énergie associée à la constante cosmologique. Toutefois, les calculs de mécanique quantique révélèrent une surprise : ils conduisaient à la prévision de l'existence d'un ensemble de particules virtuelles qui couvrent toutes les longueurs d'onde possibles ; lorsqu'on additionnait les effets de toutes ces particules, l'énergie totale devenait infinie. Même quand on négligeait les effets quantiques inférieurs à une certaine longueur d'onde, pour lesquels la combinaison du comportement gravitationnel et quantique est mal connue, l'énergie du vide calculée était 120 ordres de grandeur supérieure à celle de l'énergie contenue dans toute la matière de l'Univers!

Quel pourrait être l'effet d'une constante cosmologique aussi gigantesque? Nous pouvons facilement imposer une limite supérieure à sa valeur. Tendons le bras et regardons nos doigts. Si la constante cosmologique était aussi grande que le suggère naïvement la théorie quantique, l'espace entre nos yeux et notre main se dilaterait si vite que la lumière émise par la main n'atteindrait jamais les yeux. Le fait que nous puissions voir non seulement jusqu'au bout de notre bras, mais également jusqu'aux confins de l'Univers impose une limite supérieure à cette constante : environ 120 ordres de grandeur inférieure à l'estimation mentionnée! Cette incompatibilité entre la théorie et les observations est la plus grande et la plus troublante de toute la physique moderne (voir *Le mystère de la constante cosmologique*, par Larry Abbott, in *Pour la Science*, juillet 1988).

Pour remédier à cette difficulté, on suppose qu'une loi physique encore inconnue annule la constante cosmologique. Les théoriciens aimeraient bien se débarrasser de cette constante, mais diverses observations astronomiques – l'âge de l'Univers, la densité de matière et la nature des structures cosmiques – suggèrent indéniablement qu'elle pourrait n'être pas tout à fait nulle.

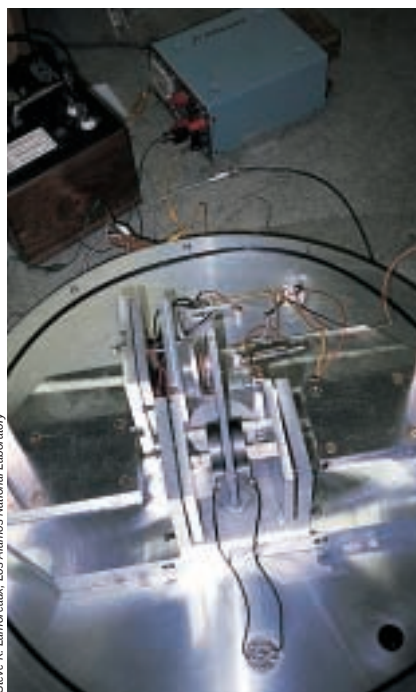
Quel est l'âge de l'Univers? Cette question est l'une des plus lancinantes de la cosmologie moderne. En mesurant les vitesses des galaxies, les astronomes calculent le temps qu'il leur a fallu pour atteindre leurs positions actuelles, en supposant qu'elles soient toutes issues du même endroit. Si l'Univers se dilate à vitesse constante (en première approximation, on peut ignorer le ralentissement dû à la gravité), l'âge de l'Univers serait le quotient de la distance intergalactique par la vitesse de séparation, c'est-à-dire l'inverse de la célèbre constante de Hubble.

Plus la valeur de la constante de Hubble est élevée, plus la vitesse d'expansion est rapide et plus l'Univers est jeune.

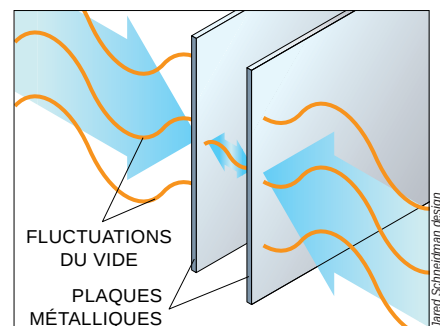
Hubble estimait que sa constante éponyme était égale à environ 500 kilomètres par seconde et par mégaparsec (un mégaparsec correspond environ à trois millions d'années-lumière). Autrement dit, deux galaxies éloignées d'un mégaparsec s'écartent de 500 kilomètres par seconde. Cette estimation est manifestement fautive, car elle conduit à un âge de l'Univers de deux milliards d'années inférieur à l'âge de la Terre (environ quatre milliards



3. CETTE LETTRE D'EINSTEIN au mathématicien allemand Hermann Weyl concède qu'un univers de taille constante serait instable et devrait se dilater ou se contracter : «Dans l'Univers de De Sitter, deux points fluides et instables se séparent à vitesse croissante. S'il n'y a pas de monde quasi statique, alors au diable le terme cosmologique.»



Steve K. Lamoreaux, Los Alamos National Laboratory



Jared Schneidman design

4. L'EFFET CASIMIR met en évidence que le vide est peuplé de «particules virtuelles». Cet effet correspond à une attraction entre des objets métalliques – par exemple, une force attractive entre deux plaques métalliques parallèles (en haut). L'espacement fini entre les plaques empêche la matérialisation dans l'interstice de particules virtuelles plus grandes qu'une certaine longueur d'onde. Comme il y a alors plus de particules à l'extérieur des plaques qu'entre elles, les plaques se rapprochent (à droite). L'effet Casimir dépend clairement de la forme des plaques, ce qui permet aux physiciens de l'isoler des autres forces de la nature.