



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,

L'AUTEUR



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