



UNE SURPRISE DE TAILLE POUR LES ASTRONOMES

C'est l'une des énigmes les plus fascinantes de la science.

Une mystérieuse énergie dilaterait follement l'Univers, le faisant enfler comme un ballon de baudruche, de plus en plus vite. Une révolution en cosmologie, la science de l'Univers!

Car si les astronomes savent depuis longtemps que l'Univers est en expansion, la plupart pariaient sur un ralentissement de cette expansion. Or, c'est l'inverse qui se passe : elle accélère ! Comment a-t-on pu se tromper ainsi ? Et à quoi ressemble cette énergie si mystérieuse qu'elle a été baptisée, en attendant mieux, « énergie sombre » ? Des questions plutôt balèzes... Mais pas de panique, nous allons reprendre l'histoire depuis le début pour tenter de bien cerner cette inconnue. Point de départ du voyage : Berlin, où nous avons rendez-vous avec un certain Albert Einstein...

DOSSIER

APRÈS AVOIR CRU L'UNIVERS IMMOBILE, LES ASTRONOMES ONT DÉCOUVERT

LA FORCE QUI DÉ

PAR FABRICE NICOT



> SOMMAIRE

50 ON CROYAIT L'UNIVERS FIXE, IL GRANDIT CHAQUE JOUR

1929, découverte sensationnelle des astronomes : l'Univers gonfle comme un ballon.

56 L'UNIVERS S'EMBALLE !

1998, seconde découverte décoiffante : l'Univers gonfle de plus en plus vite, alors qu'on s'attendait à l'inverse !

58 3 SUSPECTS POUR UN SOMBRE MYSTÈRE

Quelle est donc cette force extraordinaire qui dilate le Cosmos ? Les hypothèses des chercheurs.

QU'IL SE DILATE DE PLUS EN PLUS VITE. MAIS QUELLE EST DONC...

CHIRE L'UNIVERS

1915 : PREMIÈRE RÉVOLUTION DANS L'ÉTUDE DU COSMOS.

ON CROYAIT L'UNIVERS FIXE, IL GRANDIT !

POUR EINSTEIN, L'UNIVERS EST FIGÉ

Nous sommes à Berlin, en 1915. Einstein travaille d'arrache-pied pour comprendre d'où vient la force de gravitation, qui fait que les corps s'attirent mutuellement. Difficile de l'ignorer celle-là. La Terre tourne autour du Soleil, c'est la gravitation. Nous gardons les pieds sur Terre, merci la gravitation. Mais qu'est-ce que c'est, la gravitation ? Comment des corps peuvent-ils s'attirer mutuellement alors qu'aucun lien matériel ne les unit ? À force de bosser comme un fou, le physicien à moustache le plus célèbre au monde trouve une solution. Selon lui, la réponse à cette question est contenue dans la forme même de l'Univers, qui dépend de la masse et de l'énergie qui le remplit.

Pour comprendre sa vision sans risquer le claquage neuronal, simplifions l'espace. Attribuons-lui deux dimensions au lieu de quatre (trois d'espace et une de temps). L'Univers devient un drap. Posez une boule de pétanque sur ce drap. Un creux se forme sous la boule.

Maintenant, lancez une bille sur le drap. Elle a tendance à se rapprocher de la boule, comme attirée par elle. Alors qu'en fait, la bille se déplace tout simplement en ligne droite dans un espace courbé (voir schéma). Remplacez la boule par le Soleil, la bille par une comète, et vous retrouvez le cas classique d'un corps capté par la gravitation d'un astre plus massif que lui.

EINSTEIN REFUSE DE CROIRE CE QUE LUI DISENT SES CALCULS

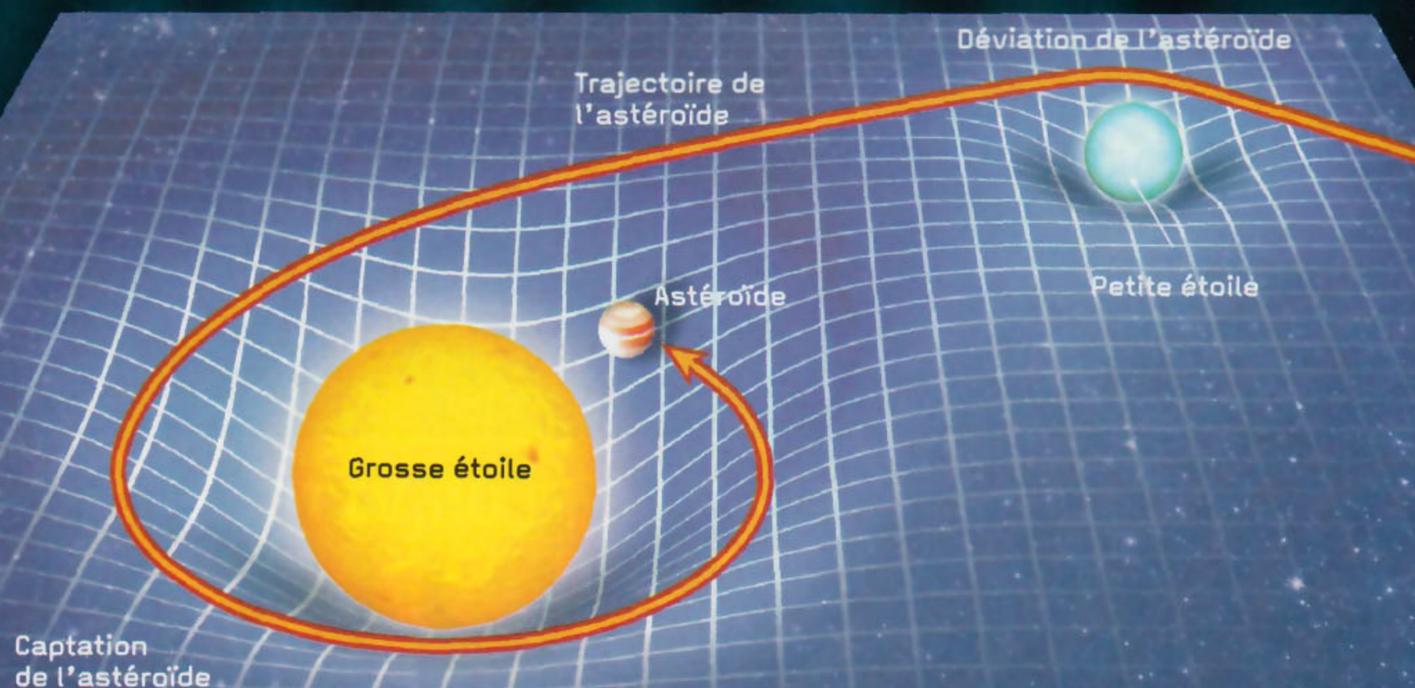
L'espace d'Einstein est mou comme un marshmallow. Il est façonné par la matière et l'énergie qui l'emplissent. Avec l'aide de mathématiciens chevronnés, le physicien met au point une série d'équations plutôt complexes qui décrivent les modifications de l'espace-temps sous l'effet de la matière et de l'énergie. Dans notre exemple, cela correspond à la courbure du drap sous

ZOOM

La caractéristique d'une **constante** est d'avoir toujours la même valeur. Par exemple, la vitesse de la lumière dans le vide est une constante qui vaut 299792458 m/s.

LA GRAVITATION EN ESPACE-TEMPS

Vue par Einstein, la gravitation n'est pas une force agissant mystérieusement à distance, mais une déformation de l'espace et du temps. Sur notre schéma, l'espace-temps à 4 dimensions est simplifié à deux. Un corps massif, comme une petite étoile, déforme ce drap. Un corps plus léger, comme un astéroïde passant à proximité, sera dévié à cause du creux. Et il sera carrément capté par un corps encore plus massif creusant plus profondément le drap.



ESPACE-TEMPS RÉDUIT À DEUX DIMENSIONS

l'effet de la boule de pétanque. Les équations décrivent aussi la trajectoire des objets dans cet espace-temps. Einstein les applique à des corps de notre système solaire et calcule leur orbite autour du Soleil. Avec succès.

Mais au fait, pourquoi ne pas appliquer ces équations à l'Univers tout entier? Einstein s'y risque en 1917. Et alors, rien ne va pas plus. Car la conclusion est sans ambiguïté : la taille de l'Univers change avec le temps. Elle peut augmenter ou bien diminuer. Mais en aucun cas rester constante. Et ça met Einstein hors de lui. Car, à l'époque, aucun astronome n'a encore observé l'Univers « bouger ». Alors pour Einstein, cet univers qui se ratatine ou qui se dilate, c'est tout simplement une absurdité.

Pour coller à ce qui lui semble être la réalité, Einstein se résout à une solution extrême. Il modifie ses équations. Oui, il bidonne en quelque sorte. Il ajoute un terme, sorti de son chapeau et le baptise « **constante cosmologique** ». Sa mission : rendre possible la description d'un univers immobile. Oui, vous avez compris. Einstein transforme ses équations afin qu'elles donnent ce qui pour lui est le bon résultat (voir encadré ci-dessous).

C'est bien beau de tripatouiller les équations, mais que devient la physique là-dedans? Cette constante cosmologique, elle doit bien traduire quelque chose de réel dans l'Univers, une force quelconque... Aïe! C'est là que ça fait mal. Car ni Einstein ni personne d'autre d'ailleurs n'a la moindre idée de ce à quoi cette constante correspond physiquement. L'important, c'est qu'en s'opposant à la gravitation, cette force mystérieuse maintiendrait l'Univers dans sa splendide immobilité. C'est un peu bancal. Car si la gravitation est archiconnue, aucune force chargée de la contrecarrer n'a jamais été observée. « On verra plus tard », semble penser Einstein. La constante cosmologique permet à ses équations de coller à l'observation, c'est tout ce qui compte. Seulement, les astronomes vont bientôt faire une découverte sensationnelle...

LE BRICOLAGE DE LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE

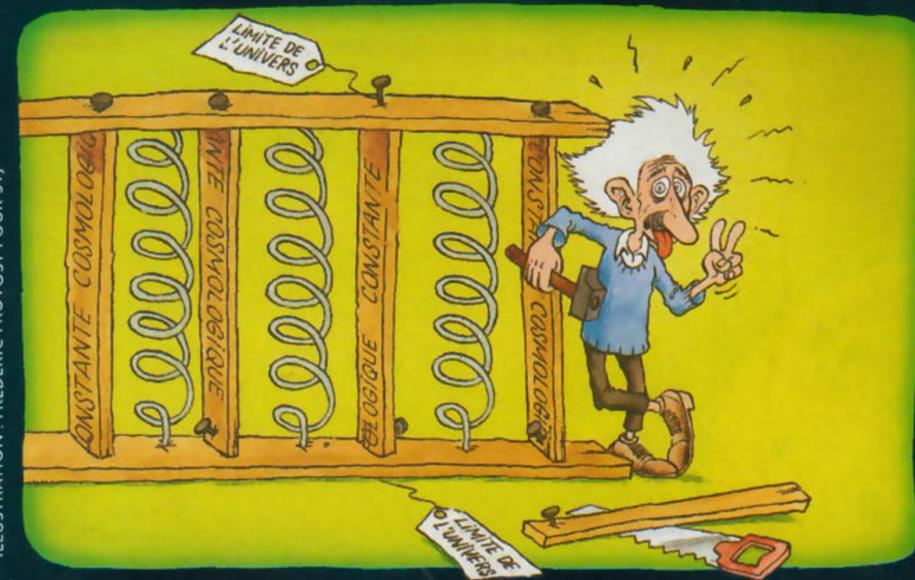
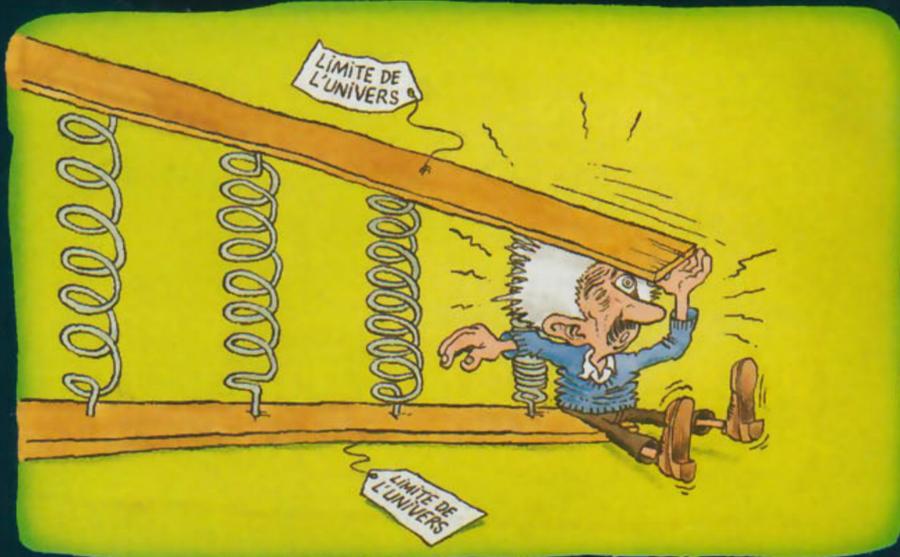
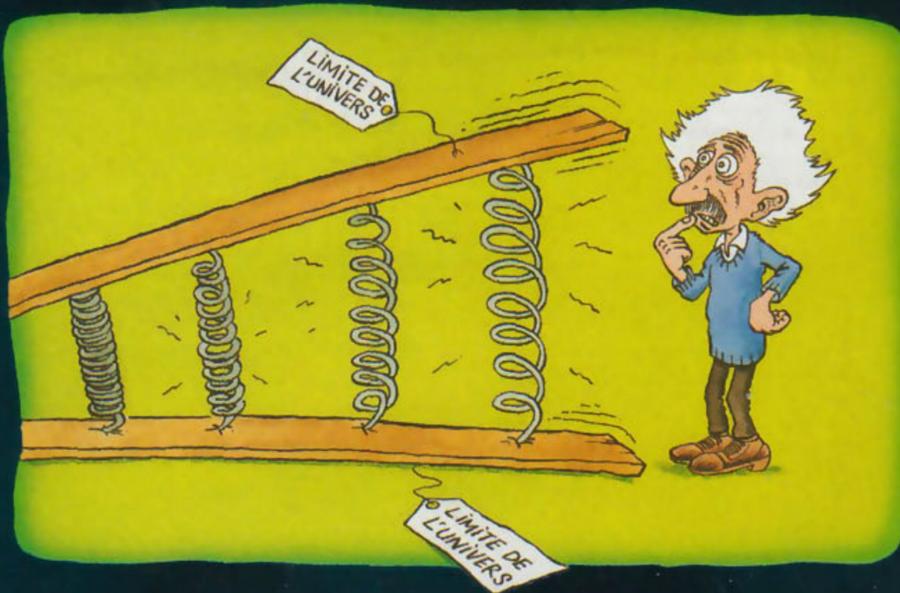


ILLUSTRATION : FRÉDÉRIC PROVOST POUR SVJ

Einstein n'en croit pas ses calculs! Selon eux, l'Univers n'a que deux avenir possibles. Dans le premier cas, il grandit indéfiniment. Mais quelle force repousserait ses limites (ici les 2 planches)? La seule force agissant à grande distance est la gravitation. Or, elle est censée rapprocher la matière (comme le font les ressorts sur notre dessin), mais pas l'éloigner. A priori, ce futur est inconcevable...

Dans le second cas, l'Univers rapetisse et finit par s'effondrer sur lui-même. Et pourquoi pas? Après tout, la gravitation pourrait se charger du boulot. Les ressorts, qui la représentent, ont bien tendance à rapprocher les planches.

Oui, mais Einstein est persuadé que la taille de l'Univers n'évolue pas dans le temps. Car aucune observation astronomique ne va dans ce sens. Alors il imagine la constante cosmologique chargée de s'opposer à la gravitation. Et de maintenir l'Univers fixe, ici par des planches disposées en entretoise.



L'ART DE LA « BIDOUILLE » SELON EINSTEIN

Pour comprendre comment Einstein a pu trafiquer ses équations sans entrer dans les subtilités de la relativité, voici une analogie simple à comprendre. C'est un peu comme si vous vous trouviez face à une équation du type $x^2 = 1$. Imaginons que le signe de x traduise l'expansion de l'Univers. S'il est positif, l'Univers se dilate. S'il est négatif, il se contracte. Si x est nul, l'expansion

est nulle. Sans être un crack en maths, on note bien qu'il y a deux valeurs possibles pour x : 1 ou -1. Mais pas $x = 0$, car on aurait alors $0 = 1$! Pour autoriser cette solution, il faut modifier l'équation. En ajoutant un terme 1, par exemple. Ce qui donne : $x^2 + 1 = 1$. Dans ce cas, plus de problème car si $x = 0$, on obtient $1 = 1$. Ce 1 ajouté, c'est un peu comme la constante cosmologique.

ILLUSTRATION : PHILIPPE MOUCHE POUR SVJ

A priori, rien ne prédisposait l'Américain Edwin Hubble à participer à la grande aventure de l'expansion de l'Univers. Cet astronome (dont le fameux télescope spatial porte le nom), certes génial, n'est pas un théoricien. Son truc, c'est d'observer le ciel la nuit en fumant sa pipe. Depuis 1919, il vit l'œil rivé au plus puissant télescope de l'époque, installé au sommet du mont Wilson, en Californie. Dans son collimateur : les galaxies.

Les galaxies sont de gigantesques amas d'étoiles, de gaz et de poussières disséminés dans l'Univers. Elles ont souvent la forme d'une majestueuse spirale. Nous-mêmes nous vivons dans l'un de ces îlots de matière : la Voie lactée. Au début des années 1920, les astronomes ne sont pas du tout au point sur le sujet. Ils se posent des questions auxquelles un enfant de 10 ans sait aujourd'hui répondre. Par exemple, ces amas d'étoiles qu'ils observent dans leurs télescopes font-ils partie de notre galaxie ? Auquel cas, celle-ci serait TOUT l'Univers. Ou bien ces amas forment-ils d'autres galaxies différentes de la nôtre ?

PLUS ELLES SONT LOIN ET PLUS ELLES S'ÉLOIGNENT VITE

Voilà pourquoi Hubble se gèle toutes les nuits sur son télescope : il mesure la distance qui nous sépare de ces amas

qu'il suppose être d'autres galaxies. Pour cela, il compare la luminosité de certaines étoiles de notre Voie lactée avec celle d'étoiles peuplant des galaxies proches. Plus une étoile est brillante, et plus elle est proche. Or, justement, les étoiles des galaxies sont systématiquement moins lumineuses que celles de notre Voie lactée. Elles sont donc situées au-delà. La Voie lactée est donc une galaxie comme les autres, perdue dans l'immensité de l'Univers. C'est déjà un beau résultat que publie Hubble en 1924.

Mais attendez la suite. L'astronome découvre dans la foulée que la plupart des galaxies se fuient les unes les autres (voir dessin ci-dessous). Et plus elles sont lointaines, plus leur vitesse de fuite est grande. En fait, il redécouvre ce que d'autres astronomes avaient mis en évidence avant lui. Mais c'était pendant la Première Guerre mondiale, et

GALAXIE IMMOBILE

Cette galaxie est immobile. Elle brille, autrement dit, elle émet de la lumière. Cette lumière traverse un nuage d'hydrogène. Or, l'hydrogène a la sale manie de garder un peu de cette lumière. Cela saute aux yeux si l'on décompose la lumière qui ressort du nuage d'hydrogène, pour voir les couleurs dont cette lumière est composée (on appelle cela le « spectre »). Une bande noire apparaît à la place de la couleur dévorée. L'emplacement de cette bande sur le spectre est comme une signature. C'est infalsifiable, l'hydrogène boulotte toujours le spectre au même endroit.

ILLUSTRATION : FRÉDÉRIC PROVOST POUR SVJ



COMME UN BALLON

En comparant l'Univers à un ballon, on s'aperçoit qu'il enfle et que l'espace entre les galaxies (figurées par les gommettes) s'agrandit. Mais la taille de ces dernières ne change pas. Elles ne subissent donc pas l'expansion de l'Univers.



NADIA RABHI POUR SVJ

leurs travaux passèrent à peu près inaperçus. Hubble connaît ses limites. Il ne cherche pas à comprendre ce curieux résultat, il laisse faire ses collègues. C'est un astronome belge, par ailleurs prêtre, Georges Lemaître (dont nous reparlerons), qui donne une juste interprétation des constatations de Hubble en 1929. Pour lui, ce ne sont pas les galaxies qui bougent, mais l'espace entre elles qui se dilate. Autrement dit, l'Univers enfle. Pour comprendre, imaginez que l'Univers est un ballon de baudruche (voir photo). Comme ceux que vous avez gonflés lors de votre dernière fête. Gonflez légèrement le ballon. Collez dessus des gommettes, elles représenteront les galaxies. Maintenant, soufflez! Les gommettes s'éloignent bien les unes des autres, au fur et à mesure que le ballon enfle. Notez bien que la taille des gommettes, elle, ne varie pas. Effectivement, les

galaxies ne subissent pas l'expansion de l'Univers. Car, dans une galaxie, les forces de gravitation régnant entre les étoiles qui la composent sont plus fortes que cette dilatation. Voilà aussi pourquoi notre système solaire, notre Terre, nos pieds, nos mains ne s'allongent pas non plus.

En présentant son modèle d'univers en expansion, G. Lemaître montre qu'Einstein a eu tort de ne pas croire les équations de la relativité générale. Rappelez-vous : un univers qui enfle faisait partie des solutions possibles trouvés par le moustachu! Et dire qu'Einstein s'était cassé la tête à ajuster sa constante cosmologique! La voilà devenue inutile, jetée aux poubelles de la science.

COMMENT ON SAIT QUE LES GALAXIES S'ÉLOIGNENT

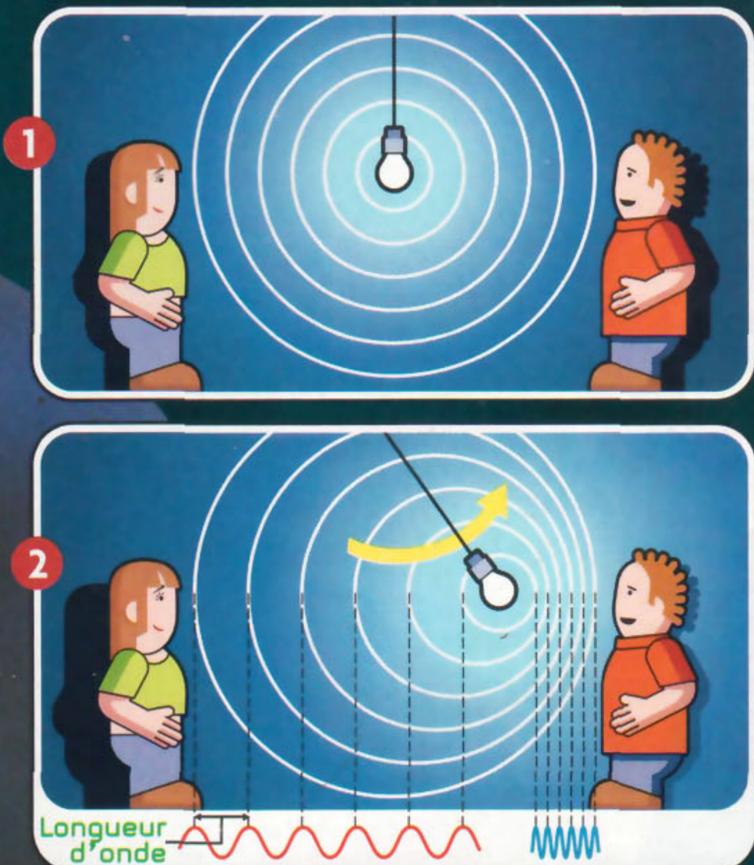
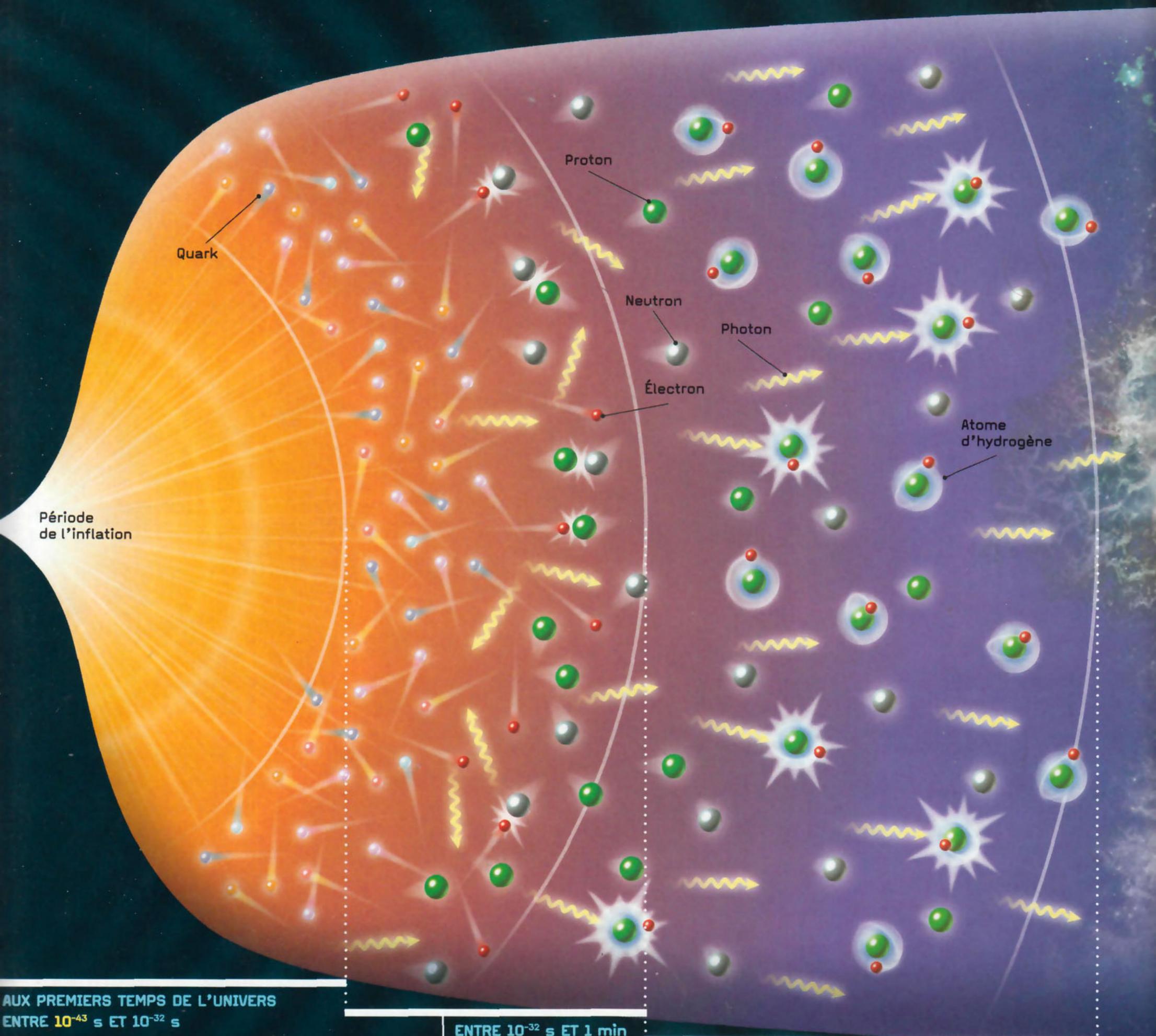


ILLUSTRATION : SANDRINE FELLAY POUR SVJ

L'EFFET DOPPLER

Pour comprendre, prenons l'exemple simplifié de deux ampoules. La lumière émise par ces ampoules est transportée sous forme d'onde dont la forme rappelle celle des vagues sur l'océan. Elles sont caractérisées par la distance séparant deux bosses : la longueur d'onde. Elle détermine la couleur de la lumière. Les grandes longueurs d'onde correspondent aux couleurs rouges, les petites aux couleurs bleues. Lorsque l'ampoule est immobile 1, les 2 observateurs observent des ondes espacées de façon identique. Mais si l'ampoule est mise en mouvement 2, les observateurs ne

voient plus la même chose. Comme l'ampoule avance vers la droite, la distance entre deux ondes émises dans cette direction est plus courte que précédemment. Elles semblent ainsi se tasser dans le sens du mouvement. La longueur d'onde est plus courte. Le spectre de la lumière est donc décalé vers le bleu. Inversement, à gauche, la distance entre deux vagues successives est plus importante puisque l'ampoule part vers la droite. La longueur d'onde étant plus grande, le spectre de la lumière est décalé vers le rouge.



Période
de l'inflation

Quark

Proton

Neutron

Photon

Électron

Atome
d'hydrogène

AUX PREMIERS TEMPS DE L'UNIVERS ENTRE 10⁻⁴³ s ET 10⁻³² s

10⁻⁴³ s après la naissance de l'Univers... Impossible de remonter plus tôt. Avant, les notions d'espace et de temps n'ont même pas de sens. Il aura fallu attendre les années 1980 pour qu'une théorie, encore discutée, permette de décrire cette époque aussi lointaine. Dans ces premières fractions de seconde donc, un curieux phénomène se serait produit. Une expansion d'une violence inouïe aurait augmenté la taille de l'Univers d'une façon prodigieuse. En une fraction d'instant, cette taille aurait été multipliée des milliards de milliards de fois ! Cette phase affolante est appelée inflation et se termine environ 10⁻³² s après la naissance de l'Univers. Son moteur carburgerait à... l'énergie du vide (voir p. 58) !

ENTRE 10⁻³² s ET 1 min

L'Univers reprend son expansion à un rythme plus pépère. Le vide cosmique se remplit de particules. D'abord des quarks, composants ultimes de la matière. Puis des neutrons, des électrons et des protons, qui donneront ensuite les atomes. De l'énergie s'échange entre particules sous la forme de photons, qui sont les grains formant la lumière.

ENTRE 1 min ET 300000 ANS

À force d'enfler, l'Univers commence à refroidir sérieusement. Il passe durant cette période de 10 milliards de degrés à 3000 °C. Protons et neutrons s'agitent moins vite. Ils peuvent se rapprocher presque en douceur pour former des noyaux stables d'atomes. Puis les électrons viennent tournicoter autour des noyaux, formant ainsi des atomes d'hydrogène. Ces atomes sont détruits sans cesse par les photons. L'Univers continue de se dilater. Bientôt, il est assez vaste pour que des espaces significatifs apparaissent entre les atomes. Les photons voyagent enfin librement entre les atomes d'hydrogène. Ainsi, la lumière qu'ils portent peut se répandre dans l'Univers.



ILLUSTRATION : PHILIPPE MOUCHE POUR SVJ

Au début des années 1930, l'idée d'un univers en expansion proposé par Lemaître, et qui colle parfaitement avec les observations de Hubble, s'impose parmi les astronomes. C'est alors que Georges Lemaître fait à nouveau parler de lui grâce à une intuition géniale. Il affirme que l'Univers est né un beau jour, qu'il n'a pas toujours été là. Un choc. Car, jusqu'à présent, il était considéré comme éternel. Même Einstein n'avait pas envisagé une naissance à l'Univers. L'intuition de Lemaître est relativement simple à comprendre. Il constate que l'Univers gonfle comme un ballon de baudruche. Bien. Maintenant, il suffit de visionner le film à l'envers. L'Univers ne gonfle plus, il se ratatine de plus en plus, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus moyen de continuer le flash-back. Alors, l'Univers n'existe plus. Ou plutôt, il n'est pas encore là.

L'intuition de Lemaître est à la source de la célèbre théorie du Big Bang. Elle est bien mal nommée. Car le Big Bang n'est pas un gros pétard d'où aurait jailli l'Univers. Lorsque vous gonflez votre ballon, vous ne parlez pas d'explosion pour décrire son évolution. Il se dilate, tout simplement. Idem pour l'Univers. Attention : jusqu'à preuve du contraire, il n'y a rien en dehors de l'Univers. Alors n'allez pas imaginer que l'Univers grandit « dans » quelque chose. De même, dire que l'Univers était tout petit n'a pas vraiment de sens. Car même s'il avait la taille d'une tête d'épingle à ses débuts, cette minuscule boule représentait tout l'espace disponible. Autrement dit, il n'y avait rien de plus grand !

L'EXPANSION DE L'UNIVERS DEVRAIT PEU À PEU RALENTIR

Toujours est-il que, parti d'une tête d'épingle, l'Univers se dilate. D'abord très brutalement (*voir dessin ci-contre*), puis à un rythme plus pépère. Car l'expansion est censée ralentir peu à peu sous l'effet de la gravitation. En effet, jusqu'à preuve du contraire, l'attraction gravitationnelle est la seule force à s'exercer sur de grandes distances dans l'Univers. Et cette force rapproche les corps. Au minimum, elle devrait donc au moins freiner l'expansion de l'Univers. Au maximum, elle

ZOOM

Les **puissances négatives** sont un moyen d'écrire des nombres très petits sans utiliser plein de zéros. Par exemple, un milliardième s'écrit 0,000000001. Eh bien avec les puissances négatives, cela donne 10^{-9} . La puissance (le chiffre écrit en petit), indique alors le nombre de zéros à placer devant le 1. C'est quand même plus pratique, non ?

inverserait carrément la tendance, provoquant au final un effondrement de l'Univers sur lui-même. Tout dépend, en fait, de la quantité de matière présente dans l'Univers. Plus la quantité de matière est importante, et plus l'Univers aura de chance de se recontracter fissa. Enfin, ça, c'est ce que l'on croyait. Car, en 1998, les astrophysiciens font une découverte qui va bouleverser notre connaissance de l'histoire de l'Univers... ●

DEPUIS 300000 ANS

L'Univers a ensuite évolué jusqu'à prendre peu à peu le visage que nous lui connaissons aujourd'hui. Il faut attendre un milliard d'années environ pour que les premières étoiles se forment suite à la condensation (sous l'effet de la gravité) d'immenses nuages de gaz, puis qu'elles s'organisent sous la forme de galaxies. Ou l'inverse : les chercheurs ne savent pas encore qui des étoiles ou des galaxies se sont formées en premier. Et l'Univers poursuit son expansion, tranquille, pendant 13 milliards d'années, jusqu'à nos jours.

ILLUSTRATION : FRÉDÉRIC PROVOST POUR SVJ

EN 1998, LES ASTRONOMES S'APERÇOIVENT QUE...

L'UNIVERS S'EMBALLE

COMME UN BATEAU PORTÉ PAR UN COURANT DE PLUS EN PLUS RAPIDE.

En 1998, deux équipes de chercheurs tentent d'estimer le ralentissement de l'expansion de l'Univers. Comment faire? Imaginez un instant que vous êtes sur un voilier s'éloignant doucement de la côte. Voile baissée, sans moteur, vous êtes porté par le courant. Peu à peu, la lumière du phare voisin décroît. «La diminution de l'intensité lumineuse est un bon moyen d'estimer l'éloignement du navire», penserez-vous. Très juste! Et c'est peu ou prou le même raisonnement qu'ont suivi les chercheurs. Sauf que le navire, c'est notre planète. Et le phare est une explosion d'étoile, autrement dit, une supernova. Pendant un jour, la supernova brille comme un milliard de soleils. De quoi

ZOOM

La **loi de Hubble** donne la relation entre la vitesse d'éloignement des galaxies et la distance qui nous sépare d'elles. Elle s'écrit $V = H \times D$, où V est la vitesse de fuite des galaxies, D la distance séparant les galaxies et H une constante appelée constante de Hubble.

illuminer une bonne partie de l'Univers.

L'intensité lumineuse de certains types de supernovæ est très bien connue. Lorsqu'elles ont lieu, elles émettent toujours la même quantité de lumière. En comparant la quantité de lumière émise initialement par l'explosion avec la fraction reçue sur Terre, il est

possible d'estimer leur distance : plus la lumière est faible, plus l'étoile est lointaine. Les cosmologistes ont ainsi répertorié un grand nombre de ces supernovæ, et ils ont estimé la distance qui doit théoriquement les séparer de nous, compte tenu de ce que l'on sait de l'expansion de l'Univers grâce à la **loi de Hubble**.

LES ÉTOILES EXPLOSENT BEAUCOUP PLUS LOIN QUE PRÉVU

Un peu difficile à comprendre? Remontons à bord de notre voilier. L'équivalent de la loi de Hubble, ce serait le courant marin nous éloignant du phare. Un courant un peu particulier car sa force serait proportionnelle à la distance qui nous sépare de la côte : plus on s'éloigne, plus il augmente. Connaissant sa vitesse, nous pourrions estimer la décroissance lumineuse du phare. Si au

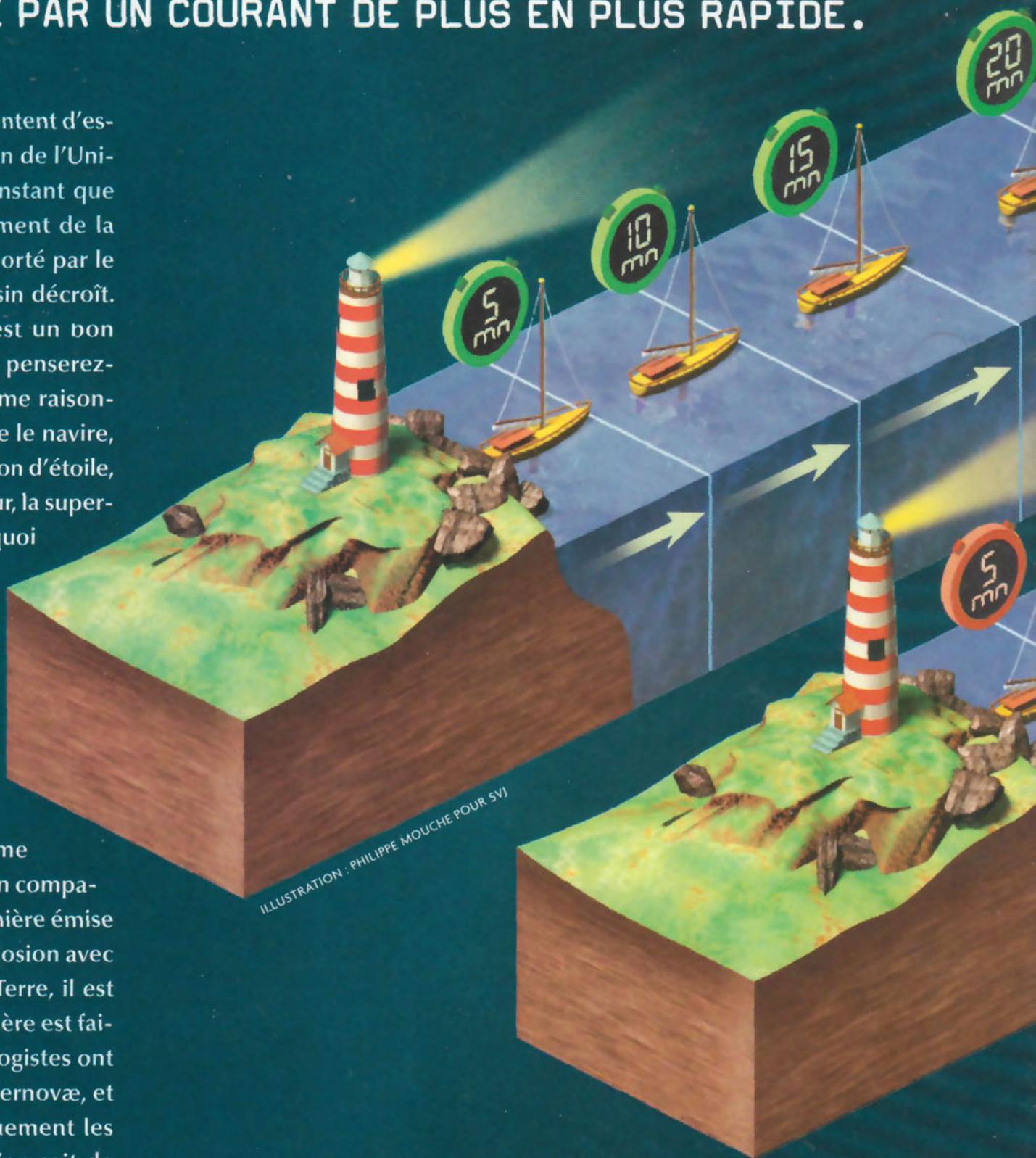


ILLUSTRATION : PHILIPPE MOUCHE POUR SVJ

AU FIL DU COURANT COSMIQUE

Imaginons que le bateau est notre planète, et que le phare est une étoile. Nous serions comme des marins embarqués dans un navire soumis à un courant. Ce dernier augmente lorsqu'on s'éloigne du phare. Les marins observent qu'au bout de cinq minutes, la luminosité du phare a été divisée par 2, cinq minutes plus tard par 4, encore cinq minutes après par 8, etc. Jusqu'en 1998, les chercheurs estimaient que la Terre était un peu comme cette première barque.

Mais en fait, nous sommes plutôt dans le second cas. Au début du voyage, la barque prend régulièrement de la vitesse, comme prévu. Au bout de cinq minutes, la luminosité a été divisée par 2, au bout de dix par 4... Et au bout de quinze minutes, par 8? Eh bien non! Par plus : 12 par exemple. Autrement dit, le courant s'est accru sous l'effet d'une mystérieuse énergie : c'est l'équivalent de l'énergie sombre dans l'Univers.

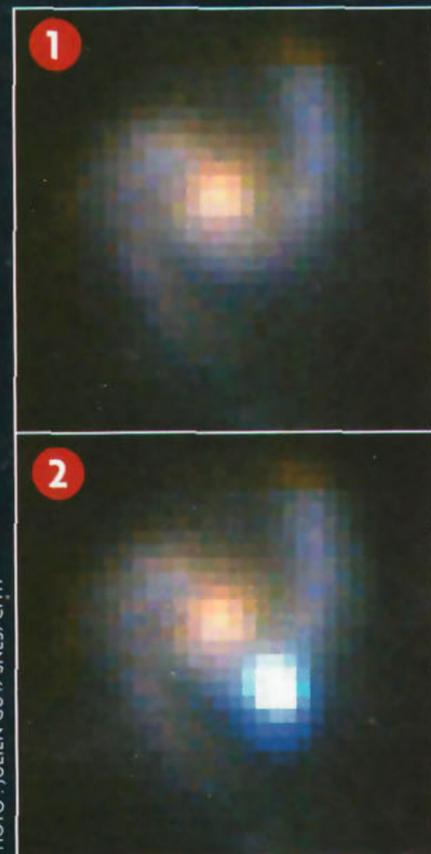
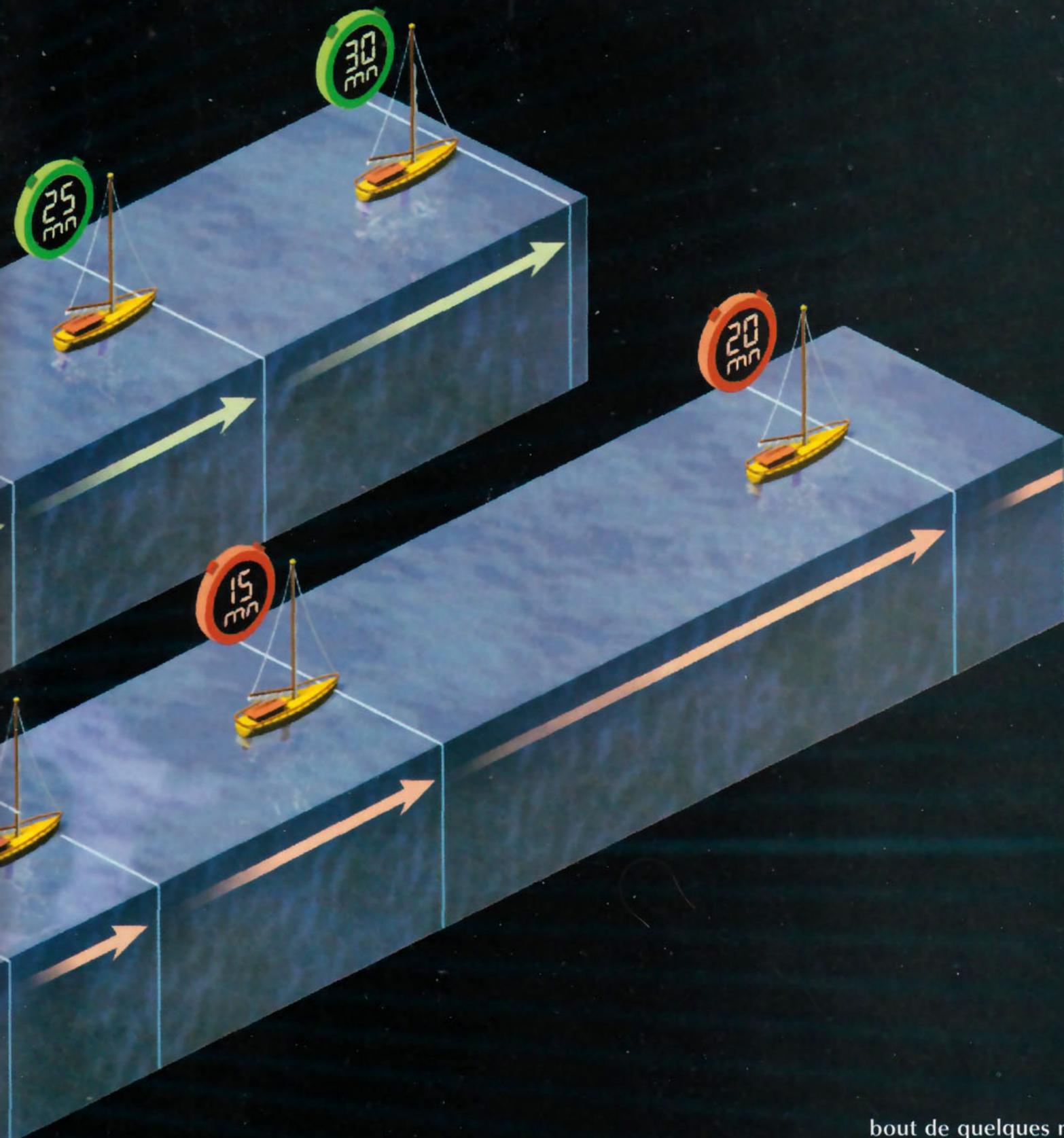


PHOTO : JULIEN GUY/SNLS/CFHT

UNE SUPERNOVA

Cette galaxie contient des milliards d'étoiles **1**. Mais d'un coup, l'une d'elles devient plus brillante que toutes les autres réunies **2**. C'est une supernova, autrement dit l'explosion d'une étoile.



bout de quelques milles la lumière décroît de plus en plus vite, nous en déduisons que le courant est plus rapide que prévu. En revanche, si la décroissance est plus lente, cela signifiera que le courant est de moins en moins fort.

Idem pour les supernovæ que les astronomes scrutent comme des phares. Ils pensent les trouver aussi brillantes, voire plus, que ne le prévoit la loi de Hubble, puisque l'expansion (c'est-à-dire le courant) est supposée rester pépère ou même décroître. Or, ils observent le contraire ! L'éclat des supernovæ est très pâlichon, ce qui signifie qu'elles se trouvent beaucoup plus loin de nous que prévu. Une observation qu'aucun chercheur n'avait imaginée !

En multipliant les observations de supernovæ, les astronomes reconstituent l'évolution de l'Univers et observent que l'accélération de son expansion aurait commencé il y a 4 milliards d'années. Que s'est-il passé à cette époque ? À quoi ressemble ce courant qui dilate l'Univers de plus en plus vite ? Bonjour mystère ! ●

QUELLE EST DONC CETTE ÉNERGIE QUI FAIT GROSSIR L'UNIVERS À TOUTE VITESSE?

3 SUSPECTS POUR UN SOMBRE MYSTÈRE

1^{ER} SUSPECT : LE VIDE

Un univers qui gonfle à toute allure alors qu'on s'attendait à ce qu'il suive un rythme de croissance pépère voire même qu'il ralentisse? Surprise colossale! En cette fin des années 1990, les scientifiques ont beau se creuser la tête, ils n'ont pas dans l'immédiat de candidat pour appuyer sur l'accélérateur de l'expansion cosmique. Alors ils lui donnent un nom qui traduit bien leur impuissance, «l'énergie sombre». Seule certitude : cette énergie a le pouvoir de vaincre la gravitation et d'envoyer valdinguer les galaxies dans tout l'Univers. Et elle est partout. Les chercheurs ont calculé que pour botter ainsi sans ména-

gement les galaxies, l'énergie sombre devait représenter 73% de tout ce qui se trouve dans le cosmos (*voir camembert ci-contre*)! En clair, les physiciens courent tout simplement après la chose la plus abondante dans l'Univers. C'est tout de même vexant de ne pas savoir à quoi elle ressemble...

UNE FORCE SUPÉRIEURE À CELLE DE LA GRAVITATION

Mais les chercheurs n'ont pas dit leur dernier mot. Sitôt l'accélération de l'expansion confirmée, certains d'entre eux avancent une hypothèse. Et, ô surprise, ils vont la piocher dans un livre d'histoire! Rappelez-vous Einstein et son univers statique. Pour éviter que celui-ci ne s'effondre sur lui-même à cause de la gravitation, il avait introduit une constante cosmologique. Elle devait s'opposer pile-poil à la gravitation et maintenir l'Univers immobile. Einstein y avait ensuite renoncé, après que Hubble eut découvert que l'Univers était en expansion. Eh bien, soixante ans après son piteux enterrement, des physiciens ont entrepris de la ressusciter.

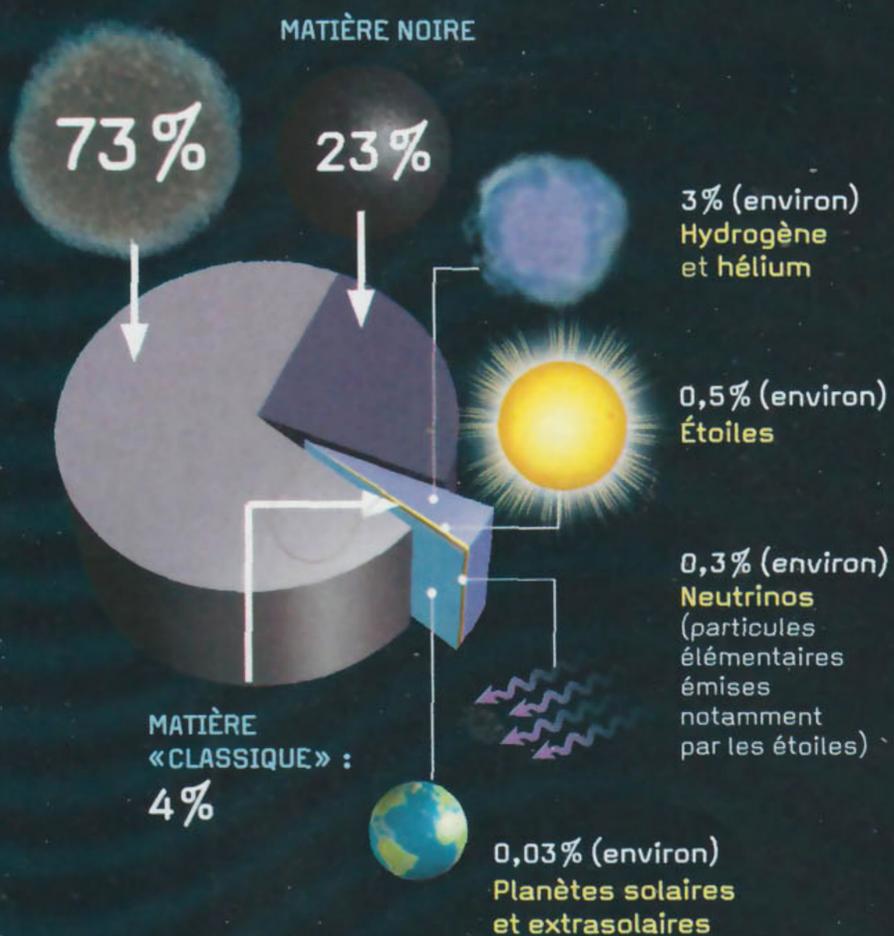
En effet, cette force capable de s'opposer à la gravitation, c'est justement ce que l'on cherche. Bien sûr, pas question de revenir exactement à la constante d'Einstein. La «nouvelle» constante cosmologique serait plus musclée que l'ancienne. Car elle ne se contenterait pas de contrebalancer la gravitation, elle la battrait à plates coutures! Seulement, pour en savoir plus, il faut trouver à quoi correspond physiquement cette constante cosmologique. Pour l'instant, c'est juste un être mathématique purement abstrait. Or, comment prouver son existence, si l'on ne sait même pas quoi observer... ➔



LA RÉPARTITION DE L'ÉNERGIE DANS L'UNIVERS

En pourcentage de l'énergie totale contenue dans l'Univers.

ÉNERGIE SOMBRE



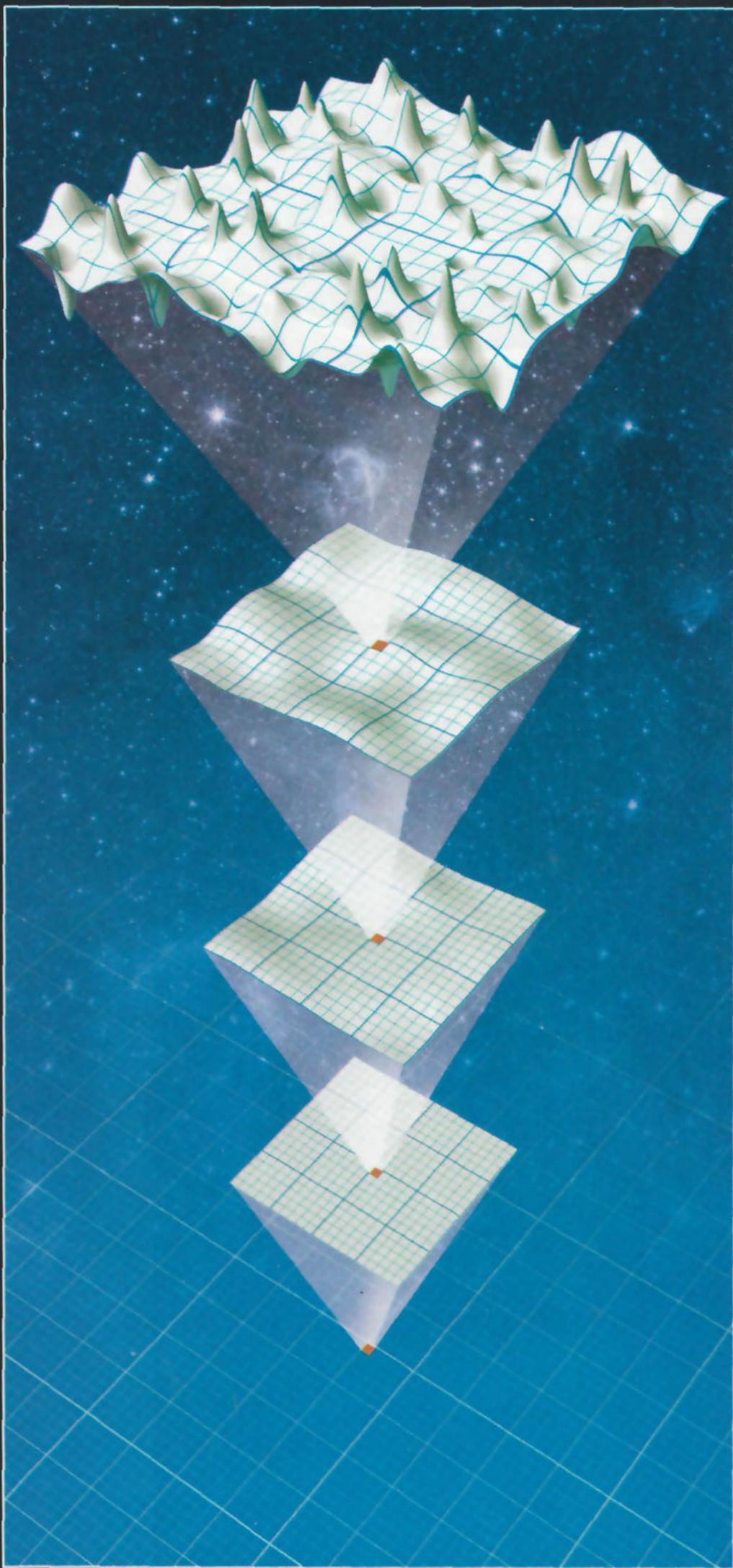
COMMENT ÉVALUE-T-ON LA QUANTITÉ D'ÉNERGIE SOMBRE DE L'UNIVERS ?

Peser l'Univers ? Pas évident a priori. Mais les chercheurs ont une méthode : observer sa courbure. Reprenons l'image du drap. Plus vous mettez de choses dedans, et plus il se creuse. La courbure traduit ce « creusement ». Dans le cas de l'Univers, c'est plus compliqué car l'espace possède trois dimensions et non deux comme notre drap. Mais l'idée est la même : sa courbure dépend uniquement de la quantité d'énergie qu'il contient. Donc la mesurer est une bonne méthode pour peser (depuis Einstein, masse et énergie sont équivalentes) l'Univers.

Il y a une autre méthode pour arriver à ce résultat : additionner toutes les formes de matière connue dans l'Univers (nuages de gaz, étoiles, planètes...) et voir si on retrouve la même quantité d'énergie. Cela revient en fait à additionner des amas de galaxies au sein desquels est concentrée la matière. Alors, ça donne quoi ? Eh bien nous sommes loin du compte ! Les physiciens n'arrivent qu'à 27% de ce qu'ils ont trouvé avec la courbure de l'Univers. Les 73% restant, c'est de l'inconnu : la part d'énergie sombre.

Ce n'est pas la seule surprise. Les chercheurs ont aussi comparé la masse d'un amas de galaxies avec la somme de toute la matière visible qui le compose (nuages de gaz, étoiles, planètes...). Là encore, l'écart est énorme. La matière visible n'est responsable que d'environ 15% de la masse de l'amas. Le reste, réparti dans les galaxies et entre les galaxies, c'est de la matière dite noire, dont on ignore la nature. Tout ce que l'on peut dire, c'est que ce n'est pas de l'énergie sombre. Sinon, son effet répulsif disloquerait les amas.

ILLUSTRATIONS : PHILIPPE MOUCHE POUR SVJ



UN VIDE PLEIN D'ÉNERGIE

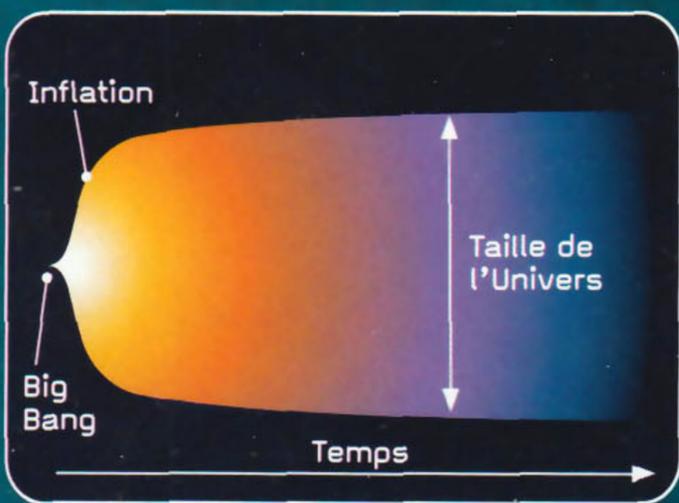
Pour les physiciens, le vide de l'espace ne serait qu'un leurre ! Selon eux, en zoomant sur n'importe quelle zone vide de l'espace, on découvrirait qu'elle bouillonne en fait de particules qui apparaissent et disparaissent sans cesse. Ainsi, si l'on représentait l'Univers comme une surface (comme ci-dessus), on découvrirait en zoomant de plus en plus que, loin d'être plane, celle-ci est toute en creux et en bosses. Comme si elle était agitée par quelque chose : des particules en mouvement, donc de l'énergie.



UNE ÉNERGIE QUI DILATE L'UNIVERS SANS SE DILUER

L'énergie du vide agirait comme une force dilatant l'Univers en chacun de ses points. Propriété remarquable : l'énergie du vide ne se dilue pas au fur et à mesure de l'expansion. Sa densité reste constante car le «nouveau» vide naît doté toujours de la même énergie.

Le costume physique de la constante cosmologique doit posséder au moins deux qualités : repousser la matière et être constant dans tout l'Univers observable. Pas question, par exemple, d'imaginer une sorte de gaz répulsif qui se diluerait au fur et à mesure de la dilatation de l'Univers et dont l'effet s'affaiblirait. En tout point de l'espace, la manifestation physique de la constante cosmologique doit être... constante.



L'ANCIENNE SILHOUETTE DE L'HISTOIRE DE L'UNIVERS

Après une très courte période d'inflation, la taille de l'Univers a grossi à un rythme pépère jusqu'à aujourd'hui. C'est ce qu'on pensait jusqu'en 1998...



LA NOUVELLE SILHOUETTE

La découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers a changé l'histoire du Big Bang. Au début, il y a toujours la même inflation, suivie d'une expansion pépère. Puis, il y a 4 milliards d'années, cette expansion s'est accélérée, lentement d'abord, puis plus rapidement, sous l'action de l'énergie sombre.

LE VIDE ? IL EST PLEIN COMME UN ŒUF !

Bref, pas évident de dégouter un tel costume. Pourtant, dès 1998, les physiciens ont un candidat : le vide. C'est très sérieux ! Le vide des physiciens n'a rien à voir avec le nôtre. Il est plein comme un œuf. Pour comprendre, imaginez la surface de l'océan. Vue d'avion, elle semble plate. Mais en y regardant de plus près, on aperçoit des creux et des bosses sans cesse en mouvement (voir schéma p. 59). Eh bien le vide des physiciens, c'est pareil. À première vue, il n'y a rien. Mais en regardant de très près, vous verriez un bouillonnement de particules qui apparaissent et se détruisent mutuellement lorsqu'elles se rencontrent. Pour les chercheurs, ce bouillonnement de particules inconnues exercerait une pression sur tout ce qui l'entoure. Une pression qui repousserait la matière. Mais on ignore par quel procédé...

Autre qualité de l'énergie du vide : elle est constante. En effet, l'Univers, en se dilatant, engendre de nouvelles zones de vide. Mais elles naissent avec toujours la même quantité d'énergie, centimètre cube après centimètre



LE PLUS GRAND DÉSACCORD DE TOUS LES TEMPS

L'énergie du vide, selon les physiciens dudit vide, est 10^{120} plus grande que celle estimée par leurs collègues cosmologistes. Ce n'est plus une divergence de vue, c'est un hypermégamonstrueux gouffre! Grimpons progressivement vers 10^{120} pour vous donner une idée vertigineuse de l'écart qui sépare les deux estimations. 10^{11} , c'est 100 milliards, le nombre d'étoiles contenues dans notre Galaxie. 10^{51} , c'est la masse de l'Univers exprimée en kilos. 10^{80} situe le nombre d'atomes présents dans l'Univers tout entier. Prenez ce dernier chiffre et multipliez-le par 10000 milliards de milliards de milliards de milliards et, ouf, vous arrivez à 10^{120} ...

ILLUSTRATIONS : PHILIPPE MOUCHE POUR SVJ

ZOOM

La **force gravitationnelle** agit entre deux corps de masse m_1 et m_2 . Chaque corps exerce sur l'autre une force égale à : $G \times \frac{m_1 \times m_2}{d^2}$

où G est la constante gravitationnelle et d , la distance qui sépare les deux corps. On voit ainsi que cette force diminue lorsque la distance entre les corps augmente.

cube. Or, le vide ne peut pas exister sans l'énergie qui l'accompagne.

L'énergie du vide entre donc sans problème dans les habits de la constante cosmologique et dans ceux de l'énergie sombre. Avec elle, reprenons donc le fil de l'histoire de l'Univers. Après la phase d'inflation, la gravitation aurait eu le dessus sur l'énergie du vide. Elle aurait ainsi freiné l'expansion de l'Univers. Puis, il y a environ 4 milliards d'années, l'énergie du vide, toujours plus grande à mesure que l'Univers se dilatait, aurait fini par surpasser la **force gravitationnelle**. Car cette dernière va s'affaiblissant à mesure que s'éloignent les galaxies les unes des autres. Libérée des liens tissés entre les galaxies par la gravitation, l'expansion serait repartie de plus belle.

Il y a toutefois un hic. Rappelez-vous : pour les cosmologistes (qui étudient les grands objets de l'Univers), l'énergie sombre doit représenter 73% de tout ce qu'il y a dans l'Univers. Or, les physiciens des particules (qui, eux, se penchent sur l'infiniment petit), inventeurs du concept d'énergie du vide, ont estimé la quantité totale d'énergie du vide présente dans l'Univers. Et la valeur qu'ils ont trouvée est, à la louche, 10^{120} fois supérieure à celle nécessaire pour expliquer les effets de l'énergie sombre! Difficile d'imaginer un plus grand désaccord (voir encadré ci-dessus). Qui se trompe dans son estimation? À moins que l'énergie du vide n'ait rien à voir avec l'énergie sombre. Après tout, il y a d'autres candidats...

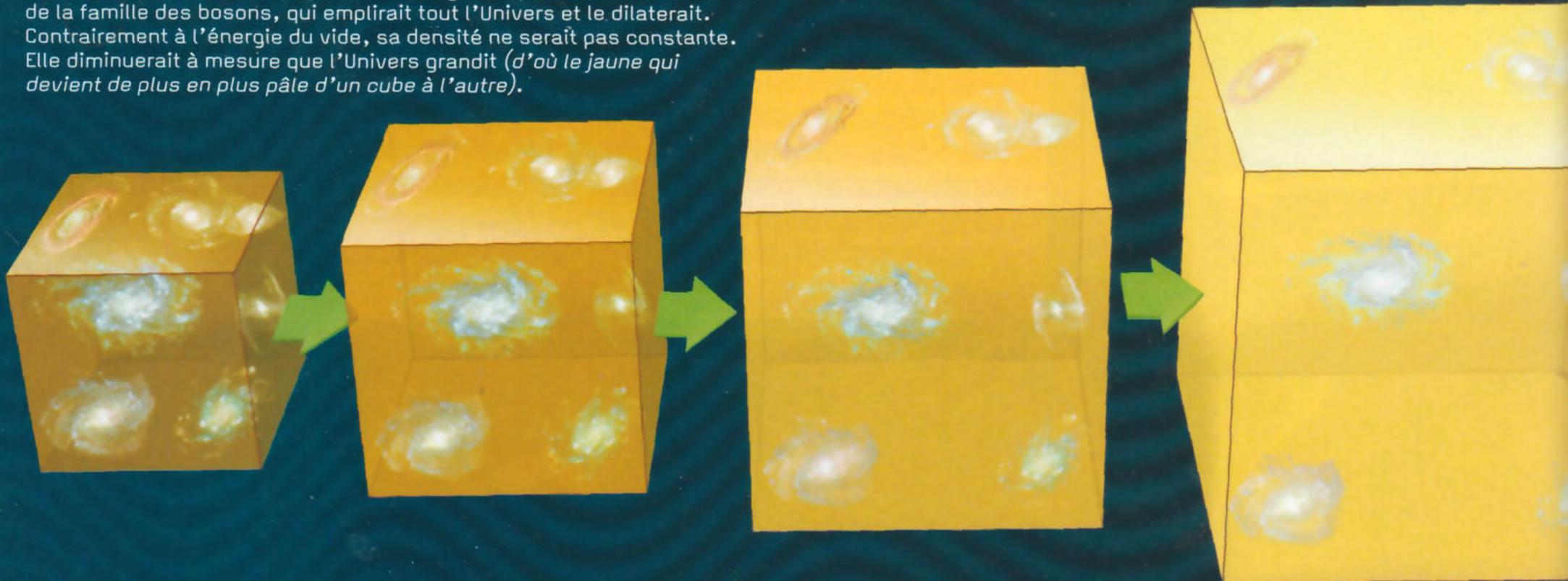


ILLUSTRATION : FRÉDÉRIC PROVOST POUR SVJ



UNE ÉNERGIE QUI SE DILUerait À MESURE QUE L'UNIVERS AUGMENTE

L'énergie sombre pourrait agir comme un gaz de particules élémentaires, de la famille des bosons, qui emplirait tout l'Univers et le dilaterait. Contrairement à l'énergie du vide, sa densité ne serait pas constante. Elle diminuerait à mesure que l'Univers grandit (d'où le jaune qui devient de plus en plus pâle d'un cube à l'autre).



L'autre candidat pour incarner l'énergie sombre, c'est la quintessence. À lui seul, le nom est tout un programme... Durant l'Antiquité, la quintessence désignait le cinquième élément qu'il fallait ajouter à l'air, l'eau, la terre et le feu pour décrire l'Univers. De quel élément s'agissait-il? Rien à voir avec l'amour, contrairement à la conclusion du film de Luc Besson, *Le Cinquième Élément*. Pour les savants de l'Antiquité, c'était l'éther, un fluide très léger censé flotter au-dessus de l'atmosphère.

Après la constante cosmologique d'Einstein, les physiciens auraient-ils décidé d'exhumer l'éther des

dans les yeux, il faut descendre plusieurs échelles de grandeur en dessous des atomes. Bienvenue dans le royaume des particules élémentaires qui sont à la base de la matière. Vous avez peut-être entendu parler des protons et des neutrons par exemple, qui sont les briques élémentaires des noyaux d'atomes. Eh bien, les particules lorgnées par les physiciens appartiendraient à une sous-famille de particules élémentaires, les bosons.

“ Ce gaz imprégnerait l'Univers tout entier tel un fin brouillard. ”

Anciens? Non. C'est simplement le meilleur nom qu'ils ont trouvé pour décrire un gaz qui imprégnerait l'Univers tout entier, tel un fin brouillard. Un gaz qui dilaterait l'Univers, faisant fuir la matière. À quoi ressemble-t-il, ce fameux gaz? Autant vous l'avouer tout de suite, à rien de connu. Les physiciens décrivent le comportement de la quintessence comme celui d'un gaz. Mais cela ne signifie pas que c'est un gaz! Eh oui, parfois c'est drôlement subtil la physique...

La quintessence n'a en effet rien à voir avec une bouffée d'oxygène ou d'hydrogène. Pour la regarder





PREMIERS RÉSULTATS ET FORTS SOUPÇONS SUR LE VIDE

Selon les différents suspects pour l'énergie sombre, la répartition des galaxies dans l'Univers et l'accélération de l'expansion sont différentes. L'observation de l'Univers devrait donc permettre aux astronomes de choisir entre les différentes hypothèses.

Démarrée en 2003, SuperNova Legacy Survey (SNLS) est l'une des principales expériences sur l'énergie sombre. Elle traque des explosions d'étoiles qui sont, pour les physiciens, comme des phares dans l'Univers. SNLS recherche particulièrement les supernovæ de type IA (SNIA en abrégé, voir p. 56), qui sont parmi les plus brillantes de l'Univers. Seulement, elles sont rares : une à deux par millénaire dans une galaxie comme la nôtre ! Autant dire que pour en voir une, mieux vaut observer

beaucoup de galaxies à la fois ! Ainsi, les astronomes installés au télescope franco-canadien d'Hawaï (États-Unis) observent à chaque campagne de 50 000 à 100 000 galaxies.

Dès qu'une supernova SNIA est détectée, les chercheurs déterminent quand elle a explosé et quelle distance nous sépare d'elle. Ils disposent ainsi de balises dans l'Univers qui témoignent de l'accélération de son expansion. Reste à comparer cette accélération avec celle prédite par les différents modèles : énergie du vide ou quintessence par exemple. Les premiers résultats parus en novembre 2005, sur 71 supernovæ, vont dans le sens du premier modèle. Mais ça reste à vérifier. Pour cela, les chercheurs disposent encore de trois ans d'observations. Au total, ils espèrent étudier 700 supernovæ.

Dans la tribu bosons, on ne donne pas dans la fabrication d'atomes. Non, leur truc, c'est la communication ! Dans le langage des physiciens, les bosons sont des porteurs d'interactions. Pour comprendre, imaginez que vous ayez besoin de joindre l'un de vos camarades. Vous avez plusieurs solutions : prendre le bus pour aller chez lui, lui téléphoner ou encore lui envoyer une lettre. Eh bien la compagnie de transport de votre ville, les impulsions électriques transportant votre voix dans le fil du téléphone ou encore le fac-

teur sont des bosons. Ils vous permettent d'interagir avec votre camarade.

OÙ SE CACHENT LES BOSONS QUI FONT GONFLER L'UNIVERS ?

En physique, l'un des bosons les plus célèbres est le photon, qui porte sur ses épaules la lumière. Autre exemple : depuis des années, les physiciens sont à la recherche du graviton, le boson qui s'échangerait entre deux corps soumis à la force d'attraction gravitationnelle. Quant au boson qui formerait la quintessence et serait donc le porteur de l'énergie sombre, il se nommerait « dilaton » ou encore « cosmion ». Mais pour l'instant, il n'a jamais été observé, ni dans l'espace ni dans les détecteurs de particules installés sur Terre.

L'histoire de l'Univers rempli de ce gaz de bosons ressemble à celle de l'Univers de l'énergie du vide (voir pages précédentes). D'abord, la gravitation aurait eu le dessus sur la force de répulsion générée par la quintessence. Puis, l'Univers se dilatant, celle-ci l'aurait finalement emporté sur la gravitation, entraînant l'accélération de l'expansion de l'Univers. Toutefois, il y a tout de même une différence de taille avec l'énergie du vide des pages précédentes. Contrairement à cette dernière, la densité d'énergie trimballée par la quintessence ne serait pas constante. Le gaz se dilatant de plus en plus à mesure que l'Univers grandit, la densité d'énergie sombre diminuerait avec le temps. Cette variation de densité d'énergie, c'est justement ce qu'essaient de détecter les chercheurs dans leurs expériences (voir encadré ci-dessus).

POUR ÉLOIGNER UNE GALAXIE... Y'A PAS MIEUX QUE LE GAZ À BOSONS!!



ILLUSTRATION : FRÉDÉRIC PROVOST POUR SVJ

Les partisans de l'énergie sombre ont des idées noires. Pour l'heure, ni l'énergie du vide ni la quintessence ne permettent d'expliquer de manière satisfaisante l'accélération de l'expansion de l'Univers. C'est pourquoi certains physiciens ont décidé d'emprunter une autre voie. Après tout, ce qui ne va pas dans cette histoire, c'est la gravitation. Elle ne fait plus son boulot qui consiste à contenir l'expansion de l'Univers, en liant les corps entre eux. Jusqu'à présent, nous avons imaginé que la malheureuse était empêchée par une mystérieuse énergie sombre. Mais si c'était elle qui déraillait? Et si, sur de grandes distances, la fameuse attraction gravitationnelle finissait par lâcher la rampe toute seule? Cette possibilité est prise très au sérieux par une équipe de physiciens théoriciens franco-américaine. Ils sont bien décidés à mettre sur le grill la gravitation qui, flairée par Galilée, découverte par Newton, puis corrigée par Einstein, est peut-être sur le point de subir un nouveau toilettage. Ô sacrilège suprême! Comment peut-on imaginer toucher à un tel monument de la physique?

LA GRAVITATION À LONGUE DISTANCE SERAIT TROP FAIBLE POUR S'OPPOSER À L'EXPANSION

Avant d'aller plus loin, un petit rappel pour ceux qui n'auraient pas encore potassé la force d'attraction gravitationnelle en cours de physique. Pas d'équation, rassurez-vous, juste l'essentiel : cette force s'exerce entre deux corps et son intensité est égale au produit de la masse de ces corps divisé par le carré de la distance qui les sépare. Avec cette formule, vous pouvez expliquer sans problème les différentes observations du quotidien qui impliquent la gravitation : la chute d'une pomme, le mouvement en cloche d'un ballon et même la rota-

“ La gravitation s'affaiblirait du fait d'une fuite de gravitons. ”

tion de la Terre autour du Soleil. Seulement, si l'on commence à vouloir s'en servir sur de très grandes distances, celles qui séparent les galaxies, il se pourrait que la formule donnée plus haut ne soit plus juste.

Pour comprendre, il faut retourner dans le monde de la physique des particules. Qu'avons-nous vu dans la double page précédente? Il existe des particules élémentaires, les bosons, qui sont les messagères de la matière. L'attraction

ILLUSTRATION : FRÉDÉRIC PROVOST, POUR SVJ



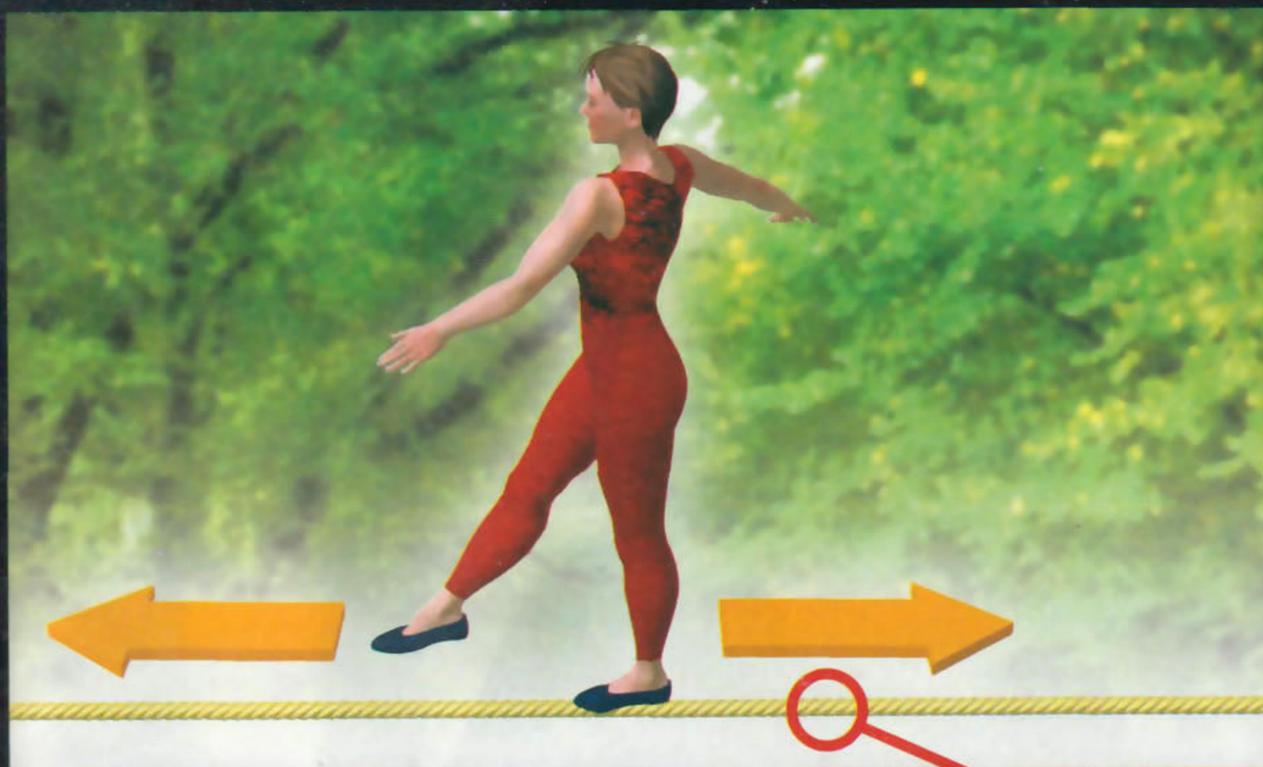
gravitationnelle qui s'exerce entre deux corps peut être vue comme un échange de bosons particuliers appelés gravitons. Ainsi, vous pouvez imaginer que le Soleil et la Terre, en interaction gravitationnelle, échangent des gravitons. À faible distance, tout va bien. Les gravitons voyageraient d'un astre à l'autre sans problème. Mais à grande distance, il y aurait des fuites. Exactement comme de l'eau coulant dans un tuyau percé, tous les gravitons ne se retrouveraient pas à l'arrivée. Or, l'intensité de l'attraction dépend de ces gravitons. Si certains manquent à l'appel, la gravitation se relâche.

Mais où ces particules passent-elles donc? Sur quoi débouchent les trous du tuyau? C'est là que cela devient très sport : elles disparaîtraient... dans une cinquième dimension! Eh oui, c'est un des séismes qui secouent actuellement la physique. En plus des quatre dimensions (trois d'espace, une de temps) dans lesquelles nous évoluons, il existerait d'autres dimensions que nous n'avons pas encore explorées. Tout simplement parce qu'elles seraient trop petites, repliées sur elles-mêmes (voir schéma page de droite).

Ainsi, l'une des plus fameuses formules de la physique serait susceptible de changer de forme. Il ne faudrait

UNE DIMENSION POUR L'HOMME, DEUX POUR LA FOURMI

Des gravitons fuiraient dans une dimension cachée ! Ça ressemble à quoi, une dimension cachée ? Tout se passe un peu comme si vous deviez marcher sur une corde. Elle vous apparaîtrait comme un monde à une dimension, puisque vous n'auriez le choix d'avancer (ou de reculer) que dans une direction. Mais une petite fourmi la verrait comme un monde à deux dimensions car elle pourrait, vu sa taille, faire aussi le tour de la corde.



ILLUSTRATIONS : PHILIPPE MOUCHE POUR SVJ



plus diviser le produit des masses par le carré de la distance les séparant, mais par le cube ! Autrement dit, la gravitation « longue distance » s'affaiblirait bien plus vite que dans sa forme « courte distance ». Au final, les chercheurs ont même démontré, grâce à des modèles mathématiques très poussés, que non seulement la gravitation s'affaiblirait du fait de cette fuite de gravitons, mais qu'elle pourrait même changer de signe et devenir répulsive ! Là, difficile de trouver une image pour comprendre. C'est vraiment de l'abstrait. Mais dans cette configuration, les chercheurs n'auraient plus besoin d'énergie sombre pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers. Elle serait toujours le fait de la gravitation, plus que jamais seule force à s'exercer à très grande distance dans le cosmos. ●

POUR EN SAVOIR +

- Assez accessible : *Les Avatars du vide*, de Marc Lachièze-Rey, éd. Le Pommier.
- Plus complexe : *Matière noire, énergie noire*, de Michel Cassé, éd. Odile Jacob.

Remerciements aux astrophysiciens : James Rich, du Commissariat à l'énergie atomique (CEA); Cédric Deffayet, de l'Institut d'astrophysique de Paris (CNRS); Marc Lachièze-Rey, du Centre d'étude de Saclay (CNRS); et Pierre Astier (CNRS).