



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.

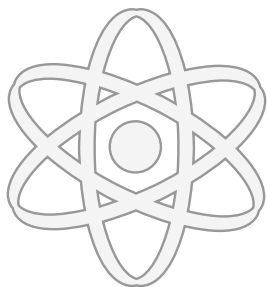
Laissons de côté pour le moment l'aspect technique de la construction d'une telle porte unidirectionnelle et expliquons pourquoi ce dispositif refroidirait un gaz. Dans un premier temps, il faut réduire le volume du gaz sans augmenter sa température. Supposez qu'une barrière divise un récipient en deux 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.

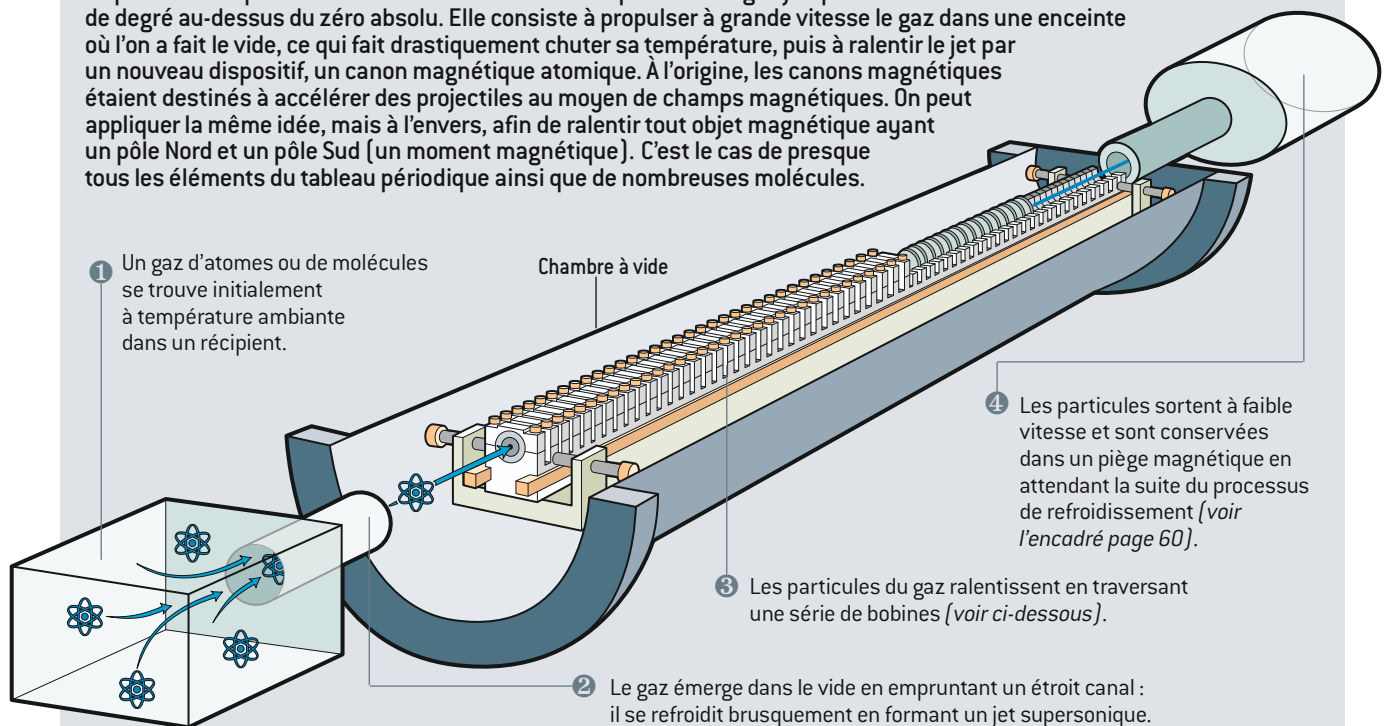
Les réflexions autour du paradoxe de Maxwell et de la solution proposée par Szilárd sont restées pendant de nombreuses années des spéculations purement théoriques. Mes collègues et moi avons été les premiers à réaliser expérimentalement l'expérience de pensée de Maxwell de la façon dont il la concevait, 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

