

D es canaux de lumière pour les atomes

Dans son *Traité physique et historique de l'Aurore Boréale*, de Mairan écrivait en 1731: « Les voyageurs assurent que le Danube est beaucoup moins rapide le matin, lorsque les rayons du Soleil s'opposent à son cours, qu'il ne l'est l'après-midi, lorsqu'ils aident ce cours ». Peut-être moins poètes mais plus réalistes, les physiciens d'aujourd'hui savent agir avec la lumière laser, non pas sur les gouttes d'eau d'un fleuve, mais sur les atomes d'un jet atomique. Ils arrivent ainsi à les ralentir, les arrêter et les piéger. Une expérience que nous avons réalisée récemment au laboratoire de physique de l'École normale supérieure (ENS)⁽¹⁾ a montré qu'il était possible de confiner de la sorte des atomes neutres sur une distance inférieure au micron, autrement dit à l'échelle de la longueur d'onde λ du faisceau lumineux. Plus précisément, nous avons réussi à canaliser des atomes dans des guides lumineux plans espacés de $\lambda/2$, soit ici 0,4 micron. L'originalité de cette expérience réside dans la très faible taille de ces canaux: les quelques pièges lumineux réalisés précédemment (voir « Un piège de lumière pour les atomes » dans notre numéro de septembre 1986) avaient des dimensions caractéristiques au moins cent fois supérieures. En diminuant la taille des pièges, on espère observer des effets quantiques masqués jusqu'à ce jour, par exemple la quantification des énergies de vibration des atomes dans le piège. D'un point de vue plus appliqué, cette expérience de canalisation d'atomes constitue un premier pas vers la réalisation de jets atomiques bien localisés, élé-

ments de base d'un futur « microscope atomique ». Un tel microscope utiliserait un faisceau atomique extrêmement fin pour sonder les propriétés locales de la surface d'un échantillon.

La méthode employée pour canaliser les atomes repose sur la force qu'exerce un faisceau lumineux non homogène sur un atome. En effet, la lumière peut modifier la dynamique des électrons à l'intérieur des atomes, notamment en y induisant un dipôle électrique oscillant, d'autant plus important que l'intensité lumineuse est plus grande. Si le faisceau lumineux n'est pas homogène dans l'espace, ce dipôle subit une force dite dipolaire, analogue à celle qui s'exerce sur un barreau aimanté dans un champ magnétique inhomogène: suivant son orientation, le barreau est attiré vers les maxima ou les minima du champ magnétique. De même, suivant la fréquence lumineuse, l'atome est attiré vers les régions où l'intensité lumineuse est maximale ou minimale.

Les atomes sont canalisés dans les nœuds de l'onde stationnaire.

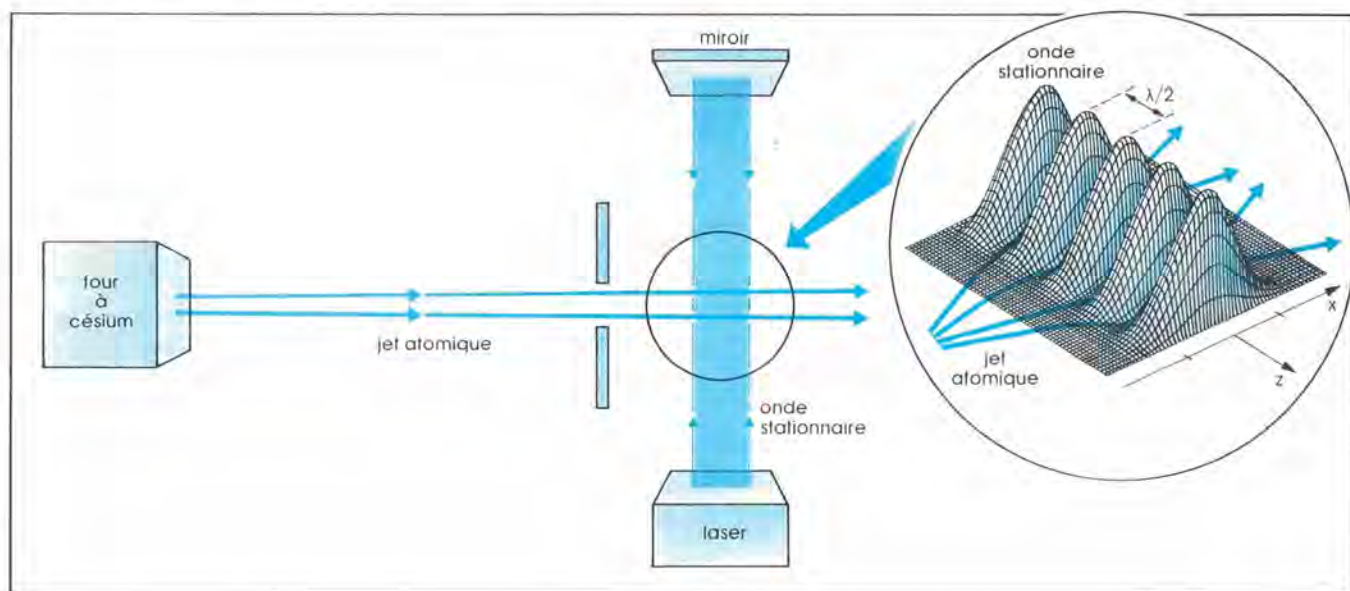
Dans notre expérience (fig. 1), nous avons obtenu une forte variation spatiale de l'intensité lumineuse sur une distance de $\lambda/4$, en renvoyant sur elle-même une onde laser progressive; on obtient alors une onde stationnaire, avec une série de plans où l'intensité lumineuse est nulle (nœuds), séparés par des plans où cette intensité est maximale (ventres). La fré-

quence du laser est ajustée de telle façon que les atomes soient attirés vers les nœuds et expulsés des ventres. L'énergie potentielle des atomes possède alors une structure périodique, du type tôle ondulée, avec des vallées parallèles séparées par des collines. Quand on envoie un jet atomique dans cette onde stationnaire, parallèlement aux plans d'égale intensité lumineuse, les atomes sont guidés vers « le fond des vallées », autrement dit vers les plans où résident les nœuds.

Nous espérons donc montrer avec cette expérience que le jet atomique est canalisé en feuillets séparés de $\lambda/2$, mais comment observer une canalisation aussi fine? Inutile d'espérer voir au microscope des lignes brillantes espacées de $\lambda/2$, car les lois de l'optique assignent à la résolution d'un tel instrument une limite de l'ordre de la longueur d'onde λ utilisée. Il était donc exclu de discerner directement ces feuillets et *a fortiori* d'évaluer leur épaisseur.

Nous avons contourné cette difficulté en utilisant les atomes eux-mêmes comme sonde, via leurs propriétés spectroscopiques. En effet, un atome situé aux nœuds de l'onde stationnaire a le même spectre qu'un atome dans l'espace libre, alors que le spectre d'un atome placé aux ventres de l'onde stationnaire est considérablement modifié par l'onde laser. Précisons que les spectres du jet d'atomes sont obtenus en leur faisant absorber un deuxième faisceau laser.

Grâce à cette technique, nous sommes parvenus à reconstruire la répartition spatiale des atomes dans l'onde stationnaire



(1) C. Salomon et al., Phys. Rev. Lett., 59, 1659, 1987.

Figure 1. Au cours de l'expérience décrite dans cette figure, nous avons réussi à confiner un jet d'atomes de césium sur une distance inférieure au micron, en le canalisant dans des guides lumineux espacés d'une demi-longueur d'onde. Pour cela, on commence par produire un jet de césium dans une enceinte à vide. En pénétrant dans l'onde stationnaire, les atomes sont soumis à un potentiel périodique qui est maximal aux ventres de l'onde et minimal aux nœuds. Ils sont alors canalisés au fond des vallées correspondant aux nœuds, vallées qui sont espacées d'une demi-longueur d'onde, soit 0,4 micron. Cette expérience constitue un premier pas vers la réalisation d'un « microscope atomique » qui utiliserait des faisceaux atomiques extrêmement fins pour sonder les propriétés locales d'un échantillon.

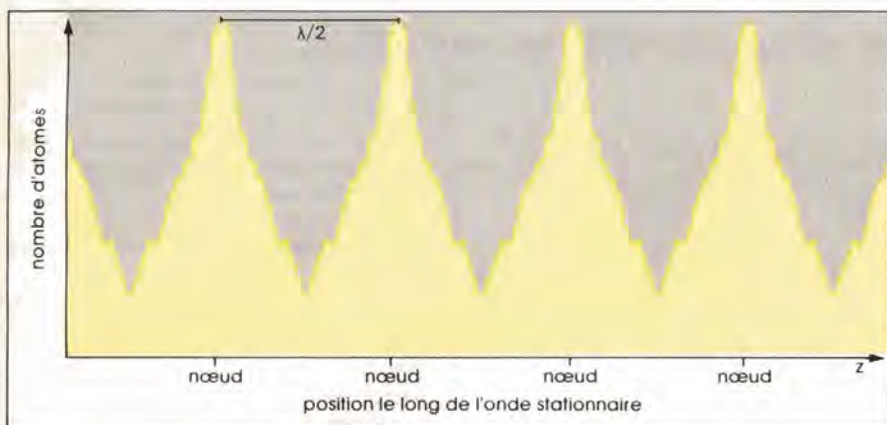


Figure 2. Comment se répartissent les atomes dans l'onde stationnaire? Dans cette figure, on a représenté la densité atomique, mesurée au centre de l'onde, en fonction de la position z le long de l'onde. On constate que les atomes s'accablent au voisinage des plans correspondant aux nœuds.

(fig. 2). Nous avons ainsi vérifié qu'elle est fortement modulée: la densité atomique est cinq fois supérieure aux nœuds qu'aux ventres.

Un confinement par laser sur une dimension très inférieure au micron est donc possible. Quelle est donc la taille ultime qu'on pourrait obtenir par focalisation lumineuse d'un jet atomique? Cette question est importante puisque la réponse conditionne la réalisation du microscope atomique décrit en introduction. Actuellement, cette réponse n'est pas entièrement connue, mais une proposition très récente de deux physiciens soviétiques⁽²⁾ prévoit une extension inférieure à un nanomètre pour un jet ainsi focalisé (1 nanomètre = 1 milliardième de mètre). On serait alors très près d'une limite fondamentale, à savoir la taille des atomes eux-mêmes (0,1 nanomètre): on ne risque pas de ranger des objets dans des tiroirs plus petits qu'eux!

Vers un piégeage à trois dimensions.

L'expérience réalisée à l'ENS pourrait se généraliser de façon naturelle au piégeage des atomes selon les trois dimensions de l'espace. Il faudra pour cela disposer trois ondes stationnaires suivant trois directions orthogonales; les atomes devraient alors s'accumuler aux nœuds de ce système, dans un réseau périodique cubique de sites pièges espacés de $\lambda/2$.

Les études préliminaires sur ce système nouveau, un peu analogue à un cristal, soulèvent plusieurs questions intéressantes. Pourra-t-on mettre plus d'un atome par site? Si oui, ces atomes réagiront-ils pour former une molécule ou même un agrégat de plusieurs atomes? Cette molécule ou cet agrégat, qui n'ont *a priori* aucune transition résonante avec le laser, ne seraient alors plus soumis à aucune force lumineuse et s'échapperaient hors du piège. En fait, ce type de problème, lié aux fuites « par recombinaison », est actuellement essentiel pour

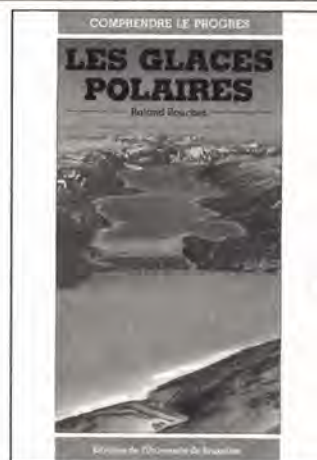
toute la physique des atomes piégés. Ces fuites limitent en effet la densité maximale réalisable dans un piège; elles conditionnent ainsi l'observation d'effets quantiques collectifs, recherchés activement par de nombreux groupes dans le monde. Ces effets collectifs, qui requièrent des densités atomiques élevées, pourraient par exemple se manifester par l'existence de deux comportements différents des atomes piégés, suivant que le spin de ces atomes est entier (boson) ou demi-entier (fermion). Les bosons devraient pouvoir s'accumuler sans limite dans les pièges, alors que les fermions ne pourraient être disposés qu'en nombre limité.

À une échéance plus proche, ce piège à trois dimensions pourrait permettre de mettre en évidence la quantification de l'énergie de vibration des atomes dans chacun des sites piégeants. Bien que cette quantification existe toujours, elle n'était pas observable dans les pièges lumineux réalisés à ce jour qui avaient tous des dimensions beaucoup plus grandes qu'une longueur d'onde optique. Dans ce cas, les niveaux d'énergie quantifiés sont tellement serrés que toutes les valeurs d'énergie semblent accessibles: on ne peut alors tester que la limite classique de la mécanique quantique. Au contraire, si le mouvement des atomes était confiné dans des dimensions sub-microniques, la relation d'incertitude de Heisenberg imposerait aux atomes une grande vitesse, donc une grande énergie cinétique. Les niveaux d'énergie seraient alors bien séparés et la quantification du mouvement atomique par la lumière pourrait être mise en évidence.

On le voit, ces recherches nous amènent peut-être à observer des effets quantiques associés à l'atome considéré alors comme une « grosse particule ». Nul doute que la tâche sera ardue, mais les résultats devraient être à la mesure des difficultés.

Alain Aspect, Jean Dalibard, et Christophe Salomon

EDITIONS
DE L'UNIVERSITÉ
DE BRUXELLES



Roland Souchez, *Les glaces polaires*
■ 1988, 156 pages, 32 figures.
35 photos couleur hors texte, 795 FB
ISBN 2-8004-0939-8

En 1912, le célèbre explorateur anglais Robert F. Scott périt dans les glaces au retour d'une expédition en traîneau vers le Pôle Sud par des températures de -30°C à -40°C . Aujourd'hui, les missions scientifiques disposent de moyens logistiques importants et les progrès techniques réalisés ces dernières décennies, la mise au point de méthodes de datation et d'analyse de glaces vieilles de dizaines de milliers d'années ont ouvert à la recherche des voies insoupçonnées d'un Nansen ou d'un Scott. Ce livre n'a d'autre but que de les explorer.

En bonne méthode, Roland Souchez commence par repérer les lieux de son enquête et explique les mécanismes de formation de la glace polaire. Muni de ce bagage, le lecteur est invité à remonter le temps et à scruter les traces laissées dans les paysages et les sédiments par des inlandis aujourd'hui disparus. Il déchiffrera ensuite, dans des « archives » glaciaires très anciennes, les variations de paramètres-clés de notre environnement et le paléoclimat des régions polaires. Avant de s'interroger sur les enjeux du développement économique de ces régions à l'échelle mondiale.

Roland Souchez est professeur à l'Université libre de Bruxelles. Il a enseigné aux États-Unis, au Canada et à Paris et a participé à plusieurs missions internationales en Antarctique, dans l'Arctique canadien et au Groenland. Il développe actuellement un programme de recherches avec le Centre d'Études Nucléaires de Saclay (France).

Dans la même collection

L'Univers du sommeil,
Myriam Kerkhofs et Julien
Mendlewicz, (coédition Maloine)
128 pages, 20 illustrations, 495 FB

Editions de l'Université de Bruxelles
avenue Paul Héger, 26, 1050 Bruxelles
Belgique
Tél. 642 37 99, Tél. 23069 unilbr Brux
Fax 642 35 95

(2) V.I.
Balykin
et V.S.
Letokhov,
*Opt.
Commun.*,
64, 151, 1987.