

LE REFROIDISSEMENT DES ATOMES PAR LASER

Le laser est souvent associé à l'idée de chaleur, puisqu'il permet de souder, de découper, voire même de détruire... Et pourtant, on sait depuis quelques années utiliser la pureté de la lumière laser pour refroidir des gaz à des températures extrêmement basses, quelques millièmes de degré seulement au-dessus du zéro absolu (fig. 1). En utilisant judicieusement l'action mécanique de la lumière, on peut en effet réduire la vitesse moyenne d'agitation des atomes d'un gaz, cette vitesse passant de plusieurs centaines de mètres par seconde (température ambiante) à quelques centimètres par seconde.

Cette manipulation fine du mouvement d'atomes par laser ouvre de multiples perspectives, et plus d'une centaine de laboratoires dans le monde se sont lancés dans la course. Les enjeux portent d'abord sur la physique du froid qui a toujours réservé de bonnes surprises, comme la supraconductivité de certains métaux ou la superfluidité de l'hélium liquide. Pour une assemblée d'atomes refroidis par laser, il s'agit par exemple de connaître le type d'organisation spatiale qui peut apparaître à des températures aussi basses. Les atomes vont-ils se solidifier suivant un réseau régulier ou se condenser sous d'autres formes? Des prévisions contradictoires s'affrontent en attendant le résultat des expériences.

Le refroidissement laser ouvre aussi de nouveaux horizons dans d'autres domaines de la physique. C'est ainsi qu'un nouveau thème, l'optique atomique, est en train de naître. Car, comme l'a énoncé au début du siècle le physicien français Louis de Broglie, à toute particule est associée une onde, qui se comporte dans une certaine mesure comme les ondes lumineuses. L'optique atomique cherche à agir sur les atomes comme l'optique traditionnelle permet de le faire sur la lumière, au moyen de miroirs, lentilles,

ALAIN ASPECT ET JEAN DALIBARD

DEPUIS QUELQUES ANNÉES, LES PHYSICIENS PARVIENNENT À CAPTURER ET À IMMOBILISER DE PETITS NUAGES D'ATOMES AU MOYEN DE « MÉLASSES OPTIQUES » FAITES DE FAISCEAUX LASER. LES ATOMES PEUVENT Y ÊTRE ANIMÉS DE VITESSES AUSSI FAIBLES QUE QUELQUES CENTIMÈTRES PAR SECONDE, CE QUI CORRESPOND À DES TEMPÉRATURES DE L'ORDRE DU MILLIONIÈME DE DEGRÉ ABSOLU. L'OBTENTION D'ATOMES AUSSI FROIDS N'EST PAS SEULEMENT UNE PROUESSE TECHNIQUE. IL EN RÉSULTE AUSSI UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DE L'INTERACTION ENTRE ATOMES ET LUMIÈRE, ET LA MISE EN ÉVIDENCE D'EFFETS IMPRÉVUS. LE REFROIDISSEMENT D'ATOMES PAR LASER OUVRE AINSI DES PERSPECTIVES FASCINANTES, DEPUIS L'ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS QUANTIQUES DES ATOMES FROIDS JUSQU'À LA RÉALISATION D'HORLOGES ATOMIQUES ENCORE PLUS PRÉCISES.

interféromètres. Les ondes de matière associées aux atomes froids peuvent avoir une grande longueur d'onde, bien plus grande que la dimension de l'atome. C'est dire que l'on perd la notion de position de l'atome, qui se dilue sur des distances importantes et ne recouvre son individualité de particule que lorsqu'un détecteur l'identifie. Si les expériences où des particules se comportent comme des ondes ne sont pas nouvelles, les premières interférences de systèmes composites et cependant faciles à préparer, comme les atomes, n'ont été observées que très récemment (voir « L'optique atomique » dans *La Recherche* d'octobre 1992). La perspective d'utiliser des atomes froids pour ce genre d'expériences passionne les chercheurs car ils pourront aborder de nouveaux domaines, encore inexplorés, grâce au caractère ondulatoire renforcé de ces objets.

La métrologie est également un moteur du développement de ces recherches. En effet, l'atome est à la base de la mesure du temps et des longueurs. Les étalons de temps sont des horloges atomiques, où l'oscillation des électrons d'atomes de césium remplace celle du balancier d'une horloge traditionnelle. Or la précision d'une horloge atomique est limitée par le temps de séjour des atomes dans le système de mesure. Des atomes refroidis par laser, quasiment au repos, autorisent de longs temps d'observation, conduisant à une amélioration potentielle spectaculaire des étalons de temps que sont les horloges atomiques.

L'action mécanique de la lumière sur les objets matériels avait été pressentie dès le début du XVII^e siècle par Kepler. Il expliquait ainsi que si la queue des comètes est toujours orientée à l'opposé du Soleil, c'est à cause de la pression exercée par la lumière solaire sur les particules qui composent cette queue. Même si l'explication actuelle de ce phénomène

est plus complexe, ce mécanisme fondé sur la pression de radiation exercée par la lumière sur des particules matérielles reste toujours qualitativement valable.

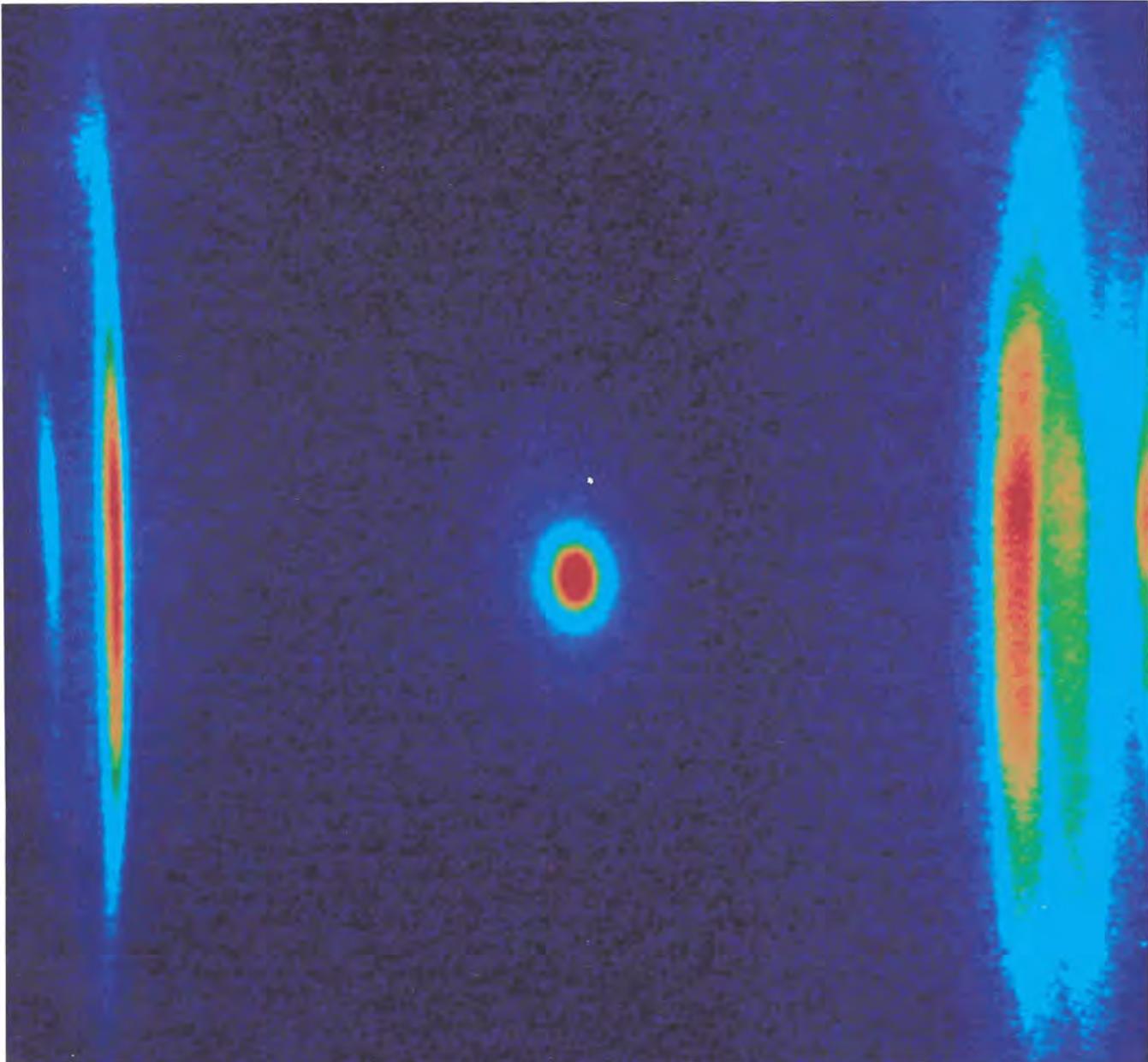
A une échelle beaucoup plus réduite, cette pression de radiation est également à la base de la plupart des expériences de manipulation d'atomes par de la lumière : un atome placé dans un faisceau laser est poussé dans la direction de propagation de ce faisceau. L'accélération correspondante peut atteindre des valeurs considérables — 100 000 fois l'accélération de la pesanteur pour l'atome de sodium soumis à la lumière jaune de longueur d'onde 589 nanomètres (une composante bien connue du spectre du sodium). Cette force résulte de la répétition des reculs encaissés par l'atome à chaque fois qu'il absorbe un photon. Un photon possède en effet une quantité de

mouvement qu'il transfère à l'atome, provoquant alors une modification de la vitesse atomique suivant la direction du faisceau. Ce changement de vitesse par photon absorbé, prévu par Einstein en 1917⁽¹⁾ et appelé vitesse de recul, varie, suivant la nature des atomes, de quelques millimètres par seconde à quelques mètres par seconde. L'atome subit aussi un recul lors de la réémission du photon, dit photon de fluorescence, qui suit chaque absorption. Mais à la différence des reculs liés à l'absorption des photons laser, qui s'ajoutent tous dans la même direction, les reculs associés à l'émission des photons de fluorescence se produisent dans des directions aléatoires ; leur somme est donc nulle en moyenne.

Pour obtenir une force intense, il s'agit alors de répéter le plus fréquemment possible ces cycles de fluorescence,

comprenant chacun une absorption suivie d'une réémission. Il faut pour cela que la lumière laser soit résonante avec une transition atomique. En d'autres termes, la fréquence lumineuse du laser doit être choisie telle que l'énergie d'un

Figure 1. La lumière laser permet de piéger et de refroidir les atomes d'une vapeur jusqu'à former un nuage dense au centre du piège. On voit au centre de ce cliché (en fausses couleurs) des atomes d'hélium ainsi piégés par un laser infrarouge en présence d'un champ magnétique. Les spires créant ce champ apparaissent sur les bords du cliché. Environ 100 000 atomes sont ici piégés dans un volume d'un millimètre cube. La température des atomes peut descendre à quelques millièmes de degré, ce qui ouvre la voie à des applications pour des horloges atomiques ultra-précises et pourrait être aussi à l'origine de nouvelles découvertes dans la physique du froid. (Cliché J.-N. Pignet)



ALAIN ASPECT est directeur de recherches au CNRS et maître de conférences à l'Ecole polytechnique. Jusqu'en 1991, il a travaillé au sein du Groupe de refroidissement d'atomes par laser du laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'Ecole normale supérieure (Paris) et du Collège de France. Il dirige depuis 1992 le groupe d'optique atomique à l'Institut d'optique théorique et appliquée d'Orsay.

JEAN DALIBARD est directeur de recherche au CNRS et maître de conférences à l'Ecole polytechnique. Il effectue ses recherches au laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'Ecole normale supérieure.

photon soit égale à la différence d'énergie entre le niveau atomique fondamental, occupé par l'atome en l'absence de lumière, et un niveau atomique excité. Dans ces conditions, pour des intensités lumineuses suffisantes, l'atome peut effectuer ces cycles à une cadence très élevée. Celle-ci n'est limitée que par le temps que l'atome passe dans le niveau excité avant de pouvoir réémettre un photon de fluorescence, encore appelé durée de vie du niveau atomique excité. En pratique, cette durée de vie est de l'ordre de quelques dizaines de milliardièmes de seconde, ce qui autorise des

neuse produite par une lampe à décharge est très insuffisante pour manipuler utilement les atomes.

Au début des années 1970, l'avènement des lasers de fréquence ajustable a ouvert la voie à des expériences nouvelles. Tout d'abord H. Walther et ses collègues, en Allemagne fédérale, ainsi que P. Jacquinet et son équipe, à Orsay, ont réussi en 1972-1973 à pousser efficacement des atomes avec un laser^(3,4). Mais bientôt, les physiciens ont cherché à faire mieux que de jouer au billard avec des atomes ; ils ont imaginé des opérations plus raffinées et plus spectaculaires qui permettent de

ondes ressentent une force opposée à sa vitesse, pourvu que l'on ait choisi la fréquence des ondes lumineuses légèrement inférieure à la fréquence de résonance atomique. L'atome est alors freiné très énergiquement, et il s'arrête en un temps qui dépend des caractéristiques des ondes lumineuses et qui peut être inférieur au millième de seconde. L'atome est littéralement englué dans les faisceaux lumineux, et l'on parle de « mélasse optique » (fig. 2).

Pour comprendre l'origine de cette force de friction qui freine l'atome, il faut invoquer l'effet Doppler-Fizeau : lorsqu'on

Figure 2. Un des premiers mécanismes proposés pour refroidir des atomes avec un laser utilise la pression de radiation. Le dispositif comprend deux ondes de même fréquence se propageant en sens inverses. Leur fréquence commune doit être légèrement inférieure à la fréquence de la lumière que peut absorber un atome au repos. Un atome se dirigeant vers la droite va à la rencontre de l'onde 1 et s'éloigne de l'onde 2 (A). A cause du mouvement, la fréquence des ondes dans le repère de l'atome est modifiée par l'effet Doppler-Fizeau. L'onde 1 paraît déplacée vers les hautes fréquences, et se rapproche de la fréquence atomique, alors que l'onde 2 paraît déplacée vers les basses fréquences et s'éloigne de la fréquence atomique (B). L'atome absorbe donc beaucoup plus facilement des photons de l'onde 1, qui vont à sa rencontre et qui le ralentissent, que des photons de l'onde 2. L'atome en mouvement vers la droite est donc freiné. En répétant le raisonnement pour un atome qui va vers la gauche et qui absorbe plus facilement l'onde 2, on voit que cet atome est également ralenti. C'est le principe du « refroidissement Doppler ».

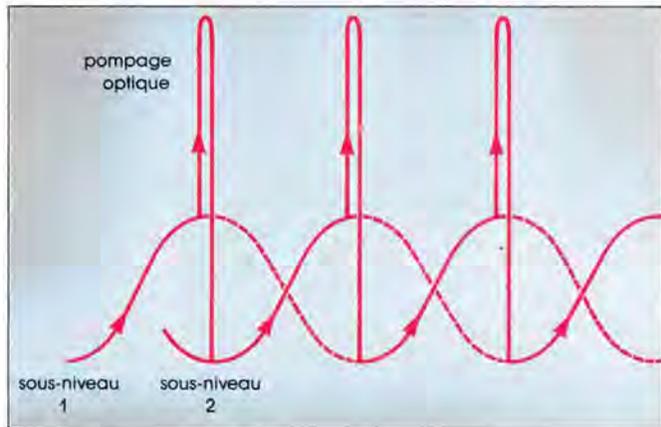
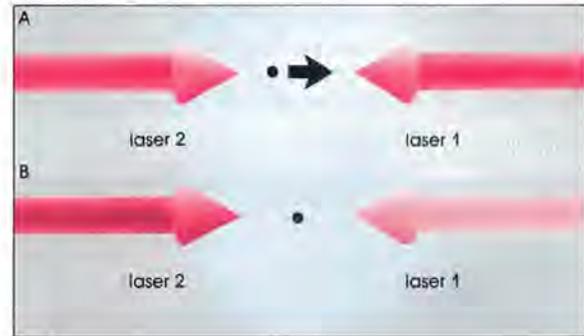


Figure 3. Pour expliquer les températures anormalement basses qu'ils obtenaient par ce qu'ils avaient d'abord cru être du refroidissement Doppler, les chercheurs de l'Ecole normale supérieure et du Collège de France ont trouvé un autre mécanisme, appelé effet Sisyphus. L'onde lumineuse stationnaire constitue pour l'atome une succession de collines et de vallées qu'il doit monter et descendre. La particularité de ce relief d'énergie est qu'il dépend du sous-niveau dans lequel se trouve l'atome ; par exemple, le sous-niveau 1 de la figure a des collines dont les sommets coïncident avec les fonds des vallées du sous-niveau 2. Se trouvant dans le sous-niveau 1, l'atome doit gravir la pente qui se présente à lui. Arrivé au sommet, il a de fortes chances d'absorber un photon du laser au lieu de descendre la pente de l'autre côté. Lorsqu'il réémet un photon de fluorescence, il se retrouve avec une forte probabilité dans le sous-niveau 2, qui présente une vallée à cet endroit. Il ne reste plus à l'atome qu'à remonter la pente jusqu'au sommet suivant. Perdant toujours de l'énergie cinétique, l'atome finit par se trouver bloqué au fond d'une vallée. Le mécanisme de refroidissement Sisyphus permet d'atteindre des températures beaucoup plus basses que le refroidissement Doppler.

taux de fluorescence pouvant atteindre des dizaines de millions de cycles par seconde. La première démonstration de l'action de la lumière sur le mouvement d'atomes libres a consisté à observer la déflexion d'un jet d'atomes par un faisceau lumineux perpendiculaire au jet. Cette expérience fut réalisée par R. Frisch en 1933, en Allemagne, bien avant l'invention des lasers⁽²⁾. Il utilisait un jet d'atomes de sodium, éclairé par une lampe à décharge de sodium également, ce qui lui permettait de satisfaire à la condition de résonance. Ce résultat constitua l'une des toutes premières mises en évidence des échanges de quantité de mouvement entre lumière et atomes prédits par Einstein.

L'expérience de Frisch ne donna lieu à aucun développement dans les quarante années qui suivirent, car l'intensité lumi-

contrôler, de manière très fine, position et vitesse des atomes. Les premiers ralentisseurs à atomes ont été proposés entre 1970 et 1975 par A. Ashkin, des laboratoires Bell, par T. Hänsch et A. Schawlow, à l'université Stanford, et par D. Wineland et H. Dehmelt, à Seattle^(5,6,7). Dans la proposition du groupe de Stanford, qui est la plus aisée à mettre en œuvre pour des atomes neutres, on utilise deux ondes laser identiques, de mêmes puissances et de mêmes fréquences, mais se propageant en sens contraires. Un atome au repos dans cette configuration lumineuse ne ressent pas de force. Il y a en effet un équilibre parfait entre les forces de pression de radiation créées par chacune des ondes lumineuses. En revanche, comme nous allons le voir, un atome en mouvement suivant l'axe de propagation des

bouge par rapport à une onde, on voit la fréquence de cette onde modifiée. Si l'on va à la rencontre de l'onde, la fréquence est augmentée. Au contraire, si l'on se déplace dans le même sens que l'onde, la fréquence apparente est abaissée. Revenons à l'atome placé dans les deux ondes laser de fréquence inférieure à la fréquence de résonance atomique ; si cet atome bouge, la fréquence de l'onde qui vient à sa rencontre lui paraît rapprochée de la résonance. Les photons sont donc plus facilement absorbés ; cette onde engendre alors une pression de radiation augmentée par rapport à celle agissant sur un atome immobile. En revanche, la force créée par l'onde allant dans le même sens que l'atome est diminuée, car la fréquence apparente de cette onde s'éloigne de la résonance. L'équilibre parfait entre les deux forces de pression

de radiation est rompu au profit de la force opposée à la vitesse atomique : c'est l'effet de mélasse optique annoncé. En fait, comme nous le verrons plus loin, ce « refroidissement Doppler » n'est qu'un des nombreux mécanismes qui permettent de freiner des atomes avec de la lumière.

La mélasse optique n'aurait qu'un intérêt limité si elle ne pouvait ralentir un atome que suivant une seule direction dans l'espace. Mais, fort heureusement, le principe se généralise directement à trois dimensions : il faut disposer trois paires de faisceaux laser suivant trois axes

Le piège magnéto-optique

Pour piéger les atomes refroidis par laser, on applique un champ magnétique statique dans la zone de mélasse optique. Ce champ, produit par deux bobines parcourues par des courants de sens opposés, est nul au centre de la mélasse. Son intensité augmente dès que l'on s'écarte de ce point central et, en deux points symétriques par rapport au centre, les champs ont des sens opposés.

Par ailleurs, les polarisations des faisceaux lumineux constituant la mélasse sont choisies circulaires, avec des sens de rotation opposés pour deux ondes se faisant face (fig. 6).

Dans une telle situation, les phénomènes de résonance entre l'atome et la lumière sont gouvernés par l'effet Zeeman : ils dépendent de la polarisation des ondes lumineuses et du champ magnétique à l'endroit où se trouve l'atome. Ainsi, pour les orientations des polarisations et du champ indiquées sur la figure 6, un atome situé à droite du centre est plus en résonance avec l'onde venant de droite qu'avec celle venant de gauche. Il ressent donc une force de pression de radiation résultante qui le ramène vers le centre. Plus généralement, pour la géométrie considérée ici, la force de pression de radiation est en tout point dirigée vers l'intérieur de la mélasse.

orthogonaux, de manière à amortir les vitesses suivant les trois dimensions de l'espace. L'atome est ainsi freiné dans quelque direction qu'il prenne. Ce ralentissement équivaut à un refroidissement de l'ensemble des atomes. En effet, la mélasse calme l'agitation thermique et la température des atomes baisse ; la mélasse les gèle littéralement sur place. La première mélasse optique a été réalisée aux laboratoires Bell en 1985 par A. Ashkin, S. Chu et leur équipe⁽⁸⁾. Les atomes étaient injectés au moyen d'un jet atomique préalablement freiné par un faisceau laser annexe. Ces atomes ralentis arrivaient dans la mélasse avec une vitesse de l'ordre de vingt mètres par seconde, et étaient alors capturés. Les ondes laser utilisées avaient un diamètre de l'ordre du centimètre, et la zone de mélasse ainsi délimitée, correspondant à

l'intersection des trois paires d'ondes, avait un volume de l'ordre du centimètre cube.

Dans un tel dispositif, les atomes sont bien refroidis, mais le sont-ils pour longtemps ? En d'autres termes, combien de temps un atome reste-t-il ainsi englué dans les faisceaux laser ? Dans le cadre de la description qui précède, on pourrait s'attendre à des temps de séjour très longs, puisque la force de friction devrait amener les atomes à une vitesse nulle. En fait, ce repos absolu est impossible car les phénomènes d'absorption et de fluorescence font subir aux atomes une succession ininterrompue de reculs. En d'autres termes, la force décrite plus haut n'est qu'une force moyenne. A cause des photons de fluorescence, réémis au hasard en toutes directions, la force réellement ressentie par un atome fluctue autour de cette valeur moyenne. Cela représente une agitation résiduelle, correspondant à un chauffage des atomes. Les atomes effectuent donc un mouvement brownien erratique dans la mélasse ; ils finissent par s'échapper lorsque leur trajectoire atteint le bord de la mélasse, ce qui se produit au bout de quelques secondes.

Pour allonger le temps de confinement, l'un d'entre nous (J.D.) a suggéré en 1986 de superposer à la mélasse optique un champ magnétique statique (voir l'encadré 1). On montre que ce champ modifie la pression de radiation, qui engendre alors, en plus de la force de friction, une force de rappel tendant à ramener les atomes vers l'intérieur de la mélasse. L'expérience correspondante fut réalisée un an plus tard par une collaboration entre le groupe de D. Pritchard au MIT et celui des laboratoires Bell⁽⁹⁾. On dispose à présent d'un « piège magnéto-optique », qui permet de conserver les atomes ralentis pendant une durée limitée uniquement par les collisions avec les molécules du gaz résiduel de l'enceinte à vide. Des temps de confinement de plusieurs minutes sont alors accessibles.

A la suite de cette première démonstration, de nombreux laboratoires se sont lancés dans la réalisation d'un piège magnéto-optique. La méthode a été notablement simplifiée en 1989 par C. Wieman et son équipe à l'université du Colorado, où un tel piège a fonctionné au milieu d'une cellule en verre remplie, à faible pression, du gaz que l'on cherche à manipuler⁽¹⁰⁾.

Le nombre d'atomes capturés dans un piège magnéto-optique varie de quelques centaines à plus de cent millions. Il résulte de l'équilibre entre les nouveaux atomes sans cesse capturés et les atomes éjectés hors du piège lors de collisions. Le nuage atomique ainsi formé a un diamètre qui varie de 0,1 mm à quelques millimètres. La lumière laser diffusée par

les atomes piégés rend ce nuage clairement visible, à l'œil nu ou grâce à une caméra infrarouge, suivant la longueur d'onde lumineuse utilisée (fig. 1). Quelles espèces atomiques les chercheurs ont-ils piégées ? Le choix est limité aux atomes pour lesquels existe une transition, entre l'état fondamental et un état excité, dont la longueur d'onde correspond à un laser facilement disponible. On a ainsi pu capturer des atomes alcalins, comme le sodium, le rubidium, le césium, ou des atomes alcalino-terreux comme le magnésium ou le calcium. On a également piégé des atomes de gaz rare, notamment l'hélium. Dans ce dernier cas, on ne peut pas utiliser les atomes dans leur état fondamental, car les lasers nécessaires pour manipuler l'atome devraient avoir une longueur d'onde dans l'ultraviolet lointain, hors de portée de la technologie actuelle. Ces atomes sont en fait préalablement portés dans un niveau métastable par une décharge électrique ou par collision avec un faisceau d'électrons. Ce niveau métastable, de très longue durée de vie, joue le rôle de l'état fondamental dans la description qui précède.

LES PIÈGES LUMINEUX PERMETTENT D'ATTEINDRE DES TEMPÉRATURES ENCORE PLUS BASSES QUE CELLES QU'ON ATTENDAIT

Les atomes piégés devraient être à la source d'améliorations spectaculaires en métrologie (horloge à césium) ou en spectroscopie, en particulier sur des atomes « exotiques ». Plusieurs équipes, notamment à Los Alamos, se sont ainsi lancées dans des expériences de piégeage d'atomes dont le noyau est radioactif. On pourrait alors déterminer la structure d'espèces atomiques extrêmement rares produites dans de grands accélérateurs de particules. Le refroidissement et le piégeage laser offrent la possibilité de les accumuler et de les observer pendant de longues durées. Un candidat pour cette « nouvelle spectroscopie » est par exemple le francium, intéressant en raison de son numéro atomique élevé (87) qui en ferait un bon atome test pour les théories unifiées des interactions comme la théorie électrofaible.

Par ailleurs, même avec les espèces atomiques usuelles, un piège lumineux fournit un milieu inhabituel. Les effets collectifs peuvent y prendre un caractère très particulier, en raison de la forte densité, des faibles vitesses et de la présence de lumière laser quasi résonante. L'invention des pièges lumineux a ainsi stimulé l'émergence d'une nouvelle ligne

- (1) A. Einstein, *Phys. Zeit.*, 18, 1917, p. 121 (Traduction française : A. Einstein, *Cœuvres choisies* 1, Quanta, éditions du Seuil-éditions du CNRS, 1989).
- (2) R. Frisch, *Z. Phys.*, 86, 42, 1933.
- (3) R. Schieder et al., *Opt. Commun.*, 5, 337, 1972.
- (4) P. Jacquinet et al., *Opt. Commun.*, 8, 163, 1973.
- (5) A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, 24, 156, 1970.
- (6) T. Hänsch et A. Schawlow, *Opt. Commun.*, 13, 68, 1975.
- (7) D. Wineland et H. Dehmelt, *B.A.P.S.*, 20, 637, 1975.
- (8) S. Chu et al., *Phys. Rev. Lett.*, 55, 48, 1985.
- (9) E. Raab et al., *Phys. Rev. Lett.*, 59, 2631, 1987.
- (10) C. Monroe et al., *Phys. Rev. Lett.*, 65, 1571, 1990.

de recherche : les collisions d'atomes ultra-lents.

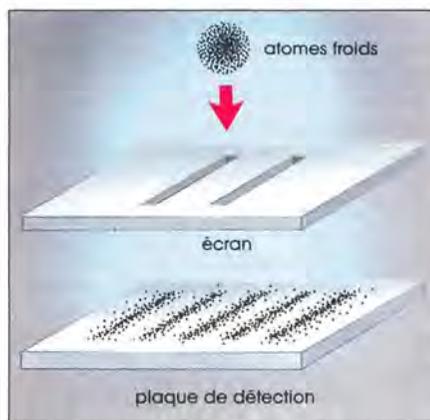
Tout aussi passionnantes sont les perspectives ouvertes sur les très basses températures. Les atomes piégés n'ont plus qu'une vitesse d'agitation très faible, de l'ordre de quelques centimètres par seconde, alors que la vitesse moyenne des atomes à température ambiante est de plusieurs centaines de mètres par seconde. Par conséquent, la température du nuage atomique piégé, qui est propor-

d'expériences. Dès les premières mesures faites en 1986 aux laboratoires Bell, la température limite escomptée avait été atteinte. Intrigués par les performances remarquables obtenues dans une expérience somme toute préliminaire, W. Phillips et son groupe au National Bureau of Standards de Washington reprirent des mesures de manière plus systématique⁽¹²⁾. En 1988, la conclusion s'imposa : les températures effectivement atteintes pouvaient être encore

bien plus basses que la limite théorique du refroidissement Doppler. Dans le cas du sodium par exemple, le résultat expérimental était dix fois meilleur que prévu. C'était la preuve que des mécanismes de refroidissement plus efficaces que le refroidissement Doppler prenaient place dans les mélasses optiques. L'identification de ces nouveaux mécanismes ne se fit pas attendre. Quelques mois après la découverte de l'équipe de Washington, Claude Cohen-Tannoudji et Jean Dalibard au Collège de France et à l'École normale supérieure de Paris, ainsi que Chu et son équipe à l'université Stanford, proposèrent plusieurs nouveaux schémas de refroidissement^(13,14).

Le point commun de ces nouveaux schémas est de prendre en compte un autre effet mécanique de la lumière, indépendant des cycles de fluorescence et complémentaire de la pression de radiation. L'onde lumineuse produit pour l'atome un véritable relief, suite de collines et de vallées qu'il va devoir monter et descendre. L'atome en mouvement se comporte comme une bille sur une tôle ondulée : il ralentit ou accélère suivant qu'il monte ou qu'il descend une colline

Figure 4. Les atomes refroidis par laser ont des propriétés ondulatoires très marquées qui peuvent être mises en évidence, comme pour la lumière, par des expériences d'interférences. L'une d'elle, réalisée en 1992 par des chercheurs de l'université de Tokyo⁽²⁵⁾, consiste à laisser tomber les atomes piégés par une mélasse optique sur un écran percé de deux fentes fines (fentes d'Young) puis à observer les points d'impact des atomes sur une plaque située au-dessous des fentes. Les points d'impact ne se répartissent pas uniformément, mais au contraire se placent suivant des lignes parallèles aux fentes, les zones à fort taux d'impact alternant avec des zones sans impact. Ces franges d'interférence sont analogues à celles que forme une onde lumineuse dans les mêmes conditions.



tionnelle au carré de la vitesse moyenne des atomes, est de quelques microkelvins seulement. On arrive ainsi à une valeur cent millions de fois plus basse que la température ambiante (qui est d'environ 300 kelvins).

La mesure de températures aussi faibles ne peut pas se faire avec les moyens de thermométrie habituels. Elle passe par l'intermédiaire d'une mesure de la vitesse d'agitation des atomes refroidis. Par exemple, on lâche, à un instant donné, ces atomes en coupant subitement les faisceaux laser de mélasse, et on mesure les durées de la chute jusqu'à un détecteur placé quelques centimètres sous le piège. Si la température était rigoureusement nulle, tous les atomes mettraient le même temps pour tomber depuis la mélasse jusqu'au détecteur. Du fait de l'agitation résiduelle, les atomes partent avec des vitesses initiales variables, ce qui entraîne une dispersion des temps de chute. C'est à partir de la dispersion de ces temps de chute que l'on calcule la température.

Les progrès expérimentaux dans la mesure des températures du gaz piégé ont donné lieu à de multiples rebondissements, obligeant les théoriciens du domaine à revoir le modèle du refroidissement Doppler présenté plus haut. Avec ce modèle, les physiciens de Boulder (Colorado, Etats-Unis) D. Wineland et W. Itano avaient montré en 1979 que l'on pouvait espérer atteindre des températures extrêmement basses, de l'ordre de 240 microkelvins pour l'atome de sodium⁽¹¹⁾. Cette perspective avait déclenché à partir de 1985 une série

Figure 5. Dans une fontaine atomique, une mélasse capture les atomes de césium et les refroidit. Une fois les atomes capturés, on change la fréquence des lasers verticaux, ce qui produit une « mélasse en mouvement » vers le haut. Les atomes ainsi propulsés pénètrent alors dans une cavité, siège de champs électromagnétiques qui provoquent une transition entre les deux sous-niveaux d'énergie dits hyperfins des atomes. Ensuite, au cours de leur chute, les atomes passent dans un faisceau laser annexe placé au bas du montage. Ce laser est ajusté de telle sorte que seuls les atomes qui ont effectué une transition entre les deux sous-niveaux hyperfins sont excités vers un niveau plus élevé et produisent ensuite de la fluorescence. La variation rapide du signal de fluorescence avec la fréquence du champ dans la cavité a permis à A. Clairon, C. Salomon et à leur équipe une détermination très précise de la fréquence relative à la transition hyperfine, qui constitue la base de la définition de la seconde.



d'énergie, puisque son énergie mécanique totale, somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle, reste constante (fig. 3). D'où vient ce relief ? Il a pour origine l'énergie potentielle dipolaire, due au couplage entre le champ électromagnétique de l'onde lumineuse et les électrons atomiques. Cette énergie dipolaire, proportionnelle à l'intensité lumineuse, peut s'interpréter comme un déplacement du niveau d'énergie fondamental de l'atome. Son existence a été prédite puis démontrée expérimentalement par J.-P. Barrat et C. Cohen-Tannoudji en 1961⁽¹⁵⁾. Dans le cas des mélasses optiques, en raison des interférences entre les différentes ondes laser, l'énergie dipolaire est modulée dans l'espace avec une périodicité de l'ordre de la longueur d'onde.

Ce qui rend le comportement d'un atome de sodium ou de césium plus subtil que celui d'une bille, c'est que cet atome, dans son état fondamental, possède plusieurs « sous-niveaux ». A chacun de ces sous-niveaux est associée une énergie potentielle différente : le mouvement de l'atome dépend donc du sous-niveau dans lequel il se trouve. Mais un atome

ne reste pas indéfiniment sur le même sous-niveau : il peut sauter d'un sous-niveau vers un autre par un cycle de fluorescence, c'est-à-dire une absorption de photon laser suivie d'une émission spontanée. Cet effet, découvert et étudié par les Français A. Kastler et J. Brossel au début des années 1950, est un pompage optique du sous-niveau de départ vers le sous-niveau d'arrivée.

Le refroidissement à la base des températures ultra-basses observées dans les mélasses optiques tire parti de la combinaison du pompage optique et de la variation spatiale de l'énergie potentielle dipolaire. Un atome en mouvement ralentit quand il gravit une colline de potentiel associée au sous-niveau dans lequel il se trouve. Une fois arrivé au sommet, au lieu d'accélérer dans la descente qui suit, l'atome est pompé vers un autre sous-niveau ayant un creux de potentiel à cet endroit, puis escalade une nouvelle colline, subissant ainsi un nouveau ralentissement. Le refroidissement s'arrête lorsque l'atome n'a plus assez d'énergie pour gravir les collines, et qu'il se trouve ainsi piégé au fond des vallées. Ce nouveau mécanisme de refroidis-

sement, complémentaire du refroidissement Doppler, a été baptisé effet Sisyphos, car l'atome en mouvement dans une mélasse optique est dans la situation de ce héros de la mythologie grecque, condamné pour l'éternité à pousser un rocher vers le sommet d'une montagne, le rocher retombant au fond de la vallée dès qu'il atteint le sommet.

ON PEUT CRÉER DES MÉLASSES OPTIQUES OÙ LES ATOMES VIENNENT SE DISPOSER EN DES SITES RÉGULIÈREMENT ESPACÉS

L'image que l'on a maintenant de la mélasse optique est donc celle d'un réseau ordonné d'atomes répartis au fond des puits de potentiel créés par l'onde laser. Cette image a été confortée par des études théoriques approfondies et par des expériences récentes, menées par Y. Castin, J.-Y. Courtois, G. Grynberg, B. Lounis, C. Salomon et P. Verkerk à l'École normale supérieure, par W. Phillips, C. Westbrook et leur équipe à l'université de Washington et par T. Hänsch et A. Hemmerich au Max Planck Institut de Munich^(16,17,18,19). Ces expériences ont consisté à analyser la lumière absorbée ou émise par les atomes piégés au fond des puits de potentiel (voir « Une matrice de lumière pour ranger des atomes » dans *La Recherche* de juillet-août 1993). Les densités atomiques que l'on sait réaliser aujourd'hui restent faibles, environ un atome par micromètre cube et seule une faible fraction des puits, de l'ordre de 10 %, est occupée. Mais l'un des buts des équipes travaillant dans ce domaine est d'atteindre des situations où plusieurs atomes seraient présents dans le même site du réseau créé par la lumière. Les effets collectifs susceptibles d'apparaître alors fourniraient des renseignements précieux sur les interactions entre les différents atomes.

Très efficace, le refroidissement Sisyphos peut conduire à une agitation résiduelle bien inférieure aux vitesses obtenues par le refroidissement Doppler. Mais il a une limite : l'atome coincé au fond de son puits n'est jamais tout à fait immobile. Il s'agit encore un peu et la vitesse qu'il garde provient des reculs subis en émettant ses derniers photons de fluorescence.

L'effet Sisyphos permet de s'approcher de la limite que constitue le recul subi par un atome absorbant ou émettant un photon. Cette limite, la vitesse de recul, apparaît naturellement dans tout refroidissement laser impliquant des photons de fluorescence, dont la direc-

- (11) D. Wineland et W. Itano, *Phys. Rev. A*, 20, 1521, 1979.
 (12) P. Lett et al., *Phys. Rev. Lett.*, 61, 169, 1988.
 (13) J. Dalibard et C. Cohen-Tannoudji, *JOSA*, B6, 2023, 1989.
 (14) P.J. Ungar et al., *JOSA*, B6, 2058, 1989.
 (15) J.P. Barrat et C. Cohen-Tannoudji, *J. Phys. Rad.*, 22, 329 et 443, 1961.
 (16) Y. Castin et J. Dalibard, *Europhys. Lett.*, 14, 761, 1991.
 (17) P. Verkerk et al., *Phys. Rev. Lett.*, 68, 3864, 1992.
 (18) P. Jessen et al., *Phys. Rev. Lett.*, 69, 48, 1992.
 (19) A. Hemmerich et T. W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.*, 70, 410, 1992.
 (20) A. Aspect et al., *Phys. Rev. Lett.*, 61, 826, 1988.
 (21) M. Kasevich et S. Chu, *Phys. Rev. Lett.*, 69, 1741, 1992.
 (22) A. Clairon et al., *Europhys. Lett.*, 16, 165, 1991.
 (23) B. Lounis et al., *C.R. Acad. Sci. Paris*, 316, II, 739, 1993.
 (24) M.A. Kasevich et al., *Opt. Letters*, 15, 607, 1990.
 (25) F. Shimizu et al., *Phys. Rev. A*, 46, 1917, 1992.
 (26) H. Wallis et al., *Appl. Phys. B*, 54, 407, 1992.

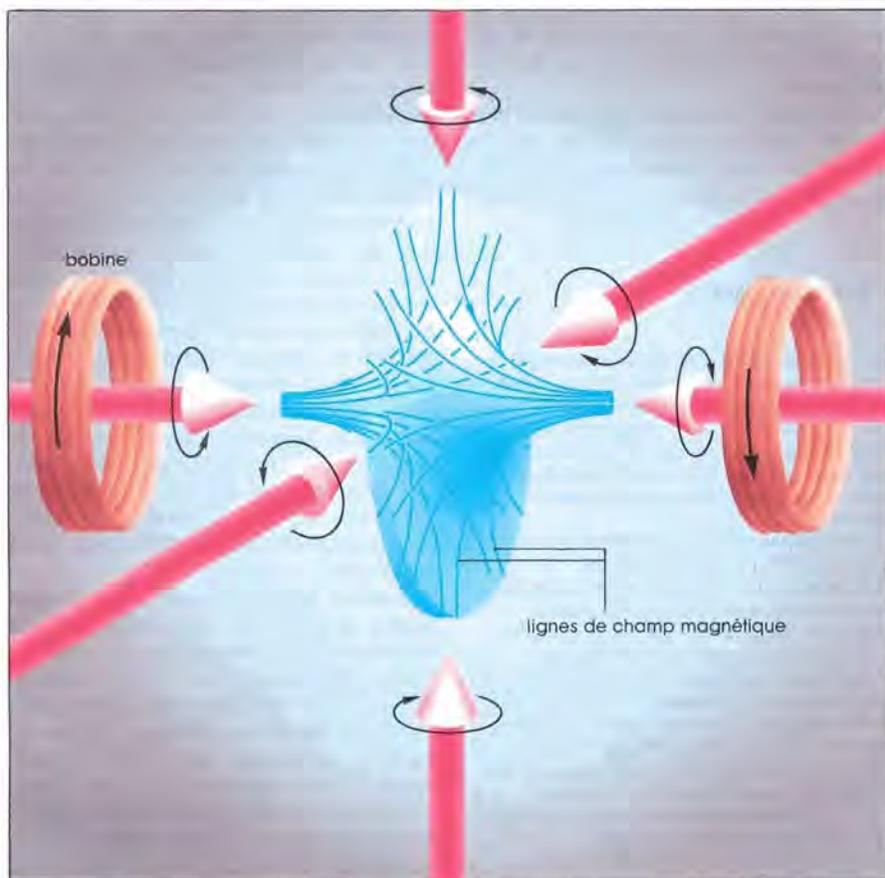


Figure 6. En ajoutant un champ magnétique à des ondes laser, on peut non seulement refroidir les atomes, mais les piéger. Ce piège magnéto-optique est constitué de trois paires de faisceaux laser se propageant en sens opposés suivant les trois directions de l'espace, avec des polarisations circulaires, et de deux bobines parcourues par des courants électriques de sens opposés qui produisent le champ magnétique. Dans ces conditions, on montre qu'à la force de friction qui ralentit les atomes, s'ajoute une force de rappel qui les ramène vers le centre du piège.

tion et l'instant d'émission sont aléatoires et incontrôlables.

La généralité de l'argument pourrait laisser croire que cette limite est infranchissable. Mais, comme l'a montré l'équipe de l'Ecole normale supérieure en utilisant un concept radicalement différent, on peut la contourner⁽²⁰⁾. Dans cette méthode, le « piègeage cohérent de population sélectif en vitesse » mis au point en 1988 par E. Arimondo, A. Aspect, C. Cohen-Tannoudji, R. Kaiser et N. Vansteenkiste, on ne cherche pas à contrôler la vitesse des atomes en la réduisant par un mécanisme de friction. On laisse cette vitesse évoluer aléatoirement du fait des absorptions et des émissions de photons, mais on choisit une transition atomique et une configuration de faisceaux laser telles qu'un atome cesse d'interagir avec la lumière dès que sa vitesse s'annule : il n'absorbe ni n'émet plus aucun photon et reste donc immobile. Dans ces conditions, la fraction d'atomes au voisinage de la vitesse nulle augmente petit à petit, alimentée par les atomes ayant atteint par chance la vitesse zéro au cours de leur évolution aléatoire. L'expérience de Paris de 1988, réalisée avec des atomes d'hélium, a permis de démontrer la validité de ce principe, puisque la vitesse d'agitation atomique a effectivement été réduite au-dessous de la vitesse de recul. Depuis, une méthode fondée sur un principe voisin a été démontrée par L. Chu et M. Kasevich⁽²¹⁾. En fait, ces deux expériences n'ont porté que sur une seule direction de la vitesse,

les deux autres composantes n'étant pas refroidies. Très récemment, chacune des deux équipes a généralisé sa méthode à deux dimensions, et des résultats très encourageants ont été obtenus, d'une part à Stanford, d'autre part à Paris par A. Aspect, F. Bardou, C. Cohen-Tannoudji, J. Lawall, B. Saubamea et K. Shimizu.

Disposant d'un nouveau processus de refroidissement, il faut se poser encore une fois la question de sa température limite. En fait, les analyses théoriques semblent indiquer qu'il est possible dans cette configuration d'obtenir une température aussi basse que l'on veut : la température tend vers zéro quand le temps d'interaction entre les atomes et le laser augmente indéfiniment. En pratique, les difficultés sont considérables, car il faut de mieux en mieux éliminer les inévitables imperfections expérimentales. Mais les perspectives ouvertes sont fascinantes puisque le caractère quantique des atomes joue un rôle de plus en plus important quand la température diminue. On ne peut alors plus considérer ces atomes comme des points matériels classiques ; il faut prendre en compte leur nature ondulatoire, caractérisée par une longueur d'onde de De Broglie de plus en plus grande. Déjà, pour des atomes refroidis à la limite du recul, elle atteint le micromètre, ce qui est dix mille fois plus grand que la taille d'un atome.

Ce caractère quantique apparaît en particulier lorsque l'onde de De Broglie décrivant le mouvement atomique a une dimension supérieure à la taille des obs-

tacles rencontrés. Ainsi, lorsqu'une onde de matière très étendue transversalement tombe sur un écran percé de deux fentes, on est dans une situation où l'atome « passe par les deux ouvertures à la fois » : des franges d'interférence peuvent alors apparaître (fig. 4). C'est en 1991 qu'ont été réalisées les premières expériences d'interférométrie atomique. Elles ont montré que le phénomène d'interférence, bien connu pour des particules élémentaires comme des photons ou des électrons, existe toujours pour des objets aussi complexes que des atomes ; il s'agit sans doute des plus gros objets ayant jamais interféré (voir « L'optique atomique » dans *La Recherche* d'octobre 1992).

LES ATOMES LENTS SERVIRONT À RÉALISER DES HORLOGES ATOMIQUES PRÈS DE CENT FOIS PLUS PRÉCISES

Disposer d'atomes lents, c'est aussi avoir la possibilité de les observer longtemps. On peut alors mesurer avec une précision accrue les fréquences de transition atomiques. Nous avons ici la clef d'une amélioration des horloges atomiques, qui constituent la référence actuelle de temps. Rappelons qu'après avoir défini l'unité de temps à partir de grandeurs astronomiques, on utilise maintenant des oscillateurs atomiques comme référence absolue. On relie par convention la seconde à la période d'une onde électromagnétique juste résonante avec une transition atomique donnée, qui constitue un étalon immuable.

Depuis 1967, l'étalon choisi est une transition dite hyperfine entre les deux niveaux les plus bas de l'atome de césium, et la seconde est définie comme étant 9 192 631 770 fois la période de l'onde électromagnétique résonante avec cette transition.

Comment fonctionne une horloge atomique en pratique ? On prépare un jet d'atomes de césium dans un des deux niveaux intervenant dans la définition de 1967. On fait interagir ces atomes avec une onde électromagnétique, et l'on regarde si les atomes ont subi une transition vers l'autre niveau. On ajuste alors la fréquence de l'onde de manière à maximiser le nombre d'atomes ayant subi la transition désirée, et on peut enfin, en comptant électroniquement les périodes de cette onde, construire une horloge fournissant un top toutes les secondes.

Toutes choses égales par ailleurs, une horloge atomique est d'autant plus précise qu'on se donne plus de temps pour faire interagir l'atome avec l'onde élec-

Les miroirs et les cavités atomiques

Le contrôle du mouvement des atomes par laser permet de réaliser des cavités atomiques. La plus simple de ces cavités comporte un seul miroir à atomes, concave et tourné vers le haut. Les atomes, lâchés sans vitesse initiale au-dessus du miroir, tombent et rebondissent comme un sauteur sur un trampoline.

On dispose ainsi d'une boîte qui permet, dans un volume restreint, de conserver longtemps des atomes qui ne sont perturbés que pendant le rebond, c'est-à-dire durant une fraction très faible du temps de séjour. Outre les intérêts métrologiques que présentent ces longs temps de stockage, les physiciens voient dans de telles cavités la possibilité d'obtenir des modes d'ondes de De Broglie atomiques : tout comme des photons rebondissant entre deux miroirs ne sont piégés que pour des longueurs d'onde particulières, un atome dans un état stationnaire de cette cavité a une énergie bien déterminée ; il est alors dans un mode de la cavité. On pourrait ainsi espérer retrouver, avec ces cavités à ondes de matière, la puissance des méthodes développées autour des cavités résonantes en optique.

Le miroir à atomes utilise la force exercée par une onde lumineuse sur un atome. Il est formé par une fine couche de lumière se propageant à la surface d'un prisme de verre. Cette couche de lumière est une onde évanescente obtenue

par réflexion totale d'un faisceau laser sur la face interne du prisme. L'énergie potentielle dipolaire, qui résulte du couplage entre l'atome et l'onde évanescente, tend à repousser l'atome hors de la lumière. Si les atomes ne sont pas lâchés de trop haut, ils font demi-tour dans la nappe lumineuse sans toucher le prisme (fig. 7).

Un trampoline atomique a d'abord été réalisé à Stanford⁽²⁴⁾, puis au NIST-NBS de Washington. Dans ces deux expériences, les pertes étaient telles que tous les atomes avaient fui de la cavité après deux rebonds. Très récemment, cette expérience a été notablement améliorée à l'Ecole normale supérieure par C. Aminoff, P. Bouyer, P. Desbiolles et A. Steane : ayant réalisé un miroir de 70% de réflectivité, ils ont pu observer des atomes de césium subissant une dizaine de rebonds avant de s'échapper. Ce type d'expérience est donc un premier pas vers une cavité résonante à ondes de De Broglie. La réalisation de miroirs à atomes efficaces peut aussi déboucher sur des applications importantes, fondées sur la possibilité d'obtenir une focalisation poussée de faisceaux d'atomes. On pourrait ainsi développer de nouvelles microscopies ou des procédés de microlithographie à une très petite échelle.

tromagnétique. On est ainsi passé d'une situation où la zone d'interaction, mesurant quelques centimètres, était traversée en 0,1 milliseconde par les atomes, à une géométrie à deux zones, inventée en 1949 par le physicien américain N. Ramsey. Avec cette technique, qui lui a valu le prix Nobel en 1989, Ramsey a montré que la durée d'interaction à prendre en compte est le temps de parcours entre les deux zones, qui peut atteindre plusieurs dizaines de millisecondes pour un écartement de quelques

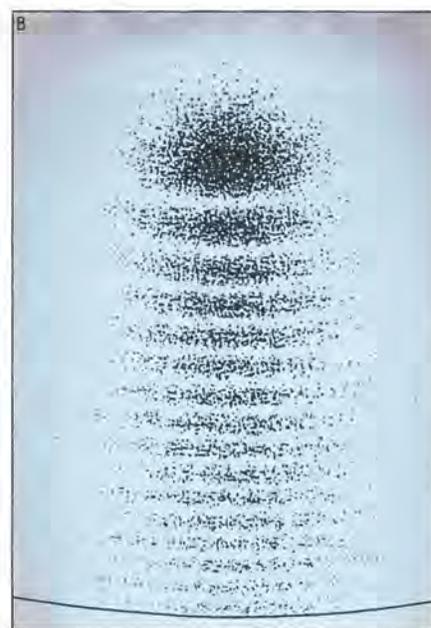
Orsay, travaillent maintenant à la réalisation pratique d'une véritable horloge de ce type⁽²²⁾, tirant pleinement parti du gain apporté par le refroidissement laser, et qui pourrait atteindre une précision de 10^{-16} .

Une limitation ultime de ces horloges à atomes froids est la pesanteur : si l'on garde des hauteurs de fontaine raisonnables, de l'ordre du mètre, les temps d'interaction ne peuvent pas dépasser une seconde. En gravité zéro au contraire, il n'y a pas de limite à ce temps.

ventée par Ashkin au début des années 1980, consistant à capturer des bactéries au foyer d'un faisceau laser et à les manipuler sans les détruire sous l'objectif d'un microscope. Enfin, la micropince laser pourrait apporter une solution à un problème fondamental dans la quête de l'antimatière. On sait depuis longtemps produire des anti-protons et des anti-électrons (ou positrons), c'est-à-dire les constituants de base d'un atome d'anti-hydrogène. On espère prochainement fabriquer de tels atomes en petite quan-



Figure 7. Les atomes froids, lâchés au-dessus d'un prisme « recouvert » d'une mince couche de lumière (produite par une onde évanescente) rebondissent sans se coller sur le verre, car ils font demi-tour dans la nappe lumineuse (A). Avec ce « trampoline » à atomes, les chercheurs ont observé jusqu'à une dizaine de rebonds successifs. L'étape suivante consiste à obtenir des interférences entre ces rebonds : on aura ainsi réalisé une cavité à ondes atomiques, analogue aux cavités Fabry-Pérot de l'optique. On pourra alors chercher à préparer les atomes dans un mode stationnaire de l'onde de De Broglie, mode qui présente une succession de minima et de maxima de la densité de probabilité de présence. Une telle configuration, calculée en 1992 par H. Wallis, J. Dalibard et C. Cohen-Tannoudji⁽²⁶⁾, est représentée en B.



mètres. Les performances de ces horloges sont remarquables. Avec une précision relative meilleure que 10^{-13} , ces horloges auraient dérivé de moins de un dixième de seconde depuis l'homme de Néanderthal. Néanmoins, il existe un besoin important d'horloges encore plus précises, aussi bien pour la physique fondamentale que pour la physique appliquée, par exemple la navigation assistée par satellite.

Grâce à la réalisation de fontaines atomiques, les atomes refroidis par laser offrent une réponse simple à cette demande (voir « Une fontaine atomique » dans *La Recherche* de février 1990). Un nuage d'atomes de césium froids, lancé vers le haut par un laser annexe, interagit une première fois avec l'onde électromagnétique, fait demi-tour sous l'effet de la gravité, puis interagit une seconde fois avec l'onde (fig. 5). Le temps total d'interaction à prendre en compte, pour une fontaine haute d'un mètre, est de l'ordre de la seconde, cent fois plus long que dans les horloges traditionnelles ! De nombreux laboratoires de métrologie, en France le laboratoire primaire des temps et fréquences à l'Observatoire de Paris et le laboratoire de l'horloge atomique à

Refroidir des atomes en microgravité devient donc un enjeu important, et une collaboration entre l'équipe de l'École normale supérieure et le Centre national d'études spatiales a d'ores et déjà permis d'obtenir en 1992 des résultats importants : dans une série de vols paraboliques en Caravelle, offrant chacun une vingtaine de secondes en gravité réduite, B. Lounis, J. Reichel et C. Salomon ont pu refroidir des atomes par laser, et ils ont montré que ces atomes restent alors observables beaucoup plus longtemps que sur Terre⁽²³⁾. Ces expériences sont les premiers pas vers une horloge à atomes froids en satellite, potentiellement plus précise qu'une horloge terrestre.

Les différents exemples que nous avons abordés illustrent bien la variété des thèmes liés à la manipulation d'atomes par laser (voir aussi l'encadré 2). Le laser joue ici le double rôle d'un réfrigérateur et d'une micropince, utilisations que l'on retrouve dans d'autres branches de la physique et de la biologie. On sait, par exemple, refroidir et observer des ions uniques dans des pièges électromagnétiques (voir « Les pièges ioniques » dans *La Recherche* d'octobre 1989). On utilise également couramment la méthode in-

tité mais, pour les étudier, se pose le problème de les conserver. Des parois matérielles provoqueront inévitablement l'annihilation de cette antimatière au premier contact, alors que des faisceaux laser, en association avec des champs magnétiques, constitueront une boîte immatérielle, dans laquelle l'anti-hydrogène pourra s'accumuler en toute sécurité. Le refroidissement et le piégeage par laser, sujets fertiles en découvertes pendant les dix dernières années, devraient être à l'origine de nouveaux développements, tout aussi passionnants, tant du côté fondamental, avec l'accès à des températures ultra-basses où pourrait se produire une condensation d'un type spécifiquement quantique, la condensation de Bose, que du côté appliqué avec la réalisation, dans l'espace, d'horloges atomiques d'une précision jamais atteinte. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- J. Dalibard et al. (eds), *Systèmes fondamentaux en optique quantique*, Ecole d'été 1990, Les Houches, North-Holland, 1992.
- E. Arimondo et al. (eds), *Laser manipulation of atoms and ions*, session CXVIII de l'École Enrico Fermi 1991, North-Holland, 1992.