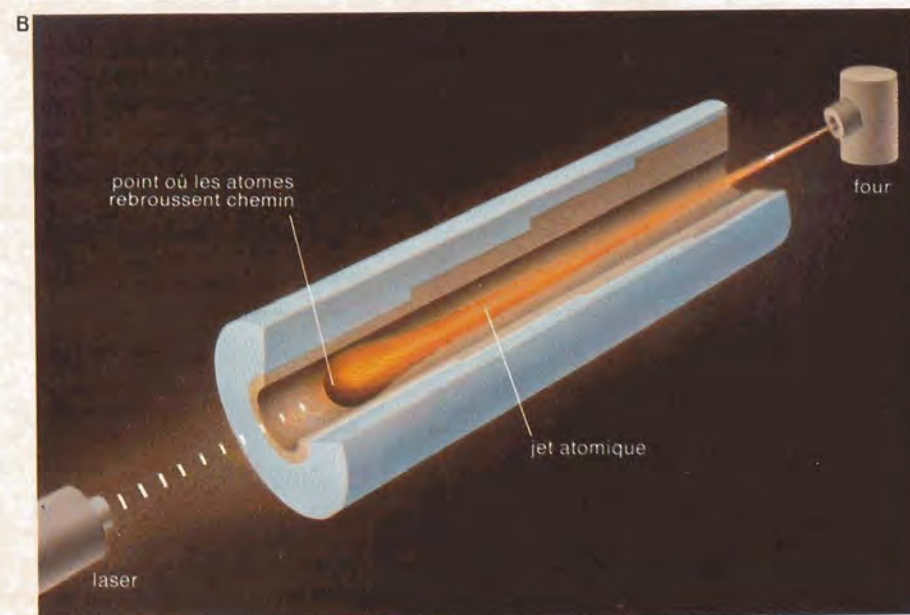


Un remarquable résultat obtenu aux États-Unis avec un simple faisceau laser.

Immobiliser les atomes à coup de lumière laser



Il est facile, à l'aide de champs électriques ou magnétiques, de contrôler le mouvement de particules chargées comme des électrons ou des ions. Par contre, il n'en va pas de même pour les atomes neutres sur lesquels très peu de moyens d'action sont efficaces. C'est donc un résultat remarquable qui vient d'être obtenu aux États-Unis où deux équipes ont réussi à immobiliser un jet d'atomes à l'aide d'un simple faisceau laser^(1,2).

Le fait que la vitesse d'un atome puisse changer lors de l'interaction de cet atome avec de la lumière n'est *a priori* pas nouveau : il remonte à 1917, année pendant laquelle Einstein établit les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion lors de l'absorption et de l'émission d'un photon par un atome. Mais, lorsqu'un seul de ces processus est en jeu, la variation d'impulsion, et par suite de vitesse, de l'atome est très faible. Il faut donc répéter cette interaction un grand nombre de fois pour parvenir à un changement appréciable de la vitesse atomique. L'utilisation d'un faisceau laser intense facilite alors grandement l'expérience.

Ce changement peut d'abord concerner la direction de la vitesse; c'est ainsi qu'il y a une dizaine d'années, des physiciens en France⁽³⁾ et à l'étranger⁽⁴⁾ avaient réussi à dévier légèrement un jet d'atomes par un faisceau laser. Le faisceau lumineux peut également modifier le module de la vitesse atomique et, pourquoi pas, arrêter complètement cet atome : c'est ce que viennent de réaliser les deux équipes américaines du National Bureau of Standards à Washington DC et à Boulder. Une expérience similaire, elle aussi très prometteuse, est également en cours à Moscou⁽⁵⁾.

Cinquante centimètres pour arrêter un jet atomique.

Pourquoi cette course aux atomes immobiles ? Le bénéfice le plus grand sera probablement pour la spectroscopie; dans cette discipline, on mesure les fréquences de la lumière émise par des atomes pour remonter ensuite à leur structure interne et à la position de leurs niveaux d'énergie. Or le mouvement de ces atomes limite notablement la précision des

Deux équipes américaines du National Bureau of Standards, à Washington et à Boulder, ont réussi à immobiliser un jet d'atomes à coups de photons. Dans l'expérience de Washington, un jet atomique de sodium issu d'un four est ralenti par un faisceau laser se propageant à contre courant du jet. Le principe du montage expérimental est représenté en B. Les atomes sont ralentis par absorption de photons laser. Un solénoïde à pas variable permet d'ajuster la fréquence d'absorption des atomes pour la faire coïncider avec celle des photons laser au fur et à mesure que le ralentissement s'opère. La photo du haut (A) montre les atomes immobilisés avant de rebroussement chemin à la sortie du solénoïde. L'extrémité du faisceau lumineux laisse deviner la paroi du solénoïde. En France et à l'étranger, une dizaine de groupes de physiciens cherchent maintenant à « piéger » les atomes immobilisés. (Cliché communiqué par l'équipe du NBS de Washington.)

résultats. Ces mesures peuvent donc être affinées grâce à l'utilisation d'atomes immobiles. Une retombée technologique directe est alors l'amélioration des horloges atomiques, dont la précision est indispensable à la navigation aérienne ou sous-marine. Ces horloges sont en effet fondées sur la détermination très précise de la fréquence de l'onde émise par un atome (césium ou rubidium) lors d'une transition entre deux de ses niveaux d'énergie.

Ces expériences de Washington et de Boulder ont été réalisées sur un jet d'atomes de sodium de vitesse initiale moyenne de 1 000 mètres par seconde. Ce jet est éclairé à contre courant par un faisceau lumineux issu d'un laser, dont la longueur d'onde est choisie égale à 0,589 micron (voir figure). Dans ces conditions, l'énergie d'un photon laser est exactement égale à la différence entre l'énergie de l'état fondamental de l'atome de sodium et l'énergie de son premier état excité. Un atome de sodium, initialement dans son état fondamental, peut donc absorber un photon laser pour passer dans son état excité. Mais cet état est instable, et en un temps moyen de 16 milliardièmes de seconde (16 nanosecondes), l'atome retombe dans son état fondamental en émettant spontanément un autre photon, appelé photon de fluorescence, dans une direction aléatoire. L'atome peut alors réabsorber un deuxième photon laser et ainsi de suite... C'est la répétition de tels cycles qui provoque le ralentissement des atomes. En effet, chaque absorption d'un photon laser diminue la vitesse de l'atome d'une même quantité, car les photons ont tous la même direction. Par contre l'émission d'un photon de fluorescence, puisqu'elle se fait dans une direction aléatoire, ne change pas en moyenne la vitesse de l'atome. Chaque cycle « absorption-émission spontanée » correspond donc pour l'atome à un « choc » qui diminue sa vitesse d'une quantité qui ne dépend que de sa masse et de la longueur d'onde des photons laser, et qui vaut 3 centimètres par seconde pour le sodium. Il faudra donc à peu près 33 000 chocs pour arrêter les atomes allant initialement à 1 000 mètres/seconde.

Les problèmes liés à l'effet Doppler.

Le problème est maintenant de réaliser ces 33 000 chocs le plus rapidement possible pour que les atomes ne se déplacent pas trop au cours de leur ralentissement et que l'expérience garde une taille raisonnable. On utilise pour cela un laser suffisamment puissant pour atteindre la situation limite dans laquelle les atomes passent la moitié du temps dans l'état fondamental et l'autre moitié dans l'état excité. L'intervalle moyen entre chaque choc est alors de deux fois 16, soit 32 nanosecondes, et le ralentissement total dure à peu près 1 millième de seconde : les atomes parcourent ainsi 50 centimètres avant de s'immobiliser. Notons que ce ralentissement s'effec-

tue avec une accélération, ou plutôt une décélération, 100 000 fois supérieure à l'accélération de la pesanteur terrestre.

Dans la description précédente, nous avons supposé que l'accord de fréquence entre les atomes de sodium et la lumière laser était parfait, ce qui garantissait une efficacité décélétratrice maximale. Malheureusement, la variation de vitesse des atomes perturbe quelque peu cet accord de fréquence en raison de l'effet Doppler. Rappelons d'abord la nature de cet effet sur un exemple courant. Quand un train pénètre dans une gare pour s'y arrêter, les personnes immobiles sur le quai perçoivent une variation de la hauteur de son émis par sa sirène : ce son d'abord aigu devient de plus en plus grave au fur et à mesure que le train ralentit. Il en va de même pour les atomes qui, au cours de leur ralentissement, « ressentent » un changement de la fréquence laser. Mais cet effet, s'il est anodin pour les voyageurs de la SNCF, peut être fort gênant pour les atomes de sodium : si la fréquence laser apparente change, l'accord avec la fréquence atomique ne se fait plus et le ralentissement s'interrompt bien avant l'immobilisation des atomes.

Pour surmonter cette difficulté, les deux équipes américaines de Washington et de Boulder ont utilisé des techniques différentes. A Boulder, J. Hall et son équipe ont choisi de faire varier temporellement la fréquence du laser⁽²⁾. Cette variation, produite par un effet électro-optique dans un cristal, est choisie de manière à compenser exactement la variation d'effet Doppler liée au ralentissement. On obtient alors des bouffées d'atomes quasi immobiles (vitesse inférieure à 5 mètres par seconde) avec une densité de l'ordre du million d'atomes par centimètre cube. A Washington, W. Phillips, H. Metcalf et leur équipe ont choisi de faire varier spatialement la fréquence atomique⁽¹⁾ : on utilise pour cela un solénoïde à pas variable qui produit le long de la trajectoire de l'atome un champ magnétique décroissant. Ce champ magnétique déplace la fréquence atomique (c'est l'effet Zeeman) d'une quantité qui varie le long de la trajectoire et la forme du solénoïde est calculée de telle sorte que ce déplacement Zeeman compense la variation d'effet Doppler due au ralentissement. Les atomes immobiles sont alors produits de manière continue à l'intérieur du solénoïde et on peut les observer grâce à la lumière de fluorescence qu'ils émettent (voir figure).

Pour extraire ces atomes du solénoïde, la méthode utilisée est la suivante : on se contente de ralentir fortement les atomes à l'intérieur du solénoïde (vitesse finale de l'ordre de 40 mètres/seconde) et on coupe le faisceau laser. Les atomes sortent alors du solénoïde dans l'obscurité, puis on les immobilise complètement à l'endroit désiré à l'aide d'une nouvelle impulsion laser d'une centaine de microsecondes. Les performances obtenues sont alors voisines de celles de l'équipe de Boulder.

La production d'atomes très lents est avant tout intéressante pour la spectroscopie. Elle permet en effet un allongement des temps d'observation des atomes et donc une amélioration de la précision des mesures. A une faible vitesse atomique correspond également un faible déplacement Doppler des raies émises, ce qui n'est pas négligeable car ce déplacement Doppler limite souvent la précision des mesures spectroscopiques. Toutes ces améliorations sont directement transposables aux horloges atomiques, standard de temps et de fréquence qui ont pour base une fréquence propre de l'atome de césium. Une expérience visant à ralentir un jet de césium, au lieu de sodium comme c'est le cas jusqu'à maintenant, est d'ailleurs en projet au laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Paris.

De meilleures horloges et de nouveaux pièges.

La physique atomique et moléculaire peut également trouver dans ces expériences un nouvel outil : un jet atomique lent, de vitesse et de direction parfaitement contrôlable. On peut imaginer pour ce type de jet toute une « optique laser » semblable à l'optique électronique qui guide les pinces d'électrons dans un tube cathodique.

Enfin ces atomes quasi immobiles peuvent être enfermés dans des « boîtes » d'un type nouveau : des pièges magnétiques⁽⁶⁾ ou des pièges lumineux⁽⁷⁾. Ces deux types de pièges fonctionnent de la même manière : les niveaux d'énergie atomique sont déplacés par un champ magnétique statique ou un faisceau laser, ce qui pousse les atomes là où le champ magnétique ou l'intensité laser sont extrêmes. Le seul défaut de ces « boîtes » sans parois réelles est leur très faible profondeur : les atomes aux vitesses usuelles ne peuvent s'y piéger de même qu'une balle de golf trop rapide manque son trou. Les progrès récents enregistrés en matière de ralentissement laser peuvent permettre de franchir cette étape difficile de l'alimentation du piège, dont l'étude s'annonce ensuite passionnante. Les vitesses atomiques prévues à l'intérieur sont en effet très basses (quelques dizaines de centimètres par seconde) et sont comparables à celles des atomes d'un gaz de température inférieure au millième de degré Kelvin. Comment se comporteront dans ces conditions les atomes piégés à forte densité ? Se formera-t-il des molécules, des agrégats ou encore des microcristaux ? Une dizaine de groupes expérimentaux, en France et à l'étranger, cherchent à l'heure actuelle à réaliser de tels pièges, alimentés par des atomes immobilisés grâce aux techniques qui viennent d'être mises au point. Les premiers atomes « piégés » ne devraient donc plus se faire trop attendre.

Jean Dalibard

- (1) J. V. Prodan et al., *Phys. Rev. Lett.*, 54, 992, 1985.
- (2) W. Ertmer et al., *Phys. Rev. Lett.*, 54, 996, 1985.
- (3) P. Jacquot et al., *Opt. Commun.*, 8, 163, 1973.
- (4) R. Schieder et al., *Opt. Commun.*, 5, 337, 1972.
- (5) V. O. Balykin et al., *Opt. Commun.*, 49, 248, 1984.
- (6) D. Pritchard, *Phys. Rev. Lett.*, 51, 1336, 1983.
- (7) J. Dalibard et al., *Opt. Commun.*, 47, 357, 1983.