

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.

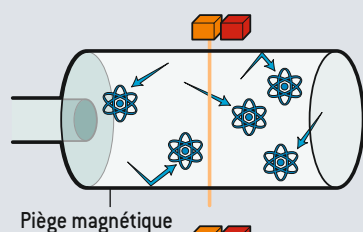
Au même moment, Gonzalo Muga, de l'Université de Bilbao, et son collaborateur Andreas Ruschhaupt (maintenant à l'Université Leibniz de Hanovre, en Allemagne) développaient un concept simi-

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

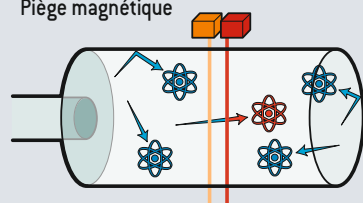
Nous avons montré en 2006 que lorsqu'un photon est diffusé par un atome (lors de la transition de l'état bleu à l'état rouge), ce photon emporte de l'information relative à l'atome : cette information correspond, selon l'hypothèse de Szilárd, à une minuscule quantité d'entropie. Alors que le photon incident, 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

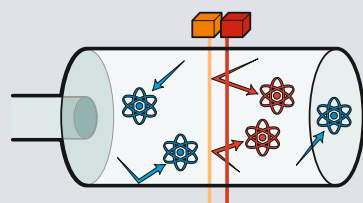
Une fois le gaz refroidi à quelques centièmes de degré au-dessus du zéro absolu par un canon magnétique (ou par un autre dispositif), un processus de refroidissement plus poussé doit prendre le relais, afin de faire descendre la température à quelques millièmes de kelvin, voire moins. Le refroidissement 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).



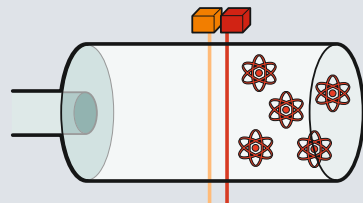
- 1 Des atomes dans un état initial donné (en bleu) sont retenus dans un piège magnétique. On allume alors un laser (en orange) qui n'agit que sur les atomes situés dans leur second état stable.



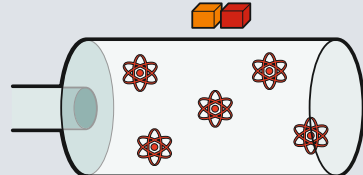
- 2 Un second faisceau laser (en rouge) fait basculer les atomes qui le croisent, de leur état bleu vers leur second état stable (atome rouge).



- 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.