

Dans la plupart des régions de l'intestin grêle et du côlon, un système de locomotion hybride suffirait aux médecins pour qu'ils puissent faire un examen visuel détaillé. Mais des situations différentes exigent des solutions différentes. Par exemple, le projet VECTOR a développé trois types de gélules destinés seulement à l'intestin grêle : une capsule caméra passive pour un examen classique ; une gélule de diagnostic, dotée d'un système de locomotion actif et d'un capteur d'imagerie spectroscopique qui détecte des anomalies de la surface du tissu ; et la troisième capsule VECTOR prévue transporterait le même capteur spectroscopique et un outil de biopsie. Ce dernier prélèverait un échantillon de tissu et le stockerait dans la capsule ; puis les médecins le récupéreraient quand la capsule sortirait de l'organisme du patient.

La capacité de faire des biopsies et d'autres gestes thérapeutiques plus complexes, telle une ablation, ferait de ces gélules robots des outils exceptionnels. Mais plusieurs difficultés restent à résoudre : la faible puissance embarquée disponible et les contraintes d'espace et de couples moteurs. Avec une unique gélule de deux centimètres cubes, il est pour l'instant impossible d'atteindre des objectifs thérapeutiques plus ambitieux, qui nécessiteraient des mouvements compliqués et de multiples actionneurs.

S'auto-assembler dans l'organisme

En conséquence, nous travaillons sur un nouveau concept : des robots chirurgicaux qui s'assemblent eux-mêmes dans l'organisme. Voyons de quoi il s'agirait. Le sujet boirait un liquide distendant l'estomac, puis avalerait jusqu'à 10 à 15 gélules. Chacune serait un composant miniaturisé, avec des électroaimants à chaque extrémité. Une fois dans l'estomac, ces capsules, guidées par le chirurgien de l'extérieur, s'assembleraient automatiquement pour former la structure souhaitée.

Un chirurgien utiliserait alors ce robot assemblé comme un outil sans fil : il pourrait opérer sans avoir besoin de faire la moindre incision externe. L'acte chirurgical terminé, les liaisons magnétiques entre les capsules seraient reconfigurées ou rompues, ce qui permettrait aux différentes parties d'être éliminées par les selles. Nous avons fabriqué un premier prototype constitué de capsules de deux centimètres cubes environ, motorisées et télécommandées. Chaque capsule pourrait porter un capteur, par exemple une caméra ou des instruments chirurgicaux spécialisés.

Les composants robotiques miniaturisés pourraient aussi avoir d'autres fonctions. Les systèmes de contrôle et les caméras mis au point pour les capsules vidéo-endoscopiques influencent déjà d'autres techniques biomédicales, tels les endoscopes classiques et les dispositifs utilisés pour les laparoscopies (l'examen de l'intérieur de l'abdomen). Au-delà des soins médicaux, on constate une tendance à la miniaturisation et à la commande sans fil de robots multifonctionnels. Les gélules robots serviront sans doute d'exemples pour d'autres machines utilisées dans de tout autres domaines. ■



UNE GÉLULE HYBRIDE GUIDÉE par des électroaimants externes se déplace dans le côlon d'un cochon, en utilisant ses pattes pour ajuster sa position et repousser le tissu environnant.

Arianna Mencias

Opérer à distance

On peut étendre la gamme des tâches que peuvent effectuer les gélules robots en les concevant de sorte qu'elles s'auto-assemblent dans l'organisme. Le patient avalerait une douzaine de gélules ; dans l'estomac, ces gélules s'assembleraient pour former un robot. Les chirurgiens contrôlèrent ce dispositif à distance, sans fil. Lorsque l'acte chirurgical serait terminé, le robot se scinderait en capsules, qui passeraient sans difficulté dans le tube digestif.

Une configuration chirurgicale possible



Frank Hülshömer

LES AUTEURS



Paolo DARIO et Arianna MENCIASSI sont professeurs de robotique biomédicale à l'École supérieure Sant'Anna de Pise, en Italie.

✓ BIBLIOGRAPHIE

K. Harada *et al.*, *Wireless reconfigurable modules for robotic endoluminal surgery*, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japon, 2009.

P. Valdastris *et al.*, *Wireless therapeutic endoscopic capsule : in vivo experiment*, *Endoscopy* 2008, vol. 40, pp. 979-982, 2008.

A. Moglia *et al.*, *Wireless capsule endoscopy : from diagnostic devices to multipurpose robotic systems*, *Biomedical Microdevices*, vol. 9, pp. 235-243, 2006.

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 3 000 kilomètres par heure, mais se déplacent à des vitesses comprises entre 0 et 6 000 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 3 000 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,



Mark RAIZEN est titulaire de la chaire Sid W. Richardson de physique à l'Université du Texas à Austin, aux États-Unis.

sans que nous le sachions, une autre équipe dirigée par Frédéric Merkt, à l'Institut de technologie (ETH) de Zurich, en Suisse, a développé la même idée, parvenant à immobiliser des atomes d'hydrogène. Aujourd'hui, plusieurs groupes à travers le monde ont construit de tels canons magnétiques : ce sont des équipements robustes et néanmoins très simples, constitués de fil de cuivre ordinaire, de transistors et de condensateurs disponibles dans le commerce.

Les atomes du gaz ralentis, il est relativement facile de les piéger à l'aide de champs magnétiques statiques. Si la température atteinte – de l'ordre de 0,01 kelvin (un centième de degré au-dessus du zéro absolu) – peut sembler très basse, elle est encore loin des limites atteintes par d'autres techniques. Nous devons trouver un moyen de refroidir davantage les atomes.

Des portes à sens unique

Pendant longtemps, je n'ai pas vu de solution à ce problème technique. Le refroidissement laser, inventé dans les années 1980, a été un grand succès. Il a permis d'accéder à un nouvel état de la matière, le condensat de Bose-Einstein, et a donné lieu à deux prix Nobel de physique, en 1997 et en 2001. Mais le refroidissement laser s'applique principalement aux éléments de la première colonne du tableau périodique, les éléments alcalins tels le sodium ou le potassium. Il est en effet facile de faire passer ces atomes de leur état fondamental à un état excité unique, comme le nécessite cette technique.

J'ai également envisagé une autre approche, le refroidissement par évaporation, qui consiste à «écumer» les atomes les plus chauds afin de ne conserver que les plus froids. Mais sans refroidissement laser, il est très difficile d'obtenir une densité d'atomes assez élevée pour amorcer l'évaporation.

En février 2004, en visite à l'Université de Princeton, dans le New Jersey (États-Unis), j'ai pu discuter avec Nathaniel Fisch, physicien des plasmas (des gaz d'électrons et d'ions positifs). Il venait de développer un système créant un courant électrique dans le plasma par le déplacement d'électrons dans un sens unique. Je me suis demandé s'il était possible de faire circuler de la même façon des atomes ou des molécules à sens uni-

que. Il faudrait construire une «porte» qui laisserait entrer les atomes dans un sens, mais leur interdirait de sortir.

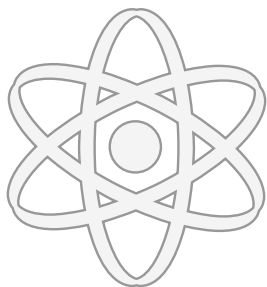
Laissons de côté pour le moment l'aspect technique de la construction d'une telle porte unidirectionnelle et expliquons pourquoi ce dispositif refroidirait un gaz. Dans un premier temps, il faut réduire le volume du gaz sans augmenter sa température. Supposons qu'une barrière divise un récipient en deux volumes. Les atomes du gaz, qui rebondissent aléatoirement dans le récipient, viennent frapper la porte à un moment ou à un autre. Si celle-ci les laisse passer dans un sens uniquement (par exemple de la gauche vers la droite), tous les atomes se retrouveront à la fin dans la partie droite du récipient.

Il est important de noter que les vitesses des atomes ne changent pas lors de cette étape de tri. Ainsi, le gaz enfermé dans la partie droite aura la même température qu'au départ. D'un point de vue thermodynamique, la procédure est très différente d'une compression du gaz dans un volume deux fois plus petit, où les atomes sont accélérés par le piston : dans ce cas, la température du gaz augmente.

Dans un second temps, on retire la porte. Le gaz se dilate et reprend son volume initial. Or quand un gaz se dilate, sa température décroît (c'est pourquoi les bombes d'aérosol se refroidissent lors de leur utilisation). À la fin, le gaz occupe le même volume qu'au départ, mais sa température est plus basse.

Une telle procédure, si elle paraît simple, a longtemps troublé les physiciens : imaginer une porte capable de trier les atomes en fonction de leur direction semble violer les lois physiques. En effet, lorsque le gaz se retrouve confiné dans la partie droite du récipient, il a une entropie inférieure (l'entropie reflète le désordre d'un système donné). Or d'après le deuxième principe de la thermodynamique, il est impossible d'abaisser l'entropie d'un système sans dépenser de l'énergie et produire davantage d'entropie ailleurs.

Ce paradoxe a suscité la controverse dès sa formulation par Maxwell en 1871. Le physicien écossais proposait de faire intervenir un «être intelligent aux mains agiles», capable d'observer les allées et venues des particules, ouvrant et fermant la porte en fonction de leur mouvement. Ce «démon de Maxwell» hypothétique semblait violer le deuxième principe de la thermodynamique, puisqu'il parvient à



diminuer l'entropie du gaz en opérant un tri intelligent, tout en dépensant une quantité négligeable d'énergie.

Un démon voleur d'entropie

Près de 60 ans plus tard, en 1929, Leó Szilárd, physicien hongaro-américain, a résolu ce paradoxe. Selon lui, afin de prendre la décision d'ouvrir ou de fermer la porte, le démon de Maxwell doit recueillir de l'information. Laquelle information, précisait-il, est porteuse d'entropie. Ainsi, la diminution d'entropie du gaz est exactement compensée par l'entropie prélevée par le démon sous forme d'information : le deuxième principe de la thermodyna-

mique est sauf. Cette intuition place Szilárd en avance sur son temps : l'idée selon laquelle l'information a une réelle signification physique, et qu'elle est étroitement liée à l'entropie, est en partie à l'origine des sciences de l'information.

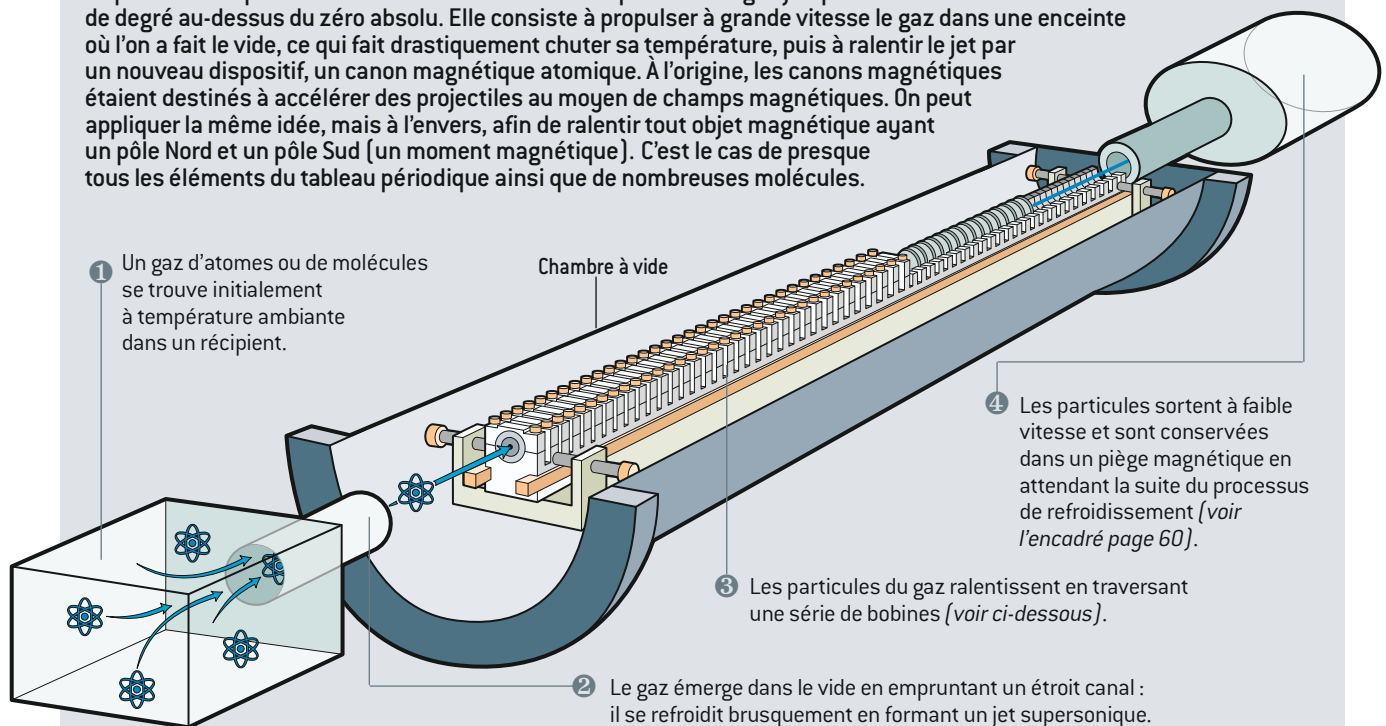
Les réflexions autour du paradoxe de Maxwell et de la solution proposée par Szilárd sont restées pendant de nombreuses années des spéculations purement théoriques. Mes collègues et moi avons été les premiers à réaliser expérimentalement l'expérience de pensée de Maxwell de la façon dont il la concevait, et à montrer en quoi l'intuition de Szilárd, selon laquelle l'information joue un rôle crucial, était correcte. Mentionnons toutefois qu'il y a eu d'autres expériences

récentes fondées sur les mêmes ressorts conceptuels, en utilisant plutôt des nanomachines. Grâce à nos portes à gaz, nous sommes parvenus à refroidir des atomes jusqu'à des températures de 15 millièmes de kelvin.

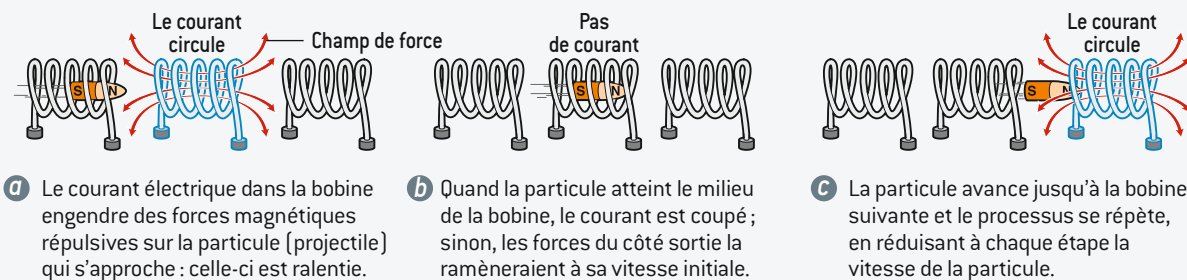
Pour qu'une porte à sens unique fonctionne, j'ai compris que les atomes du gaz devaient avoir deux états différents, deux configurations stables des électrons en orbite. Considérons un gaz d'atomes dans deux états, dénommés bleu et rouge. Les atomes se déplacent dans un récipient traversé en son milieu par un faisceau laser, réglé sur une longueur d'onde bien particulière. Quand ils s'approchent du faisceau, les atomes rouges rebondissent : ils trouvent porte close.

PREMIÈRE ÉTAPE : DES FREINS MAGNÉTIQUES

La première étape de refroidissement abaisse la température du gaz jusqu'à environ un centième de degré au-dessus du zéro absolu. Elle consiste à propulser à grande vitesse le gaz dans une enceinte où l'on a fait le vide, ce qui fait drastiquement chuter sa température, puis à ralentir le jet par un nouveau dispositif, un canon magnétique atomique. À l'origine, les canons magnétiques étaient destinés à accélérer des projectiles au moyen de champs magnétiques. On peut appliquer la même idée, mais à l'envers, afin de ralentir tout objet magnétique ayant un pôle Nord et un pôle Sud (un moment magnétique). C'est le cas de presque tous les éléments du tableau périodique ainsi que de nombreuses molécules.



Comment le canon magnétique fonctionne



Au départ, tous les atomes sont bleus, et peuvent passer sans encombre la porte laser. Une fois la porte franchie, les atomes désormais situés à sa droite rencontrent un second faisceau laser, réglé pour transformer les atomes bleus en atomes rouges par diffusion d'un unique photon. Les atomes, devenus rouges, sont dorénavant repoussés par le premier faisceau laser, et ne peuvent plus traverser la porte dans l'autre sens. À la fin, tous les atomes, rouges, se retrouvent du côté droit, le côté gauche étant vide.

Nous avons ainsi refroidi des atomes de rubidium lors d'une première démonstration de notre porte, début 2008. Nous avons qualifié de «refroidissement à un seul photon» cette méthode, pour la distinguer des premières techniques de refroidissement laser où de nombreux photons interviennent pour refroidir chaque atome.

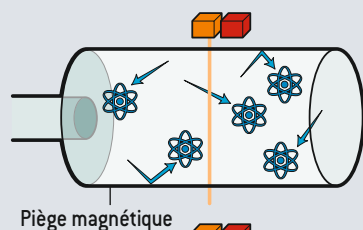
Au même moment, Gonzalo Muga, de l'Université de Bilbao, et son collaborateur Andreas Ruschhaupt (maintenant à l'Université Leibniz de Hanovre, en Allemagne) développaient un concept simi-

laire. Nous avons d'ailleurs travaillé tous les trois ensemble afin d'éclaircir certains aspects théoriques du fonctionnement de la porte.

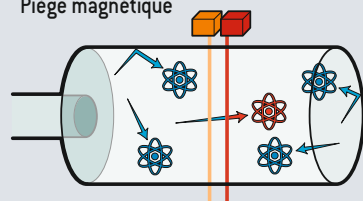
Nous avons montré en 2006 que lorsqu'un photon est diffusé par un atome (lors de la transition de l'état bleu à l'état rouge), ce photon emporte de l'information relative à l'atome : cette information correspond, selon l'hypothèse de Szilárd, à une minuscule quantité d'entropie. Alors que le photon incident, qui excite l'atome, est issu d'un train ordonné de photons – le faisceau laser –, le photon diffusé se propage dans une direction aléatoire : les photons deviennent donc plus désordonnés.

SECONDE ÉTAPE : UN FROID DÉMONIAQUE

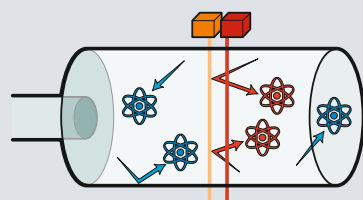
Une fois le gaz refroidi à quelques centièmes de degré au-dessus du zéro absolu par un canon magnétique (ou par un autre dispositif), un processus de refroidissement plus poussé doit prendre le relais, afin de faire descendre la température à quelques millièmes de kelvin, voire moins. Le refroidissement à un seul photon réalise cet exploit grâce à une porte à sens unique, inspirée d'une expérience de pensée du XIX^e siècle, le démon de Maxwell. L'idée est d'abord de concentrer, à l'aide de la porte, les atomes dans un plus petit volume (sans augmenter leur température), puis de leur redonner accès au volume initial (ce qui abaisse la température).



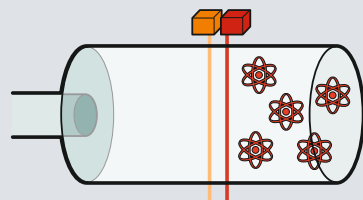
- 1 Des atomes dans un état initial donné (en bleu) sont retenus dans un piège magnétique. On allume alors un laser (en orange) qui n'agit que sur les atomes situés dans leur second état stable.



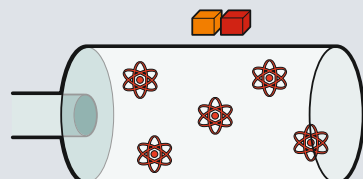
- 2 Un second faisceau laser (en rouge) fait basculer les atomes qui le croisent, de leur état bleu vers leur second état stable (atome rouge).



- 3 Les atomes dans l'état rouge rebondissent dorénavant quand ils rencontrent le laser orange : ils sont contraints de rester du côté droit du piège.



- 4 Tous les atomes finissent par traverser le second laser : ils deviennent rouges et restent bloqués du côté droit. Ils sont à la même température qu'au départ, mais dans un volume plus petit.



- 5 On éteint les deux lasers, le gaz d'atomes reprend alors son volume initial. En se dilatant, il se refroidit.

L'entropie est dans les photons

Nous avons montré que l'augmentation d'entropie, liée au désordre croissant des photons, compense exactement la diminution d'entropie des atomes confinés grâce à la porte à sens unique. Ainsi, le refroidissement à un seul photon fonctionne comme un démon de Maxwell, dans le sens précis où l'entendait Szilárd en 1929. Notre démon est simple et efficace : c'est un faisceau laser dont l'opération de tri se fonde sur un phénomène irréversible, la diffusion d'un photon unique. Ce n'est ni un être intelligent ni un ordinateur. Il ne prend pas *stricto sensu* des décisions fondées sur l'information portée par les atomes : il suffit que cette information soit disponible et qu'elle puisse en principe être recueillie.

Le contrôle du mouvement des atomes et des molécules ouvre de nouvelles pistes scientifiques. Les chimistes vont pouvoir piéger et refroidir des molécules afin d'étudier les réactions chimiques dans le régime quantique. N'importe quelle molécule dotée d'un moment magnétique peut être ralentie par le canon magnétique, qui complète utilement une autre méthode similaire, utilisant des forces électriques pour freiner une molécule polarisée électriquement.

Pour des molécules assez petites, le refroidissement à un seul photon pourrait abaisser la température suffisamment pour observer des phénomènes quantiques. Par exemple, les ondes quantiques associées aux molécules s'étireraient assez pour que des molécules éloignées les unes des autres réagissent, et cela sans qu'on ait à fournir l'énergie cinétique

habituellement nécessaire au déclenchement des réactions chimiques.

Un avantage majeur du refroidissement à un seul photon est qu'il s'applique à l'hydrogène et ses isotopes, le deutérium (son noyau est composé d'un proton et d'un neutron) et le tritium (un proton et deux neutrons). Au prix de grands efforts, Dan Kleppner et Thomas Greytak, du MIT, ont réussi à la fin des années 1990 à piéger et refroidir l'hydrogène par des méthodes de cryogénie et de refroidissement par évaporation. Mais ils n'ont jamais pu en faire autant pour le deutérium ou le tritium. Le refroidissement à un seul photon, parce qu'il s'appuie sur un dispositif relativement simple, est adapté au piégeage et au refroidissement des trois isotopes de l'hydrogène.

Le piégeage et le refroidissement du tritium pourraient offrir une réponse à l'une des grandes questions actuelles de la physique des particules : quelle est la masse d'un neutrino ? Le tritium est un isotope radioactif : il se transforme en hélium 3 quand l'un de ses neutrons se désintègre par désintégration bêta pour former un proton, en émettant un électron et un antineutrino (l'homologue pour l'antimatière du neutrino). En mesurant avec précision l'énergie de l'électron émis, les physiciens pourraient déterminer l'énergie disparue, correspondant à l'antineutrino (qui peut traverser l'appareil sans être détecté), et donc sa masse, en principe identique à celle du neutrino.

Séparation d'isotopes, nanostructures...

Les mêmes méthodes pourront s'appliquer aux atomes d'antihydrogène, constitués d'un antiproton et d'un positron (l'antiparticule de l'électron), obtenus récemment au CERN, le laboratoire européen de physique des particules, près de Genève. Un tel antiatome est extrêmement délicat à manipuler, car l'antimatière disparaît très vite, en émettant un éclair d'énergie, dès qu'elle entre en contact avec la matière.

Ici, la méthode du jet supersonique ne peut pas être utilisée comme point de départ. Un faisceau d'antihydrogène pourrait être produit en lançant des antiprotons dans un nuage de positrons, puis arrêté et refroidi avec notre démon de Maxwell. Les expériences sur l'antihydrogène devraient répondre à une question sim-

ple : l'antimatière tombe-t-elle comme la matière ? En d'autres termes, la gravité agit-elle de la même façon sur tous les objets de même masse ?

D'autres applications importantes sont envisageables. Les isotopes de la plupart des éléments peuvent être séparés à l'aide d'un appareil appelé calutron, inventé par Ernest Lawrence dans le cadre du projet Manhattan. Les isotopes, de masses légèrement différentes, y sont séparés au moyen d'un champ électrique, comme

REFROIDIR DES GAZ DE TRITIUM permettrait de répondre à une question fondamentale : quelle est la masse du neutrino ?

dans un spectromètre de masse. Le seul calutron encore actif à l'heure actuelle se situe en Russie, cette méthode étant assez inefficace. On pourrait appliquer le concept du démon de Maxwell, semblable à celui qui fonctionne pour le refroidissement, à la séparation d'isotopes au sein d'un même faisceau : dans ce cas, la porte laser devrait trier les différents isotopes. Cette méthode, plus efficace que les calutrons, pourrait produire des isotopes comme du calcium 48 ou de l'ytterbium 168, utiles en médecine et en recherche fondamentale. Ne produisant que de faibles quantités d'un isotope donné, elle ne présenterait aucun risque de prolifération nucléaire.

Par ailleurs, la méthode des jets supersoniques permettrait de construire des structures nanométriques. Au lieu d'utiliser des champs magnétiques pour ralentir les atomes, on pourrait les utiliser pour focaliser les faisceaux d'atomes, de la même façon qu'une lentille focalise la lumière. Il serait possible d'atteindre une résolution de un nanomètre seulement, voire moins. De tels faisceaux pourraient déposer des atomes et former des structures plus fines qu'il n'est aujourd'hui possible avec la photolithographie, utilisée pour fabriquer les puces électroniques. La construction de structures nanométriques, atome par atome, par une approche ascendante plutôt que descendante (comme c'est généralement le cas en nanosciences), constitue un nouveau domaine que j'ai nommé « atomoscience ».

Le zéro absolu reste une température toujours inaccessible, mais le chemin qui nous en rapproche est pavé de nombreuses découvertes. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Jerkins *et al.*, Efficient isotope separation by single-photon atomic sorting, *Physical Review A*, vol. 82, n° 3, 033414, 2010.

E. Narevicius *et al.*, Stopping supersonic beams with a series of pulsed electromagnetic coils : an atomic coilgun, *Physical Review Letters*, vol. 100, n° 9, 093003, 2008.

A. Ruschhaupt, J. G. Muga et M. G. Raizen, One-photon atomic cooling with an optical Maxwell demon valve, *Journal of Physics B*, vol. 39, pp. 3833-3838, 2006.

M. Raizen *et al.*, Compression of atomic phase space using an asymmetric one-way barrier, *Physical Review Letters*, vol. 94, n° 5, 053003, 2005.

Y. Castin, Les atomes ultrafroids, *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.

L. Szilárd, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik. A*, vol. 53, n° 11-12, pp. 840-856, 1929.

Une bande de précipitations **mouvante**

Julian Sachs et Conor Myhrvold

En cartographiant les précipitations équatoriales sur le Pacifique depuis l'an 800, les scientifiques reconstituent les déplacements de la ceinture pluviale. Ils obtiennent ainsi un aperçu de l'évolution du climat tropical d'ici 2100.

L'ESSENTIEL

- ✓ La bande de précipitations qui ceinture la Terre se décale au gré des changements de la température atmosphérique. Ce déplacement modifie les schémas de précipitations dans le monde entier.
- ✓ Les sédiments prélevés au fond des lacs des îles du Pacifique indiquent que cette bande se situe aujourd'hui à une latitude comprise entre trois et dix degrés de latitude Nord, position jamais atteinte depuis au moins 1 200 ans.
- ✓ Si le réchauffement climatique se poursuit au même rythme, ce décalage vers le Nord pourrait s'accroître de cinq degrés d'ici 2100, asséchant les terres de millions d'agriculteurs en Équateur, en Colombie et ailleurs.

