

dans les trous de ver, d'hypothétiques tunnels qui relient des régions éloignées de l'espace-temps. Naguère, les physiciens pensaient que les trous de ver étaient minuscules, apparaissant et disparaissant comme des particules virtuelles (voir *La gravitation quantique*, par Bryce Dewitt, *Pour la Science*, février 1984).

Au début des années 1960, les physiciens Robert Fuller et John Wheeler calculèrent que des trous de ver plus grands s'effondreraient si rapidement sous leur propre gravité que même un faisceau lumineux n'aurait pas le temps de les traverser. Toutefois, à la fin des années 1980, plusieurs physiciens, tels Michael Morris et Kip Thorne, de l'Institut de technologie de Californie, et Matt Visser, de l'Université de Washington, ont montré que certains trous de ver seraient assez grands pour laisser passer un être humain ou un vaisseau spatial : on

pourrait entrer dans un trou de ver à proximité de la Terre, parcourir une courte distance à pied dans ce trou de ver et ressortir dans la galaxie d'Andromède, par exemple... à condition de maîtriser l'énergie négative, qui correspond à une répulsion gravitationnelle et empêcherait le trou de ver de s'effondrer.

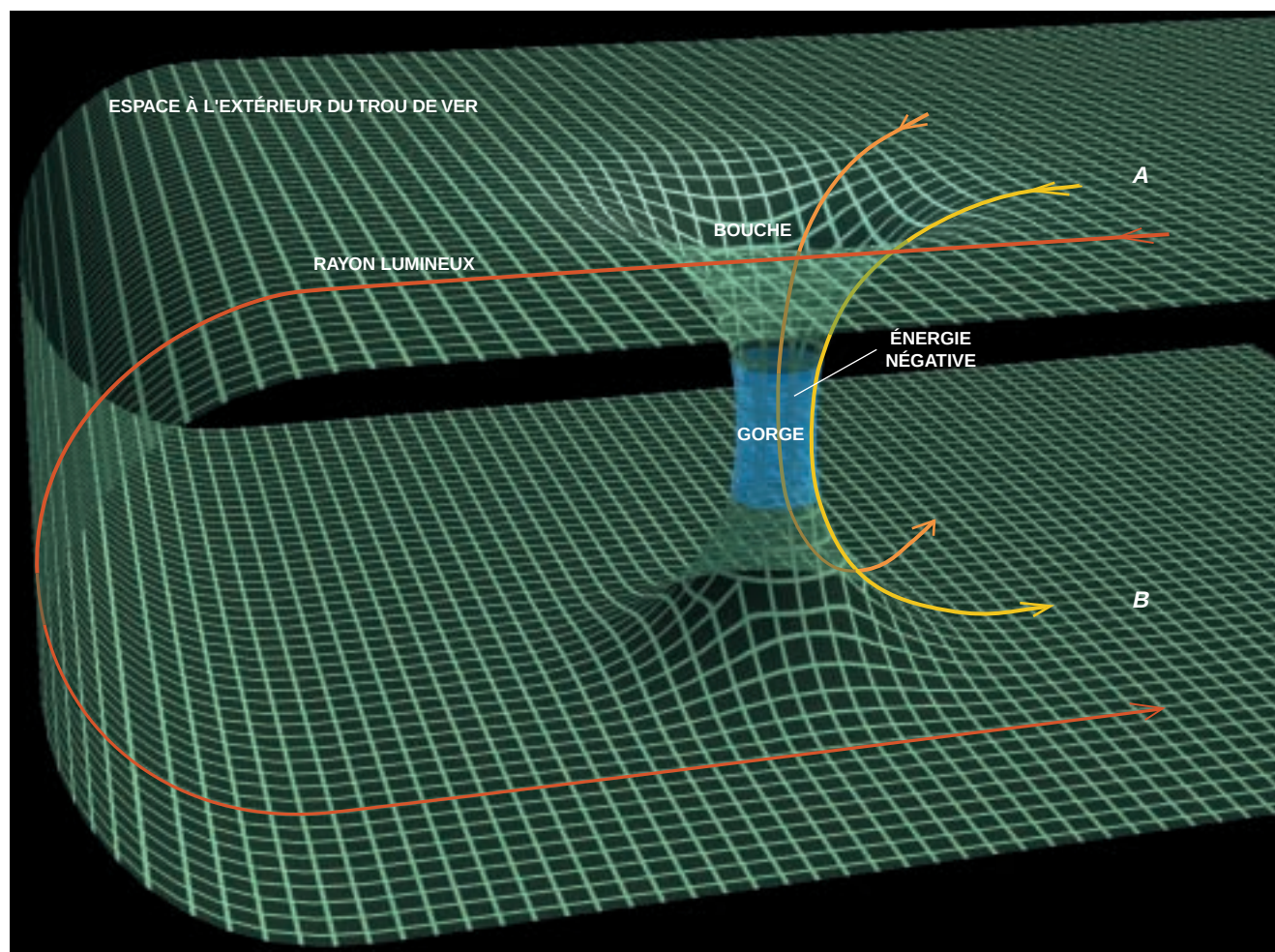
Un trou de ver n'est utilisable que s'il laisse passer des signaux sous forme de rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements pénétrant dans l'une des bouches du trou de ver sont convergents, mais, pour ressortir, ils doivent se défocaliser ; autrement dit, ils doivent passer de la convergence à la divergence quelque part entre l'entrée et la sortie (voir la figure 3). Cette défocalisation nécessite de l'énergie négative : alors que la courbure de l'espace-temps induite par le champ gravitationnel, attractif, de la matière ordinaire agit comme

une lentille convergente, l'énergie négative agit comme une lentille divergente.

Plus vite que la lumière

Des déformations de l'espace-temps permettraient également des voyages à des vitesses supérieures à celle de la lumière. En 1994, à Cardiff, Miguel Alcubierre Moya a trouvé une solution aux équations d'Einstein qui présente un certain nombre de caractéristiques communes avec la propulsion supraluminique par déformation de l'espace-temps. Une telle solution correspond à une bulle d'espace-temps qui pourrait transporter un vaisseau interstellaire à des vitesses arbitrairement élevées par rapport à un observateur situé en dehors de la bulle. Là encore, l'énergie négative est la clé du phénomène.

Le principe de déplacement à des vitesses supérieures à celle de la



3. UN TROU DE VER est un tunnel entre deux régions éloignées de l'espace. Les rayons lumineux peuvent entrer par une des ouvertures du trou de ver et ressortir par l'autre ouverture. La propagation serait beaucoup plus longue si le rayonnement n'empruntait pas ce raccourci. Dans la gorge, de l'énergie négative (en bleu) doit être

présente pour faire diverger les rayonnements. Ce diagramme est une représentation bidimensionnelle, mais l'espace réel a trois dimensions ; les ouvertures et la partie centrale du trou de ver seraient en fait des sphères. Les trous de ver pourraient également relier entre eux deux points différents dans le temps.

lumière par déformation de l'espace-temps semble contraire à la théorie de la relativité restreinte, mais cette dernière stipule seulement qu'on ne peut pas se déplacer plus vite que la lumière en suivant la même trajectoire qu'elle ; si l'espace-temps est déformé, on peut aller finalement plus vite que la lumière sans dépasser localement la vitesse de la lumière, à condition d'emprunter des raccourcis de l'espace-temps. La contraction de l'espace-temps devant la bulle et l'expansion de l'espace-temps derrière la bulle réduisent la distance à parcourir, créant un tel raccourci (voir la figure 4).

La théorie de M. Alcubierre, très originale, ne résout toutefois pas complètement le problème du voyage supraluminique, car Sergueï Krasnikov, de l'Observatoire astronomique central de Pulkovo (près de Saint-Pétersbourg), a calculé que l'intérieur de la bulle d'espace-temps déformé est causalement déconnecté

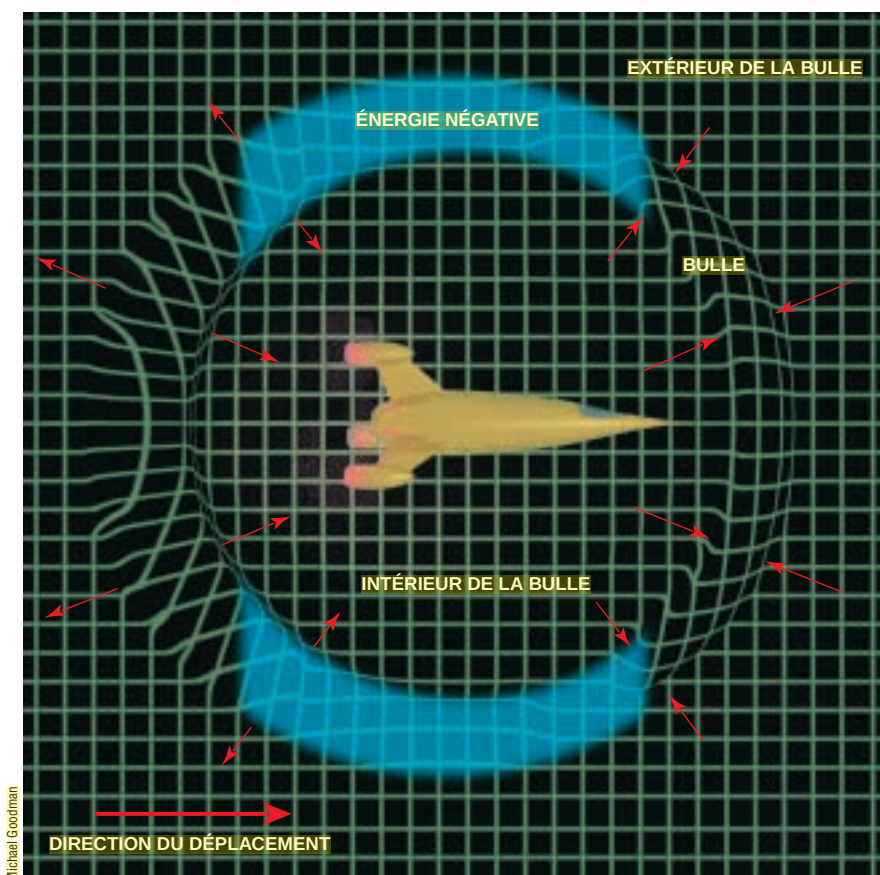
de l'extérieur. Le capitaine d'un vaisseau stellaire qui serait à l'intérieur d'une telle bulle ne pourrait ni la diriger, ni la supprimer, ni la recréer ; un agent extérieur doit la régler à l'avance. Afin de surmonter ce problème, S. Krasnikov a proposé l'utilisation de passages supraluminiques, des tubes d'espace-temps (différents des trous de ver) qui relieraient la Terre à des étoiles lointaines, par exemple. À l'intérieur du tube, le voyage à une vitesse supraluminique ne serait possible que dans un sens. En pratique, un vaisseau spatial quittant la Terre à une vitesse inférieure à celle de la lumière créerait ce tube ; puis il l'emprunterait au retour pour revenir vers la Terre à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Tout comme les bulles d'espace-temps, de tels tubes sont fondés sur l'énergie négative. Plus généralement, divers physiciens théoriciens ont calculé que tout principe qui ferait voyager plus vite que la lumière met en jeu de l'énergie négative.

Si l'on parvenait à construire des trous de ver ou des tubes de S. Krasnikov, on pourrait voyager dans le temps. En effet, l'écoulement du temps est relatif ; il dépend de la vitesse de l'observateur. Une personne quittant la Terre à bord d'un vaisseau spatial et voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière est moins vieille, à son retour sur Terre, qu'une autre personne qui serait restée sur notre planète. Si le voyageur parvient à dépasser la lumière, par exemple en prenant un raccourci (un trou de ver ou une bulle de l'espace-temps), il peut revenir avant d'être parti. En 1988, M. Morris, K. Thorne et Ulvi Yurtsever ont proposé une machine à voyager dans le temps fondée sur ce principe du trou de ver, et leur article est beaucoup étudié depuis dix ans. En 1992, S. Hawking a prouvé que la construction d'une machine temporelle dans une région finie de l'espace-temps nécessitait de l'énergie négative.

L'énergie négative est une notion si étrange qu'on admet difficilement qu'elle ne viole aucune des lois de la physique. Pourtant, avant et après la création de quantités égales d'énergie négative et positive dans un espace initialement vide, l'énergie totale est nulle : le principe de conservation de l'énergie est satisfait. Certes, ce respect est insuffisant, car de nombreux autres phénomènes où l'énergie est conservée ne sont jamais observés dans la réalité : les verres brisés ne se réparent pas d'eux-mêmes, et la chaleur ne diffuse pas spontanément d'un corps froid à un corps plus chaud.

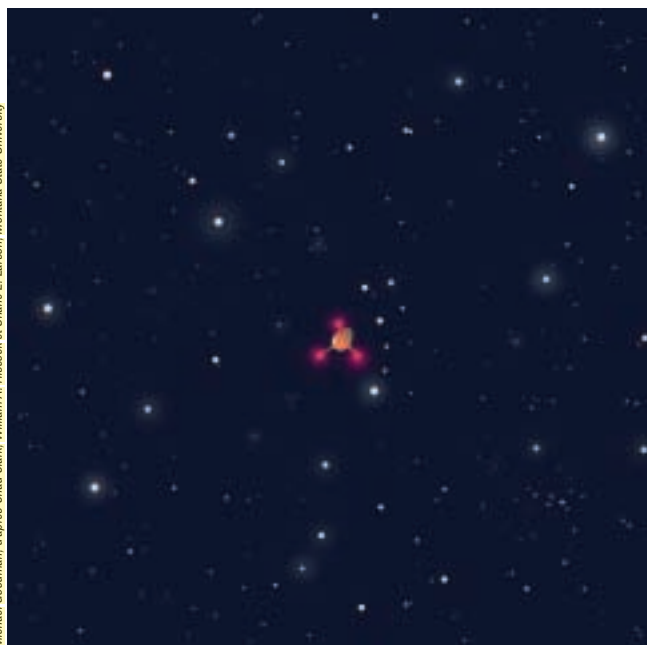
De tels effets sont exclus par le deuxième principe de la thermodynamique, qui stipule que la mesure du désordre d'un système (son entropie) ne décroît pas spontanément, sans un apport d'énergie. Ainsi, un réfrigérateur consomme de l'énergie pour extraire de la chaleur de son intérieur déjà froid vers l'extérieur, plus chaud. De même, le deuxième principe interdit la transformation complète de la chaleur en travail mécanique.

L'existence d'énergie négative semble opposée au deuxième principe. Imaginons un laser d'un type nouveau, qui émettrait un faisceau stationnaire d'énergie négative. La conservation de l'énergie imposerait, en contrepartie, la création d'un faisceau stationnaire d'énergie positive. Pourrait-on pointer le faisceau d'énergie négative vers



Michael Goodman

4. DES BULLES D'ESPACE-TEMPS permettraient des voyages à vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. Elles pourraient transporter des vaisseaux spatiaux à des vitesses arbitrairement élevées. L'espace-temps serait contracté à l'avant de la bulle, réduisant ainsi la distance qui la sépare de sa destination, et dilaté à l'arrière, accroissant la distance qui la sépare de son point de départ (flèches). Le vaisseau lui-même ne bouge pas par rapport à l'espace immédiatement autour de lui ; les membres d'équipage ne ressentent aucune accélération. Une telle bulle nécessite de l'énergie négative (en bleu), sur les flancs de la bulle.



5. DANS UN VAISSEAU STELLAIRE qui se déplacerait plus vite que la lumière en direction de la Petite Ourse (ci-dessus), on ne verrait pas les zébrures classiquement représentées par les films de science-fiction, mais une scène analogue à celle qui est montrée ici. Tandis que la vitesse augmente (à droite), les étoiles situées devant le vaisseau (colonne de gauche) semblent de plus en plus proches de la direction du mouvement et leur couleur vire au bleu. Derrière le vaisseau (colonne de droite), les étoiles se rapprochent d'une position directement à l'arrière, rougissent et finissent par disparaître complètement. La lumière provenant d'étoiles situées directement au-dessus ou au-dessous est inchangée.



une région lointaine de l'Univers, tandis que l'énergie positive serait utilisée à des fins pratiques? Cette source apparemment inépuisable d'énergie pourrait servir à la réalisation d'une machine à mouvement perpétuel, qui violerait le deuxième principe. Par exemple, en pointant le faisceau vers un verre d'eau, on rafraîchirait l'eau, tandis que l'énergie positive extraite alimenterait un petit moteur : on obtiendrait ainsi un réfrigérateur qui fonctionnerait sans apport d'énergie. En réalité, une impossibilité survient, non pas en raison de l'idée d'énergie négative, mais parce que l'on ne peut pas séparer sans restriction l'énergie négative et l'énergie positive.

L'existence d'énergie négative aurait également des conséquences importantes en cosmologie. Quand l'énergie dégagée par les réactions thermonucléaires devient insuffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle des étoiles, celles-ci s'effondrent sur elles-mêmes et forment parfois un trou noir : une «singularité» de l'espace-temps qui correspond à une région de l'espace où l'intensité du champ de gravitation devient infinie. La relativité générale (et les autres lois de la physique) n'in-

diquent pas comment l'Univers évolue dans cette région : cette ignorance est une des grandes lacunes de la description mathématique de la nature. Tant que la singularité reste à l'intérieur d'un horizon des événements, on peut décrire l'Univers à l'extérieur de cet horizon. C'est pour cette raison que Roger Penrose, à Oxford, a proposé l'hypothèse de «censure cosmique» : aucune singularité n'est nue, c'est-à-dire sans horizon des événements.

Pour certains types de trous noirs électriquement chargés ou en rotation, connus sous le nom de trous noirs extrêmes, une infime augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation, ou une diminution de la masse, détruiraient l'horizon des événements et transformeraient le trou noir en une singularité nue. L'augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation de ces trous noirs à l'aide de matière ordinaire semble irréalisable pour diverses raisons. En revanche, on pourrait réduire la masse du trou noir en brisant un faisceau d'énergie négative sur le trou, ce qui mettrait en défaut

le principe de la censure cosmique. On créerait un tel faisceau à l'aide d'un miroir mobile, par exemple. En principe, une infime quantité d'énergie négative suffirait à changer radicalement l'état d'un trou noir extrême. C'est ainsi que l'énergie négative aurait le plus de chances de produire des effets macroscopiques.

Ni isolé ni de même amplitude

Malheureusement (ou heureusement, selon le point de vue), bien que la théorie quantique admette l'existence d'énergie négative, elle prescrit des limites à son amplitude et à sa durée. Ces inégalités quantiques ont été évoquées pour la première fois par L. Ford, en 1978 ; depuis, elles ont été démontrées et affinées.

Ces inégalités ressemblent au principe d'incertitude d'Heisenberg. Elles stipulent qu'un faisceau d'énergie