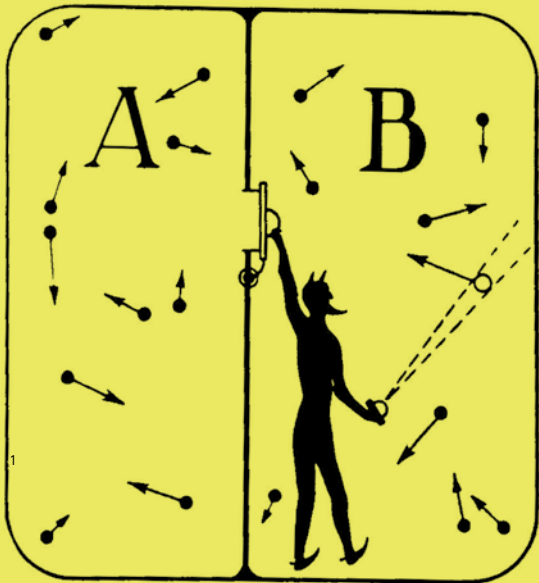


Diablerie quantique

Un groupe de recherche brésilien est parvenu à contrôler la chaleur produite par des noyaux atomiques

Igor Zolnerkevic

PUBLIÉ EN JANVIER 2017



Travail de 1975 du mathématicien russe Alexander Lerner qui représente le démon de Maxwell dans un des récipients contenant les molécules de gaz qu'il devait sélectionner

La production aléatoire de chaleur dans le monde microscopique est l'un des principaux obstacles aux avancées nanotechnologiques. À mesure que les nanodispositifs deviennent toujours plus petits, plus complexes, avec des éléments à l'échelle moléculaire ou même atomique, ils présentent un risque de dangerosité élevé en termes de fluctuations quantiques durant leur fonctionnement. Ces fluctuations sont des variations brutales et imprévisibles d'énergie, régies par les lois probabilistiques de la mécanique quantique, qui peuvent endommager les nanomé-

canismes. Sous la houlette de Roberto Serra, professeur à l'Université Fédérale de l'ABC (UFABC), un groupe de physiciens brésiliens a rédigé un article, publié début décembre 2016 dans la revue *Physical Review Letters*, dans lequel ils présentent une technique qui atténue ces fluctuations au niveau subatomique.

Les fluctuations microscopiques d'énergie et de chaleur peuvent endommager les nanomachines telle la surchauffe excessive et incontrôlée d'un moteur macroscopique conventionnel comme celui d'une voiture. Au cours de la Révolution Industrielle du XIX^e siècle, les recherches menées sur le fonctionnement

des soupapes de pression et des réfrigérateurs ont favorisé le développement de la thermodynamique classique (domaine de la physique qui étudie la conversion de l'énergie sous forme de chaleur en éner-

gie mécanique et vice versa). Ces dispositifs ont permis aux moteurs à vapeur et à combustion interne de devenir plus sûrs et plus efficaces. Roberto Serra et ses collègues font partie d'une communauté de physiciens à l'avant-garde des progrès nanotechnologiques qui développent une théorie plus générale et détaillée de la thermodynamique appelée thermodynamique quantique hors d'équilibre, visant à améliorer le fonctionnement de dispositifs à l'échelle moléculaire et atomique soumis à ces effets quantiques.

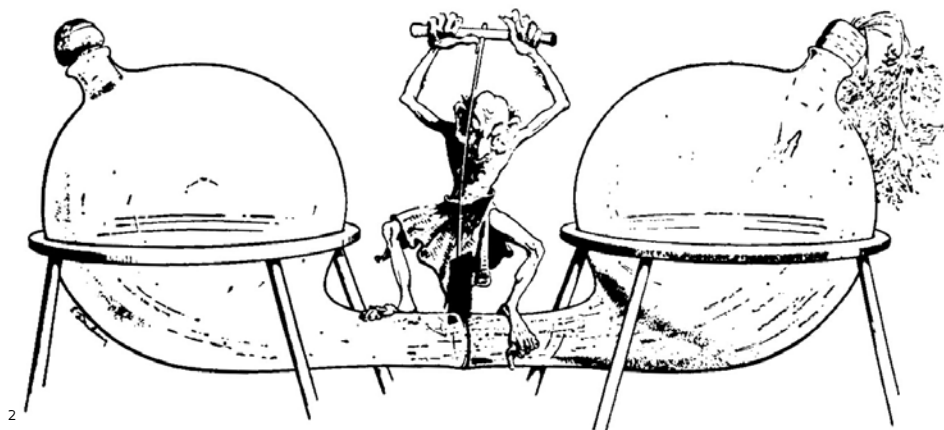
Pour développer cette nouvelle technique de contrôle, Roberto Serra et ses collègues se sont inspirés du « démon de Maxwell », un être fantastique imaginé par le physicien et mathématicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879). Maxwell a été l'un des premiers à comprendre que la température d'un volume donné de gaz dépend de la vitesse moyenne de déplacement des molécules qui le composent. Plus les molécules sont véloces, plus le gaz est chaud. Dans une lettre de 1867 adressée à son collègue Peter Tait, Maxwell avait imaginé un être microscopique et intelligent, capable de mesurer et d'enregistrer les vitesses de toutes les molécules de gaz. Dans cette expérience de pensée, l'être contrôlait un robinet reliant deux récipients identiques remplis d'un gaz maintenu à la même température. En ouvrant et en fermant rapidement ce robinet, la créature sélectionnait les molécules de gaz, qui devenaient moins rapides que la moyenne et donc plus froides dans un des récipients et plus rapides dans l'autre.

PÉCHÉ THERMODYNAMIQUE

Dans un article publié dans *Nature* en 1874, le physicien irlandais William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin, a baptisé l'être intelligent de démon, pour souligner le fait que la créature, en réchauffant le gaz d'un récipient et en refroidissant simultanément le gaz de l'autre, commettait le péché de violer la deuxième loi de la thermodynamique.

Cette loi affirme qu'un corps isolé, ou qu'un ensemble de corps isolés, possède une propriété appelée entropie qui tend toujours à augmenter avec le temps. Pour un ensemble de particules, l'entropie est

Dans un article publié en 1955 dans la revue *American Journal of Physics*, le personnage imaginaire contrôle le flux des molécules de gaz de l'extérieur des récipients



le nombre de configurations possibles entre elles pour une situation donnée.

En sélectionnant les molécules de gaz en fonction de leur vitesse, le démon diminuerait le nombre de configurations possibles du système réduisant ainsi son entropie. L'article de William Thomson a donc jeté un doute chez les physiciens : le démon serait-il une simple fantaisie ou est-ce que cette expérience de pensée pointerait une faille dans la compréhension des lois de la thermodynamique ?

Plus d'un siècle plus tard, en 1982, le physicien nord-américain Charles Bennett, alors chercheur chez IBM, a compris que pour que cela puisse fonctionner dans la pratique le démon de Maxwell devrait enregistrer l'information relative à la vitesse des molécules du gaz sur un substrat physique tout comme les octets de la mémoire d'un ordinateur. Or, il se trouve que l'écriture et l'effacement de données sur une mémoire ne peut se faire sans produire de chaleur, conformément aux découvertes de Rolf Landauer autre chercheur d'IBM, quelques années auparavant. La production de chaleur augmente toujours l'entropie.

Quand on évalue l'augmentation et la réduction de chaleur dans les deux étapes de ce processus on s'aperçoit que la deuxième loi de la thermodynamique n'est jamais violée. En effet, le démon peut diminuer l'entropie à l'intérieur des récipients de gaz en sélectionnant les molécules, mais la chaleur produite pour enregistrer leur vitesse dans la mémoire augmente beaucoup plus l'entropie à l'extérieur des récipients. Les calculs

Une expérience avec des molécules de chloroforme et des impulsions électromagnétiques reproduit l'expérience de pensée proposée au XIX^e siècle

ont montré que la créature surnaturelle de Maxwell obéissait à toutes les lois de la physique et que sa fonction pourrait être reproduite, dans la pratique, par un mécanisme automatique contrôlé par la mémoire d'un ordinateur.

Depuis lors, des chercheurs ont déjà créé en laboratoire des mécanismes similaires à celui imaginé par Maxwell et toujours plus petits. Roberto Serra et ses collaborateurs ont été les premiers à projeter un démon de Maxwell complètement quantique. Dans un laboratoire du Centre Brésilien de Recherches Physiques (CBPF), à Rio de Janeiro, les chercheurs ont déclenché des ondes pulsées électromagnétiques sur une solution de

molécules de chloroforme (molécule formée d'un atome de carbone, d'un atome d'hydrogène et de trois atomes de chlore (CHCl_3). L'impulsion était calibrée pour produire des fluctuations quantiques dans l'énergie des noyaux des atomes de carbone des molécules. Les physiciens ont déclenché simultanément des ondes électromagnétiques supplémentaires afin d'ajuster l'interaction entre le noyau de carbone et le noyau d'hydrogène d'une même molécule.

Les chercheurs sont parvenus à utiliser le noyau d'hydrogène comme un démon de Maxwell qui stocke l'information sur l'état du noyau de carbone. Selon le niveau d'énergie du noyau de carbone, le noyau d'hydrogène agissait et limitait les fluctuations énergétiques de son voisin. L'action des noyaux d'hydrogène a permis que les fluctuations d'énergie des noyaux de carbone se produisent avec le moins d'entropie possible. « Nous avons projeté ce processus à l'aide d'une équation mathématique que nous avons déduite et qui associe l'information, l'entropie et l'énergie », explique Roberto Serra. « Il s'agit d'une équation générale qui pourra non seulement être appliquée à des noyaux atomiques mais également à tout système quantique comme des électrons et des photons ».

« C'est un travail passionnant », déclare Vlatko Vedral, physicien à l'Université d'Oxford, en Angleterre, qui a participé à une expérience menée en 2016 utilisant des faisceaux laser pour produire un démon de Maxwell. « Ils ont testé une formule qui décrit la production d'entropie dans des systèmes quantiques et dans des conditions générales. On ne sait pas encore pourquoi l'entropie de l'Univers tend toujours à augmenter et cette approche peut nous aider à comprendre les origines de la deuxième loi de la thermodynamique » ■

Projet

Institut National de Sciences et de technologie en Information Quantique (n° 2008/57856-6) ; Modalité Projet Thématique ; Chercheur responsable Amir Caldeira (Unicamp) ; Investissement 1 977,654,30 R\$ (pour tout le projet).

Article scientifique

CAMATI, P. A. *et al.* Experimental rectification of entropy production by Maxwell's demon in a quantum system. *Physical Review Letters*. v. 117. p. 240502. 5 décembre 2016.