

Un démon de Maxwell pour REFROIDIR LES ATOMES

Mark Raizen

Une expérience de pensée du XIX^e siècle inspire une technique permettant de manipuler des atomes afin de les ralentir et d'abaisser leur température à des valeurs proches du zéro absolu.

L'ESSENTIEL

✓ Les méthodes usuelles pour refroidir les gaz à une température proche du zéro absolu ne fonctionnent que pour certains éléments.

✓ En combinant deux nouvelles techniques, on peut refroidir des atomes de presque tous les éléments, voire certaines molécules.

✓ Un canon magnétique « inversé » ralentit d'abord les atomes. On poursuit le refroidissement par une technique inspirée du « démon de Maxwell », imaginé vers 1870.

✓ Les applications vont de l'étude des propriétés des particules élémentaires à la séparation d'isotopes.

Pendant que vous lisez ces lignes, des molécules filent autour de vous à 3000 kilomètres par heure, vous bombardant de tous côtés, tandis que les atomes et molécules dont vous êtes constitué virevoltent, vibrent et entrent sans cesse en collision. Dans la nature, rien n'est parfaitement immobile: tout bouge en permanence. Et plus les atomes et les molécules vont vite, plus ils portent de l'énergie. Cette énergie collective et désordonnée, nous la ressentons à notre échelle sous forme de chaleur.

Le repos total, correspondant à la température du zéro absolu (zéro kelvin, soit $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), est physiquement impossible. Pourtant, les scientifiques s'approchent de plus en plus de cette limite. Dans ces conditions extrêmes, d'étranges effets quantiques se manifestent. En parvenant à refroidir un gaz d'atomes jusqu'à une petite fraction seulement au-dessus du zéro absolu, les physiciens ont pu observer la matière se comporter comme une onde et concevoir des appareils de mesure de plus en plus précis.

Les techniques de refroidissement les plus répandues ne sont applicables qu'à

un nombre restreint d'éléments du tableau périodique de Mendeleïev, ce qui limite leur utilisation. Ainsi, refroidir l'hydrogène, le plus simple de tous les atomes, a longtemps donné du fil à retordre aux physiciens. La nouvelle méthode de refroidissement que mon équipe a mise au point parvient désormais à refroidir très efficacement la plupart des éléments, tout comme de nombreuses molécules.

Pour relever ce défi technique, je me suis inspiré du physicien écossais du XIX^e siècle, James Clerk Maxwell, auteur d'une expérience de pensée dans laquelle il a théorisé l'existence d'un « démon » violant les lois de la thermodynamique...

Ce démon constitue la base d'une technique inédite de cryogénie. De nouvelles voies de recherche s'ouvrent et conduisent à de nombreuses applications. On pourrait purifier des isotopes rares, utiles en médecine comme en recherche fondamentale. Ce « superfroid » contribuerait à l'amélioration des méthodes de fabrication des puces électroniques à l'échelle nanométrique, et à la conception d'horloges atomiques encore plus précises. Côté recherche, le refroidissement extrême



Adam Voorhis

d'atomes et de molécules peut engendrer de nouveaux états de la matière, éclairant les terres inconnues séparant la physique quantique de la chimie ordinaire. On espère aussi démêler les différences entre matière et antimatière.

Une fuite d'atomes vers le vide

Immobiliser puis manipuler des atomes et des molécules n'est pas une mince affaire. Généralement, les chercheurs commencent par produire un gaz raréfié constitué d'un certain élément chimique, en chauffant un solide ou en le vaporisant à l'aide d'un laser. Le gaz est ensuite ralenti, puis confiné dans une chambre à vide où il est maintenu à distance des parois.

J'ai commencé par utiliser une astuce bien connue. Il y a plus de 40 ans, les chimistes ont découvert que lorsqu'un gaz comprimé à une pression de plusieurs bars émerge dans le vide par un petit trou, il se dilate brusquement et subit un refroidissement rapide. Or ces «jets supersoniques» sont presque monoénergétiques. En d'autres termes, les molécules ont des éner-

gies, donc des vitesses, très proches de la moyenne du jet.

Dans l'air, à température ambiante, les molécules ont une vitesse moyenne de 3000 kilomètres par heure, mais se déplacent à des vitesses comprises entre 0 et 6000 kilomètres par heure. À l'opposé, dans un jet supersonique de même vitesse moyenne, les molécules ont une vitesse qui ne s'écarte pas de plus de 30 kilomètres par heure de la valeur moyenne. Du point de vue thermodynamique, ce faisceau rapide, porteur d'une quantité importante d'énergie, est extrêmement froid. Pourquoi ? Imaginez que vous vous déplaçiez avec le jet, à 3000 kilomètres par heure. Vous verriez les molécules voisines se déplacer lentement (au plus à 30 kilomètres par heure) par rapport à vous : la température à l'intérieur du jet serait donc à peine de un centième de degré au-dessus du zéro absolu !

Je me suis rendu compte que si nous parvenions à ralentir et à stopper un tel jet tout en préservant le faible étalement des vitesses, nous obtiendrions un ensemble d'atomes très froids. En le piégeant, nous pourrions le refroidir encore davantage.

Mon équipe a commencé à étudier les jets d'atomes supersoniques en 2004, avec Uzi Even, chimiste à l'Université de Tel-Aviv en Israël. Notre première idée a été de diriger un tel faisceau sur les extrémités des pales d'un rotor. Quand un atome du gaz entre en contact avec la pale du rotor en mouvement, celle-ci prélève une partie de son énergie cinétique. Si les extrémités des pales tournent à une vitesse égale à la moitié de la vitesse du faisceau de gaz supersonique, toute l'énergie cinétique de ce dernier est captée : les atomes du jet s'arrêtent, comme peut le faire une balle de tennis frappant une raquette qui recule.

Ce dispositif, qui nécessite des réglages d'une extrême finesse, était difficile à mettre en œuvre. Robert Hebner, directeur du Centre d'électromécanique de l'Université du Texas à Austin, nous a alors suggéré un concept un peu différent : les atomes du gaz rebondiraient non pas sur une pale de rotor, mais sur l'arrière d'un projectile catapulté par un canon magnétique.

Un tel appareil est constitué d'une série de bobines de fil de cuivre parcourues par un courant électrique. Chaque bobine crée un champ magnétique qui attire le projectile aimanté venant la traverser, de sorte que le projectile est accéléré. Mais une fois le centre dépassé, les forces magnétiques commencent à le tirer en arrière. Afin d'éviter cela, le courant de chaque bobine est coupé au moment exact où le projectile passe par son centre ; il est alors attiré par le champ produit par la bobine suivante. Ainsi, les forces magnétiques tirent toujours le projectile dans la même direction, vers l'extrémité du canon.

J'ai vite compris que nous pouvions retenir l'idée de R. Hebner, mais en nous débarrassant du projectile. Le principe s'appliquerait alors au jet lui-même, mais à l'envers : au lieu d'accélérer un projectile, les bobines du canon agiraient directement sur les molécules du jet, afin de les ralentir et les immobiliser (voir l'encadré page 59). Cette astuce nécessite que les atomes du gaz aient un petit moment magnétique. Or c'est le cas de tous les éléments quand leurs électrons sont placés dans un état excité ; de nombreuses molécules ont elles aussi un moment magnétique.

Nous avons construit un tel dispositif de freinage magnétique, et l'avons testé sur des atomes de néon excités, puis sur des molécules de dioxygène (O_2). Nous avons réussi par cette technique à immobiliser ces deux espèces. Simultanément,