

L'UNIVERS A HORREUR
DU VIDE

LES MÉTAMORPHOSES DU **VIDE**

LE VIDE FOISSONNANT
DES PHYSICIENS

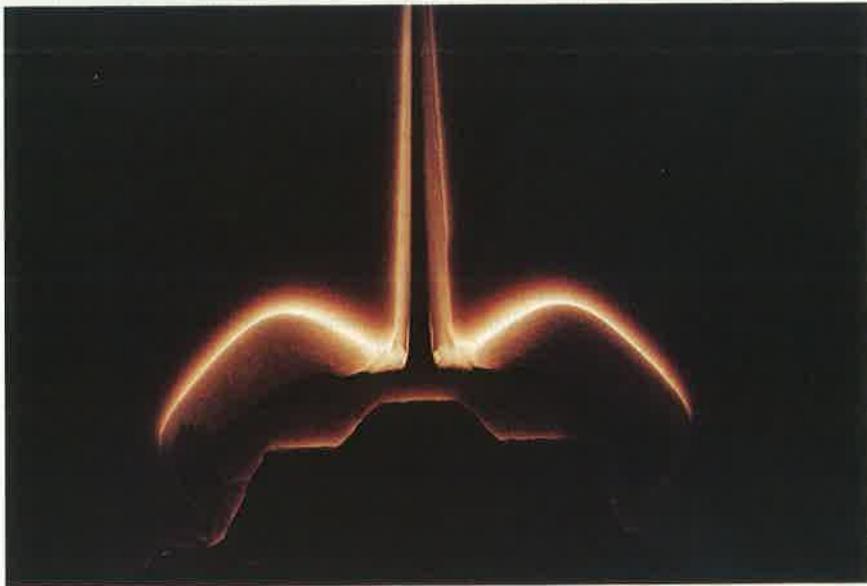
LES VERTIGES DE L'ÉTHER



L'UNIVERS A HORREUR DU VIDE

Juste retour des choses ? C'est lorsque les astronomes ont enfin daigné reconnaître sa réalité que le vide a commencé à leur échapper. Il suffit pour s'en convaincre de partir à sa recherche dans les grands espaces cosmiques. Apparaît-il entre les étoiles ? Quel est le degré — et surtout la nature — du "vide" séparant les galaxies ? Cartographie.

par Jean-Marc BONNET-BIDAUD
astrophysicien au CEA



LA nature a horreur du vide", telle était la devise de l'honnête homme du XVII^e siècle. Philosophes et scientifiques s'accordaient tous sur ce point et déclaraient le vide hors-la-loi. Descartes affirmait même : "Il n'est pas moins impossible qu'un espace soit vide qu'il n'est qu'une montagne soit sans vallée." Le vide était alors une antithèse de la

nature, une sorte d'anormalité. Mis au ban de la science, il allait pourtant revenir au galop, un siècle plus tard, sous un nom d'emprunt, l'éther. Ce nouveau vide, pas tout à fait vide, semblait s'imposer de lui-même pour expliquer la propagation mystérieuse des ondes électromagnétiques. Mais cet éther n'allait pas résister, en 1864, aux équations de Maxwell qui

démontrèrent que les ondes n'avaient besoin d'aucun support matériel pour se propager. La physique moderne allait définitivement réhabiliter le vide et le hisser au rang d'un acteur essentiel dans les théories et les laboratoires.

De nombreuses lois physiques ne sont vérifiées qu'avec son concours. Ainsi, le kilo de plume et le kilo de plomb ne tombent-ils à la même vitesse que dans le vide le plus absolu — condition également nécessaire pour que la lumière atteigne sa vitesse maximale de 300 000 km/s. Le vide est aussi omniprésent dans la vie courante : il est par exemple indispensable dans les ampoules électriques ou dans les tubes de télévisions.

Mais qu'entend-on exactement par "vide" ? Si le sens commun nous dit que le vide est ce qui reste quand on a tout enlevé, peut-on arriver à un vide absolu ? Un espace peut être vide de quelque chose, mais peut-il être vide de *tout* ? Plus que jamais la notion de "vide" est aujourd'hui paradoxale. L'astronomie nous en fournit un exemple spectaculaire. D'un côté, le vide astronomique est sans doute la réalisation la plus approchée du vide absolu avec un nombre infinitésimal de particules noyées dans un océan d'espace. De l'autre, le vide de l'Univers apparaît aujourd'hui comme l'état potentiel de l'existence de toute matière, et l'Univers pourrait avoir surgi des fluctuations d'un étrange vide quantique. Tout ou rien, le vide astronomique nous joue un tour de passe-passe qui met notre sens commun en déroute.

Malgré les apparences, l'espace interplanétaire n'est pas vide. Le noir profond du ciel cache une énorme quantité de matière et de rayonnement. Ainsi, la navette ou le télescope Hubble, à 600 km d'altitude, voguent dans une très légère atmosphère, comptant plus d'un million d'atomes par centimètre cube. Plus loin, entre la Terre et la Lune, la densité de matière est bien moindre : trois mille atomes par centimètre cube.

Avant de nous aventurer dans le vide des espaces intersidéraux, nous pouvons d'abord constater que notre perception du réel est bien limitée lorsqu'il s'agit d'appréhender la matière. Savez-vous que ce que nous appelons la terre ferme n'est en fait qu'un vague réseau arachnéen tissé sur un abîme de vide ? Que nous-mêmes ne sommes qu'accessoirement poussières et essentiellement faits de vide ! La matière ordinaire est vide à beaucoup plus que 99,99 %. "Si l'on éliminait tout l'espace vacant dans le corps de l'homme et que l'on rassemblât tous les protons et les électrons en une seule masse, l'homme



Notre étoile déverse à chaque seconde un million de tonnes de matière dans l'espace. Le Système solaire baigne ainsi entièrement dans un bain de lumière et de particules. Durant les éclipses totales de Soleil, la diaphane couronne apparaît, mais sa densité est encore des millions de fois supérieure à celle du vent solaire lorsque celui-ci atteint les parages de la Terre, après un parcours de 150 millions de kilomètres, effectué en quatre jours.

serait réduit à un point tout juste visible à la loupe", constatait l'astronome anglais Eddington au début de ce siècle. Si la même opération était réalisée sur la pyramide de Chéops, ses sept millions de tonnes tiendraient dans un cube de 3 mm de côté et l'Everest serait réduit à un petit tas tout juste gros comme une taupinière. Nous qui faisons aveuglément confiance à la matière reposons donc sur du vide et l'on peut légitimement s'étonner de ne pas passer au travers !

Le miracle est réalisé par la mécanique quantique. La matière est en effet constituée de noyaux atomiques, agrégats de

Vue de loin, la coquille gazeuse d'une nébuleuse planétaire semble très dense. Le gaz qui s'échappe à 10 km/s provient de l'enveloppe expulsée par une étoile géante. L'hydrogène ionisé apparaît en rouge, l'oxygène en bleu. Dans cet anneau de fumée, la masse du Soleil se dilue lentement dans un volume qui peut atteindre dix années-lumière cube ! En quelques milliers d'années, la nébuleuse se fond dans le milieu interstellaire.



protons et de neutrons, autour desquels tournent des électrons. Or ceux-ci sont doués d'une force herculéenne car ils peuvent résister à d'énormes pressions. Ils obéissent en effet à l'un des principes essentiels de la mécanique quantique, le principe d'exclusion de Pauli, qui empêche deux électrons d'avoir les mêmes caractéristiques. Du même coup, impossible de les empiler les uns contre les autres autour des noyaux. Ils forment un écran incompressible et maintiennent les noyaux à distance les uns des autres. Dans la matière ordinaire, chaque noyau est ainsi séparé du prochain par une distance égale à environ cinquante mille fois son rayon.

L'espace entre les deux est rempli de quelques électrons et de... vide.

Il existe pourtant de rares cas extrêmes où les électrons ne peuvent résister. Les astronomes les connaissent bien, ce sont les étoiles à neutrons. La matière y est comprimée en un empilement de noyaux réduits à de simples neutrons et sa densité est alors celle des noyaux atomiques eux-mêmes. Un grain de sable de cette matière pèse 50 000 tonnes, soit près de dix fois la tour Eiffel. C'est l'exemple le plus parfait d'une matière sans vide mais il faut pour la produire les conditions très particulières d'une explosion d'une étoile très massive.

Comparée à cela, la matière ordinaire, avec ses quelques grammes par centimètre cube, est effectivement bien vide. Pourtant, tout est affaire de point de vue : l'éternel problème de la bouteille à moitié pleine ou à moitié vide, car il y a encore loin de cette matière au vrai vide, qui se compte en quelques atomes par centimètre cube ! De prime abord, on pourrait croire que celui-ci se cache dans nos laboratoires, que l'homme l'a dompté et l'utilise quotidiennement : aujourd'hui, la technique du vide est devenue indispensable dans de nombreux domaines, depuis la fabrication des semi-conducteurs et des circuits électroniques jusqu'à la lyophilisation des aliments. Les ampoules électriques ne contiennent plus qu'une molécule d'air sur un million et les tubes de télévision sont cent milliards de fois plus vides que la pièce dans laquelle ils se trou-

vent. Mais une fois de plus, la nature nous a tendu un piège. Ce que nous prenons pour un vide poussé dans nos laboratoires n'est encore que très relatif. L'ampoule électrique dans laquelle on a fait le vide ne contient plus que des traces infimes de gaz, environ un centième de microgramme d'air, mais c'est encore plus de trente mille milliards d'atomes par centimètre cube ! La faute en est à l'insoutenable légèreté des

Quoi de plus vide a priori que l'espace qui s'étend entre les étoiles ?

noyaux atomiques. La nature est ainsi faite que, dans un gramme d'air, il y a environ autant d'atomes que d'étoiles dans l'Univers, soit les cent milliards d'étoiles de chaque galaxie multipliés par les cent milliards de galaxies de l'Univers. Le chemin vers le vide absolu est encore long et, cette fois-ci, pour espérer le rencontrer, il faut s'embarquer dans un voyage galactique.



En pleine Voie lactée, aux confins des constellations d'Ophiuchus et du Scorpion, se trouve l'une des régions les plus jeunes et riches de notre galaxie. Au cœur de cet immense nuage, en grande partie opaque, les télescopes infrarouges et millimétriques détectent des molécules complexes. Ainsi, dans un centimètre cube de "vide" de cette région interstellaire, les astronomes comptent jusqu'à un million d'atomes ! Une étoile supergéante comme Antares, l'astre orangé en bas de cette photographie, est un million de fois moins dense que le Soleil.

La meilleure façon de tomber dans le vide, c'est encore de s'élever... De la surface terrestre, on peut commencer par atteindre les plus hauts sommets. En haut de l'Everest, on respire nettement moins bien. La raison en est claire, il ne reste plus que 40 % de l'air qui existe au niveau de la mer et on respire déjà 60 % de vide. Si l'on poursuit cette ascension par la pensée, la quantité de molécules décroît dramatiquement dans la stratosphère et, au-delà de 40 km, il n'en reste déjà plus que trois pour mille. À une altitude d'environ 90 km, il en reste la même proportion qu'à l'intérieur d'une ampoule électrique et, vers 150 km, le vide avoisine celui des tubes de télévision. À 300 km, l'altitude de la station orbitale russe Mir ou de la navette américaine, le scaphandre est bien sûr obligatoire car la pression est dix milliards de fois plus faible qu'au sol, mais les cosmonautes évoluent dans un bain où subsistent encore huit cents millions d'atomes par centimètre

cube ! En s'éloignant encore de la Terre, on atteint, au-delà de 1 000 km, l'exosphère, la limite extrême de l'atmosphère terrestre où le nombre d'atomes n'est plus que de 150 000 par centimètre cube.

Au-delà, la proportion diminue encore, mais elle ne s'approche pas de zéro car la Terre circule dans un milieu interplanétaire qui est loin d'être vide. Tout d'abord, sans compter les comètes, une masse importante de poussières et de météorites de toutes tailles circule dans le Système solaire et la Terre en reçoit environ de 100 à 500 tonnes par jour. Tout dernièrement, la pluie de ces poussières a été analysée par le satellite LDEF, une grosse boîte métallique larguée en 1984 par la navette Challenger et qui a flotté librement dans l'espace pendant plus de six ans avant d'être récupérée en 1990. Ses panneaux de plusieurs mètres carrés, criblés d'impacts, ont révélé que la majorité des poussières était en fait des grains minuscules, d'un

milliardième à un dix millième de gramme.

Notre planète est également plongée dans le vent solaire qui souffle en rafales à quelque 400 km/s. Ce vent est la matière perdue par le Soleil, au rythme d'un million de tonnes par seconde, et qui inonde le Système solaire. Au total, on estime actuellement que l'espace qui sépare la Terre de la Lune est ainsi encombré de quelque trois mille atomes par centimètre cube.

Pour trouver un espace encore plus vide, il faut donc sortir du Système solaire et s'évader vers les étoiles. A priori, quoi de plus vide que les espaces infinis qui s'étendent entre ces astres ? Chaque étoile est séparée de sa voisine par une distance d'environ cent millions de fois son rayon. Autrement dit, si une étoile était un grain de sable, le prochain grain de sable serait à 10 km ! Si la matière n'existait que sous forme stellaire, il s'agirait d'un des plus beaux exemples de vide. Mais les choses ne sont pas si simples, car bien que la majorité de la masse d'une galaxie comme la nôtre soit effectivement sous cette forme, environ 10 % existe sous celle de nuages de masses et de tailles très variées. Ces nuages emplissent plus ou moins complètement l'espace laissé entre les étoiles

PLEIN DE VIDE

et en chassent le vide. Les plus denses sont les nuages d'hydrogène moléculaire où naissent les nouvelles étoiles, comme ceux situés dans la constellation du Taureau, d'Ophiucus ou d'Orion, qui peuvent contenir jusqu'à un million d'atomes par centimètre cube dans leurs régions centrales et atteindre des masses de près d'un million de fois celle du Soleil⁽¹⁾. Ces nuages restent cependant exceptionnels et la majorité de la matière galactique entre les étoiles est constituée d'un gaz d'hydrogène beaucoup plus dilué. Ce gaz interstellaire représente la forme la plus approchée du vide dans notre galaxie car, entre les nuages, il ne contient plus que 0,1 atome par centimètre cube. Un vide tel que, pour reconstituer 1 g de matière à partir de ce gaz, il faudrait rassembler les atomes contenus dans un cube de 2 000 km de côté au lieu de 1 cm sur Terre ! Il peut même exister des poches encore plus vides avec seulement 0,01 ou 0,001 atome par centimètre cube. Ces bulles semblent résulter d'explosions récentes d'étoiles qui ont balayé le gaz interstellaire. Au cours de son mouvement dans la Galaxie, le Soleil traverse très probablement une telle bulle, car on a pu déterminer que, si du gaz existait bien entre nous et les plus proches étoiles, il régnait ensuite un grand vide jusqu'à environ cent années-lumière. Dans cette région, il ne subsiste plus qu'un gaz très chaud et très ténu qui a pu être mis en évidence récemment grâce aux satellites détectant les rayons X.

Peut-il exister un vide encore plus parfait que ces régions-bulles ? Dans notre galaxie probablement pas, mais à l'extérieur ? Les galaxies sont séparées les unes des autres par des espaces proportionnellement bien moindres que les étoiles. La Voie lactée est ainsi à une distance de sa plus proche voisine Andromède égale à moins de dix fois

son diamètre et, dans certains amas de galaxies, les distances sont encore plus faibles. Mais, à très grande échelle, on a découvert récemment que l'ensemble des galaxies formait des dessins qui donnent à l'Univers une "texture" particulière. La carte des galaxies à trois dimensions, établie par Margaret Geller et John Huchra en 1989, a révélé pour la première fois que les galaxies situées autour de nous, dans un rayon d'un milliard d'années-lumière, formaient des filaments dont l'exemple le plus

spectaculaire est la "grande muraille", une chaîne continue de centaines de galaxies qui couvrent plus de 120° sur le ciel. Ces filaments de galaxies se recoupent et délimitent de grands vides donnant à l'Univers une structure en éponge ou en bulle de savon. Qu'existe-t-il dans ces vides séparant les galaxies ? Malheureusement, il est encore très difficile de le savoir car la matière intergalactique est très discrète. Mis à part le gaz très chaud observé en rayonnement X à proximité immédiate des



Le cœur de la nébuleuse d'Orion, vu dans un télescope terrestre, à 1 500 années-lumière de distance, apparaît comme un nuage extrêmement dense. Son gaz, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, est illuminé par les quatre étoiles supergéantes du Trapèze (au centre). Mais derrière les nuées obscures de la nébuleuse, des dizaines d'étoiles naissent actuellement. Il faut des télescopes infrarouges ou des antennes millimétriques pour percer ce brouillard, constitué de quelques milliers d'atomes par centimètre cube.

D. Mellin/AAST/CSE

fois la distance Terre-Lune. La matière sous forme de particules massives dont nous sommes constitués n'est donc qu'une infime composante dans l'espace infini de l'Univers. "Ce qui est, est une coquille flottante dans l'infinitude de ce qui n'est pas", affirmait Eddington dans son livre, *La nature du monde physique*.

Pour mieux réaliser la vacuité de l'Univers, on peut se livrer par la pensée à une dernière expérience. Que se passerait-

Rien n'indique où pourrait se cacher la fameuse masse manquante

il si l'on éliminait tout le vide de l'Univers, c'est-à-dire si toute la matière observée avait la densité maximale des noyaux atomiques, celle de la matière sans vide des étoiles à neutrons ? Toute cette matière, qui équivaut à cent milliards de galaxies, chacune composée de cent milliards d'étoiles et de gaz, dispersées sur des milliards d'années-lumière, serait alors réduite à un volume tout juste supérieur... à celui qui sépare la Terre du Soleil ! Le reste du volume de l'Univers est donc constitué de vide.

Si nous ne sommes qu'atomes dans la création, la matière elle-même est poussière dans un océan de vide, et c'est finalement l'espace qui l'enferme qui prend une importance primordiale. Dans la physique moderne, cet espace est déjà doté de propriétés remarquables. Il est sillonné de particules sans masse que sont les neutrinos et les photons, des centaines de millions de fois plus nombreux que les atomes de matière et surtout, grâce au principe de l'équivalence de la masse et de l'énergie, il est peuplé de multitudes de particules virtuelles qui ne demandent qu'à apparaître. Rien d'étonnant à ce que, petit à petit, il prenne le devant de la scène jusqu'à assurer la paternité de tout ce qui existe.

Le mystère du vide est depuis longtemps au centre des préoccupations humaines. Déjà au ^ve siècle av. J.-C., le philosophe chinois Lao Zi, fondateur de la doctrine taoïste, en donnait une image lumineuse. Si l'on symbolise le monde par une roue, "trente rayons convergent vers le vide qui est au centre et ce vide est la pièce essentielle de l'ensemble." ■

1. Voir Ciel et Espace n° 274, juillet-août 1992.

2. Voir Ciel et Espace n°289, mars 1994.

Comme les atomes et les hommes, les galaxies sont essentiellement constituées... de vide. La magnifique spirale de la Vierge, qui se situe à environ 50 millions d'années-lumière de la Terre, compte peut-être mille milliards d'étoiles, distantes de plusieurs années-lumière les unes des autres. Vues de très loin, ces myriades d'étoiles se fondent en un brouillard lumineux. C'est entre les galaxies que l'espace est le plus vide : un atome seulement par décimètre cube.

grands amas, les astronomes n'ont que de maigres indices sur la nature des grands espaces intergalactiques.

Ils ont néanmoins remarqué que lorsqu'ils observaient certains quasars (les points les plus lumineux de l'Univers considérés comme des noyaux de galaxies très particuliers), la puissante lumière de ces astres éloignés était "trouée" d'innombrables bandes sombres, une multitude telle qu'elle a été baptisée la forêt de Lyman alpha. Ces bandes sombres correspondent en effet à une même raie de l'hydrogène, la raie Lyman alpha, déplacée à différentes longueurs d'onde par le décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers. Lorsque les astronomes observent une forêt de Lyman alpha, ils voient en fait une absorption causée par de nombreux petits nuages d'hydrogène situés à différentes distances entre nous et le quasar. La portion de ciel qui peut ainsi être explorée est cependant minuscule et cette méthode indirecte de sondage est loin d'être suffisante pour élucider la

composition des espaces intergalactiques. Vide ou pas vide ? Telle est également la question essentielle que se posent ceux qui recherchent activement la masse cachée de l'Univers⁽²⁾. La matière visible ne semble constituer qu'une fraction de l'Univers et certaines théories prédisent une quantité jusqu'à cent fois plus grande sous forme de mini-trous noirs, particules exotiques... Rien n'indique actuellement si elle est ou non cachée entre les galaxies, dans ces vides de l'Univers.

L'Univers observable dans son ensemble est de toute façon un espace remarquablement vide. Si l'on répartit par la pensée toute la matière visible dans le volume d'Univers observable, la densité moyenne est inférieure à 0,000 0001 atome par centimètre cube. Même si l'on ajoute l'hypothétique masse cachée, chaque cube d'Univers de 1 m de côté ne contient au plus qu'une dizaine d'atomes. Pour reconstituer 1 kg de matière, il faut alors un cube de près d'un million de kilomètres de côté, soit trois