

négative ne peut pas être arbitrairement intense pendant un temps arbitrairement long. L'amplitude de l'énergie négative est inversement proportionnelle à son étendue spatio-temporelle : une impulsion intense d'énergie négative ne dure qu'un temps très bref ; une impulsion faible dure plus longtemps. De surcroît, une impulsion initiale d'énergie négative est nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive d'intensité supérieure (voir la figure 6). Plus l'amplitude de l'énergie négative est importante, plus sa contrepartie en énergie positive doit arriver peu de temps après. On peut se représenter l'énergie négative comme un prêt énergétique : de la même manière qu'une dette est de l'argent négatif que l'on doit rembourser, l'énergie négative est un déficit d'énergie qui doit être compensé. Examinons comment l'analogie se prolonge.

Dans l'effet Casimir, la densité d'énergie négative entre les deux plaques peut persister indéfiniment, mais la densité d'énergie négative n'est notable que si l'écart entre les plaques est très faible : la densité d'énergie négative est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la distance entre les plaques. Les inégalités quantiques indiquent que la densité d'énergie entre les plaques peut être rendue encore plus négative que la valeur observée dans l'effet Casimir, mais seulement temporairement ; plus on réduit la densité d'énergie au-dessous de la valeur Casimir, plus bref est l'état obtenu.

Les inégalités quantiques imposent que les tailles des trous de ver et des tubes de S. Krasnikov soient submicroscopiques ou que l'énergie négative soit restreinte à des bandes extrêmement étroites. En 1996, nous avons calculé que les trous de ver submicroscopiques auraient un rayon inférieur à 10^{-32} mètre environ. Cette longueur est légèrement

supérieure à la longueur de Planck -10^{-35} mètre -, qui est la plus petite longueur possible ayant un sens physique. Nous avons calculé que l'on pourrait créer des trous de ver macroscopiques si l'on confinait l'énergie négative dans un intervalle extrêmement étroit autour de l'entrée du trou. Par exemple, sous certaines hypothèses, on détermine qu'un trou de ver dont le rayon d'entrée est égal à un mètre contraint l'énergie négative à n'être que dans un intervalle de 10^{-21} mètre, un million de fois plus petit que la taille d'un proton. D'après les estimations de M. Visser, l'énergie négative nécessaire à un trou de ver de cette taille correspond à l'énergie totale émise par dix milliards d'étoiles en un an. Les problèmes sont analogues avec les trous de ver plus

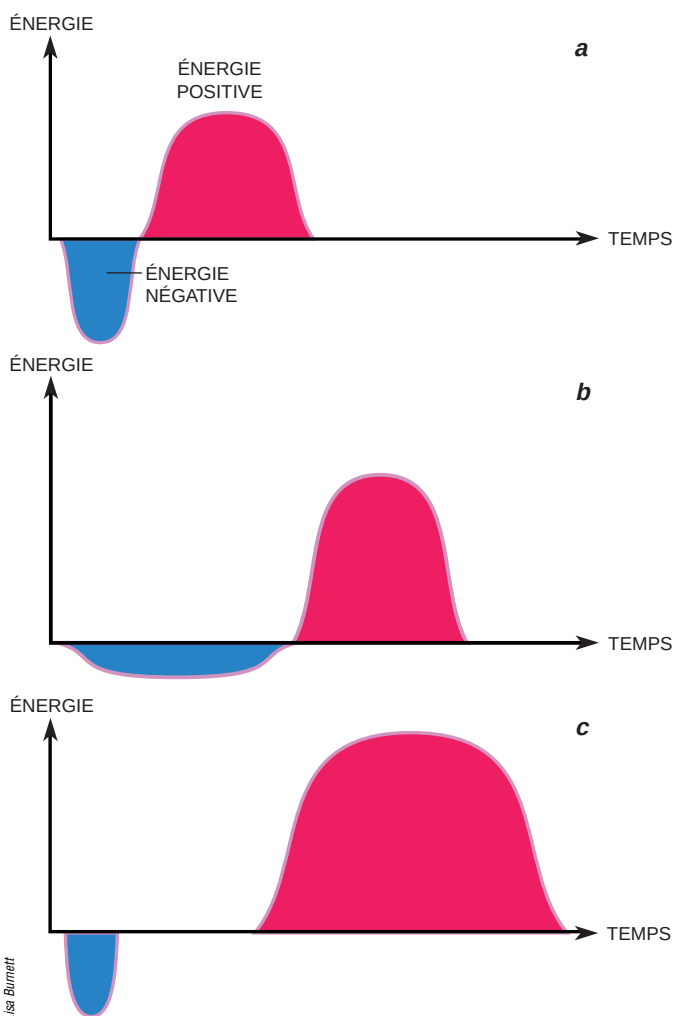
gros. Avec les mêmes hypothèses, l'épaisseur maximale possible de l'intervalle d'énergie négative est proportionnelle à la racine cubique du rayon d'entrée. En augmentant le rayon d'entrée jusqu'à une année-lumière, l'énergie négative reste confinée à une région plus petite que le rayon d'un proton, et la quantité totale nécessaire augmente linéairement avec la taille du trou d'entrée.

Ceux qui voudront maîtriser les trous de ver devront résoudre le difficile problème de confiner de grandes quantités d'énergie négative dans des volumes extrêmement minces. Certaines théories cosmologiques supposent l'existence de «cordes cosmiques», où de très fortes densités d'énergie sont réparties le long de longues lignes étroites, mais tous les modèles de cordes

cosmiques physiquement acceptables ont des densités d'énergie positives.

La propulsion par déformation de l'espace-temps semble encore plus difficile. Le modèle de M. Alcubierre, qui considère une bulle d'espace-temps qui se déplacerait dix fois plus vite que la lumière, impose des parois d'une épaisseur maximale de 10^{-32} mètre. Une bulle ne pourrait contenir un vaisseau stellaire de 200 mètres de long que si la quantité totale d'énergie négative était équivalente à dix milliards de fois la masse de l'Univers observable. Les difficultés sont analogues pour le tube supraluminique de S. Krasnikov. Chris Van Den Broeck, à Louvain, a récemment modifié le modèle de M. Alcubierre. Moins d'énergie négative est nécessaire, mais le vaisseau stellaire doit alors rentrer dans une bouteille d'espace-temps courbé dont le goulot aurait moins de 10^{-32} mètre de diamètre. Ainsi, au total, la construction de trous de ver et de couloirs d'espace-temps utilisables semble très improbable.

Les inégalités quantiques empêchent la violation du deuxième principe. Quand on essaie de refroidir

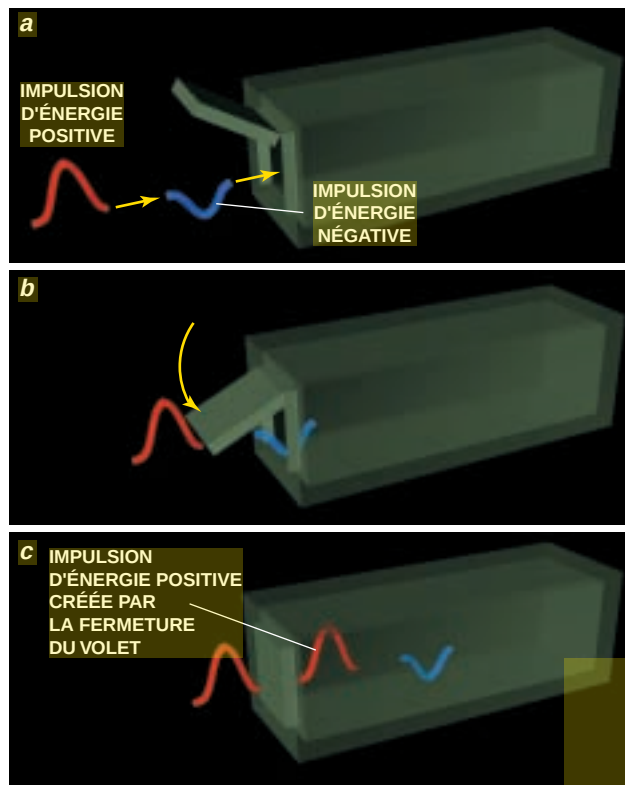


6. DES IMPULSIONS D'ÉNERGIE NÉGATIVE sont envisageables, mais sous certaines conditions. Premièrement, plus l'impulsion est longue, plus elle doit être faible (a,b). Deuxièmement, elle doit être suivie d'une impulsion d'énergie positive. L'amplitude de l'impulsion positive est nécessairement supérieure à celle de l'impulsion négative initiale. Troisièmement, plus les deux impulsions sont séparées dans le temps, plus l'impulsion positive doit être importante : cet effet est nommé «intérêt quantique» (c).

dir un objet chaud à l'aide d'une impulsion d'énergie négative, l'objet est presque immédiatement réchauffé par une impulsion supérieure d'énergie positive. La contrepartie positive d'une faible impulsion d'énergie négative pourrait être différée, mais les effets de l'énergie négative seraient alors indiscernables de ceux des fluctuations thermiques normales. Apparemment, on ne peut ni capter l'énergie négative ni la dissocier de l'énergie positive. On a cherché si l'énergie négative serait piégée par une boîte munie d'un volet, vers laquelle on dirigerait un faisceau d'énergie négative ; toutefois la fermeture du volet crée un flux d'énergie positive qui neutralise l'énergie négative (voir la figure 7).

Flash cosmique et intérêts quantiques

Nous avons montré l'existence de restrictions analogues pour la violation de la censure cosmique. L'injection d'une impulsion d'énergie négative dans un trou noir chargé détruirait momentanément l'horizon des événements, faisant exploser la singularité qu'il contient. Cependant cette impulsion étant nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive, la singularité nue serait immédiatement retransformée en un trou noir ; nous nommons un tel phénomène un «flash cosmique». Pour observer ce flash cosmique, on doit augmenter l'écart temporel entre l'énergie négative et l'énergie positive, afin que la singularité reste nue le plus longtemps possible. Or, dans ce cas, l'amplitude de l'impulsion d'énergie négative serait nécessairement très faible, en raison des inégalités quantiques. Le changement de masse du trou noir, dû à l'énergie négative, serait alors noyé dans le bruit des fluctuations quantiques normales de la masse du trou noir, qui sont la conséquence naturelle du principe d'incertitude d'Heisenberg. Le spectacle de la singularité nue serait brouillé, si bien qu'un observateur lointain ne pourrait vérifier sans ambiguïté la violation de la censure cosmique. Avec Frans Pretorius, de l'Université



7. CET ESSAI DE CONTOURNEMENT des lois quantiques qui gouvernent l'énergie négative est voué à l'échec. L'expérimentateur tente de séparer une impulsion d'énergie négative de l'impulsion compensatoire d'énergie positive. Tandis que les impulsions s'approchent d'une boîte (a), l'expérimentateur cherche à isoler l'impulsion négative en fermant le couvercle dès qu'elle est entrée (b). Cependant la fermeture du couvercle crée une seconde impulsion d'énergie positive à l'intérieur de la boîte (c).

Michael Goodman

sions. Aussi les impulsions négatives et positives ne peuvent-elles jamais s'annuler exactement ; l'énergie positive dominera toujours. On nomme «intérêt quantique» cet effet de surcompensation. Autrement dit, si l'on considère l'énergie négative comme un prêt d'énergie, le prêt doit être remboursé avec les intérêts. Plus la période sur laquelle le prêt aura été accordé est longue, ou plus le montant du prêt est important, plus les intérêts sont élevés. En outre, plus le prêt est important, moins son remboursement peut être différé : Dame Nature est une banquière implacable qui n'éponge aucune dette.

Le concept d'énergie négative intervient dans de nombreux domaines de la physique : la gravitation, la théorie quantique, la thermodynamique. L'existence d'un lien entre ces domaines montre que les lois de la nature ont une structure logique contrainte. D'un côté, l'existence d'énergie négative semble être le seul moyen de relier les trous noirs

et la thermodynamique. D'un autre côté, la physique quantique interdit la production illimitée d'énergie négative, qui violerait le deuxième principe de la thermodynamique. Les physiciens cherchent aujourd'hui si ces restrictions font également partie intégrante d'une théorie sous-jacente plus puissante, telle une théorie unifiée de la gravitation. La nature, n'en doutons pas, nous réserve encore bien des surprises.

Lawrence FORD est professeur de physique à l'Université Tufts. Thomas ROMAN est professeur de physique à l'Université du Connecticut.

Jean-Pierre LUMINET, *Les trous noirs*, Éditions du Seuil, 1992.

Kip S. THORNE, *Black Holes and Time Warps : Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton, 1994.

Lawrence FORD et Thomas ROMAN, *Quantum Field Theory Constrains Traversable Wormhole Geometries*, in *Physical Review D*, vol. 53, n° 10, pp. 5496-5507, 15 mai 1996.

Matt VISSER, *Lorentzian Wormholes : From*

Einstein to Hawking, American Institute of Physics Press, 1996.

M.J. PFENNING et L.H. FORD, *The Unphysical Nature of Warp Drive*, in *Classical and Quantum Gravity*, vol. 14, n° 7, pp. 1743-1751, juillet 1997.

Paul DAVIES, *Paradox Lost*, in *New Scientist*, vol. 157, n° 2126, p. 26, 21 mars 1998.

Paul J. NAHIN, *Time Machines : Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction*, seconde édition, AIP Press, Springer-Verlag, 1999.

Lawrence FORD et Thomas ROMAN, *The Quantum Interest Conjecture*, in *Physical Review D*, vol. 60, n° 10, article n° 104018 (8 pages), 15 novembre 1999.