

En soumettant un gaz enfermé dans une enceinte à un faisceau de lasers convenablement disposés, on peut contrôler l'agitation désordonnée de ses atomes, diminuer leur vitesse et donc leur température. Ce domaine de recherche, très jeune et très dynamique, rend notamment possible la création de nouveaux états de la matière.

PAR CLAUDE COHEN-TANNOUJ

Des tomes tout près du zéro absolu

En faisant interagir des atomes avec des faisceaux lumineux convenablement choisis, on peut agir sur ces atomes, les manipuler, contrôler leurs divers degrés de liberté. Par exemple, le « pompage optique », inventé et étudié par A. Kastler et J. Brosnel en 1950, permet de polariser une collection d'atomes, c'est-à-dire de faire en sorte que tous leurs moments magnétiques pointent dans la même direction. Pour y parvenir, on fait interagir ces atomes avec de la lumière résonante polarisée. La polarisation des « photons », les grains d'énergie du faisceau lumineux, est en quelque sorte transférée aux atomes au cours de l'interaction. Plus récemment, un nouveau domaine de recherche connaît un développement spectaculaire : le refroidissement laser des atomes. Il s'agit des échanges de quantité de mouvement entre atomes et photons, qui permettent de contrôler le mouvement des atomes et de réduire leur vitesse d'agitation désordonnée, donc de diminuer leur température. Quelles sont les avancées importantes dans ce domaine de recherche ? Quelles retombées peut-on en escompter ? Quelles nouvelles perspectives permet-il d'ouvrir ? Voici quelques-unes des questions que nous nous proposons d'aborder très brièvement dans cet article.

MÉLASSES OPTIQUES ET PIÈGES POUR ATOMES ULTRAFROIDS

Le phénomène élémentaire à la base des forces exercées par un faisceau laser sur un atome est le recul communiqué à cet atome par l'absorption ou l'émission d'un photon. Recul tout à fait analogue à celui que subit un canon lorsqu'il tire un obus. Ce phénomène avait été étudié par Albert Einstein dès 1917. Suivant l'atome étudié, la vitesse de recul correspondante est de l'ordre du millimètre ou du mètre par seconde, soit des valeurs très faibles devant les vitesses d'agitation thermique des atomes à la température ambiante qui atteignent plusieurs centaines de mètres

par seconde. On pourrait donc, à première vue, croire que le mouvement des atomes est très peu perturbé par l'effet de recul. En fait, un atome placé dans un faisceau laser résonant ne cesse d'absorber et de réémettre des photons à une cadence très élevée, pouvant atteindre des valeurs de l'ordre de cent millions de cycles par seconde. Chaque cycle absorption-émission ne change que très faiblement sa vitesse, mais leur répétition à une telle cadence peut communiquer à l'atome des accélérations (ou décélérations) considérables, autour de cent mille fois l'accélération de la pesanteur. Les forces radiatives correspondantes peuvent donc être utilisées pour défléchir, ralentir, et même arrêter les atomes d'un jet atomique.

Des schémas ont été également proposés, notamment par T. Hänsch et A. Schawlow à Stanford, pour obtenir au moyen de faisceaux laser des forces de friction susceptibles d'amortir la vitesse d'un atome, et ainsi de le refroidir. L'idée consiste à utiliser l'effet Doppler : il change la fréquence apparente d'une onde laser pour un atome en mouvement par rapport à cette onde, d'où le nom de refroidissement Doppler donné à ces méthodes. L'atome est soumis aux forces de pression de radiation exercées par plusieurs ondes laser de même fréquence, laquelle se trouve légèrement désaccordée par rapport à la résonance. On choisit la configuration de faisceaux laser telle que la force totale ressentie par un atome immobile soit nulle. Dès que l'atome se met en mouvement, les fréquences des diverses ondes laser lui apparaissent décalées par effet Doppler. Certaines ondes se rapprochent de la résonance et exercent sur lui une force plus grande que d'autres qui s'éloignent de la résonance. La force totale ressentie par l'atome n'est alors plus nulle et on peut s'arranger pour qu'elle devienne opposée à sa vitesse. Tout se passe donc comme si l'atome se déplaçait dans un milieu visqueux qui amortit son mouvement et l'engue. C'est là l'origine de la dénomination de « mélasse optique » donnée à de tels systèmes

par l'équipe de A. Ashkin et S. Chu, qui les observèrent pour la première fois en 1985, dans les laboratoires Bell.

La force de friction que nous venons de décrire ne peut amener les atomes à une vitesse rigoureusement nulle car cette force fluctue autour d'une valeur moyenne. Ce caractère aléatoire des forces radiatives provient des fluctuations nécessairement présentes dans les échanges de quantité de mouvement entre atomes et photons. Par exemple, après avoir absorbé un photon laser qui se propage dans une direction bien définie et qui lui communique donc un recul dans la même direction, l'atome peut réémettre spontanément un photon dans une direc-

tion aléatoire. Celle-ci varie d'un cycle à l'autre. Dans une mélasse optique, les atomes effectuent donc un mouvement erratique, qui rappelle tout à fait le mouvement brownien d'une grosse particule immergée dans un fluide et subissant en permanence des collisions avec les molécules de ce fluide. La théorie d'un tel phénomène peut être établie : elle prédit que la température d'équilibre à laquelle parvien-

nent les atomes dans la mélasse doit être nécessairement supérieure à une certaine limite, appelée limite Doppler, dont l'ordre de grandeur est de quelques dix millièmes de degré Kelvin. Il s'agit là de températures très basses, se situant autour d'un million de fois en dessous des températures ambiantes, de l'ordre de 300 degrés Kelvin. Mais nous verrons plus loin que d'autres mécanismes de refroidissement, beaucoup plus efficaces que le refroidissement Doppler, sont en œuvre dans les mélasses optiques et permettent de descendre à des températures encore bien inférieures.

Par suite de leur mouvement erratique, les atomes ne peuvent pas rester indé-

finiment piégés dans la mélasse optique. Ils parviennent à sortir de la région délimitée par l'intersection des divers faisceaux laser, et s'échappent. Pour les conserver plus longtemps, il faut les piéger, c'est-à-dire les soumettre à des forces de rappel qui dépendent de leur position et qui les ramènent vers le centre du piège. Pas question ici, bien sûr, de confiner les atomes en les enfermant dans un récipient délimité par des parois matérielles, par exemple en verre. Les collisions avec de telles parois les réchaufferaient instantanément!

Plusieurs types de pièges pour atomes ultrafroids ont été proposés et réalisés au cours des dernières années. On peut par

exemple plonger les atomes dans des champs magnétiques inhomogènes (pièges magnéto-statiques) ou au foyer d'un faisceau laser non résonant qui déplace les niveaux d'énergie atomique d'une quantité proportionnelle à l'intensité lumineuse (pièges laser). Notons que les puits de potentiel produits de cette façon sont en général très peu profonds, de sorte que seuls des atomes de très faible

énergie cinétique, et donc très froids, peuvent y demeurer piégés. C'est la raison pour laquelle l'intérêt pour ce type de piège n'est apparu qu'à la suite du développement des méthodes de refroidissement laser.

Un piège particulièrement commode est le piège « magnéto-optique », dont le principe a été suggéré par J. Dalibard en 1986. Il a été ensuite réalisé pour la première fois en 1987 par des physiciens du MIT et des laboratoires Bell. L'idée consiste à superposer un champ magnétique inhomogène à une mélasse optique. Les déplacements énergétiques produits par un tel champ introduisent alors un écart par rapport à la résonance qui varie

Plusieurs types de pièges pour atomes ultrafroids ont été proposés

d'un point à l'autre. Cela donne une dépendance spatiale aux forces qui s'exercent sur l'atome par les diverses ondes de la mélasse, convenablement polarisées. On obtient ainsi une force globale de rappel qui ramène les atomes au centre de la mélasse. L'intérêt d'un tel piège tient au fait qu'il soit relativement plus profond que les autres et qu'il combine les effets de piégeage, introduits par le champ inhomogène, et les effets de refroidissement toujours présents dans la mélasse. De surcroît, on a découvert, en 1989, à la suite des travaux de C. Wieman et de son équipe à Boulder, qu'un tel piège pouvait fonctionner au milieu d'une cellule en verre remplie d'une vapeur atomique à la température ambiante. Les atomes lents de la vapeur sont progressivement refroidis et capturés (voir figure). Un tel dispositif est très simple à mettre en œuvre. Combiné avec la souplesse d'utilisation des diodes laser, le piège magnéto-optique en cellule apparaît maintenant comme une source particulièrement commode et relativement peu coûteuse d'atomes froids. Elle est de ce fait utilisée par plusieurs dizaines de laboratoires dans le monde.

JUSQU'OU PEUT-ON DESCENDRE EN TEMPÉRATURE ?

Avec la mise au point de méthodes de mesure plus précises de la température, il devint possible de tester la théorie du refroidissement Doppler. C'est ainsi que W. Phillips et son équipe à Gaithersburg découvrirent, en 1988, que la température des atomes refroidis descendait 10 à 100 fois plus bas que la limite Doppler. Heureuse surprise qui montrait que d'autres mécanismes de refroidissement, plus efficaces que l'effet Doppler, jouaient un rôle prépondérant dans les mélasses optiques.

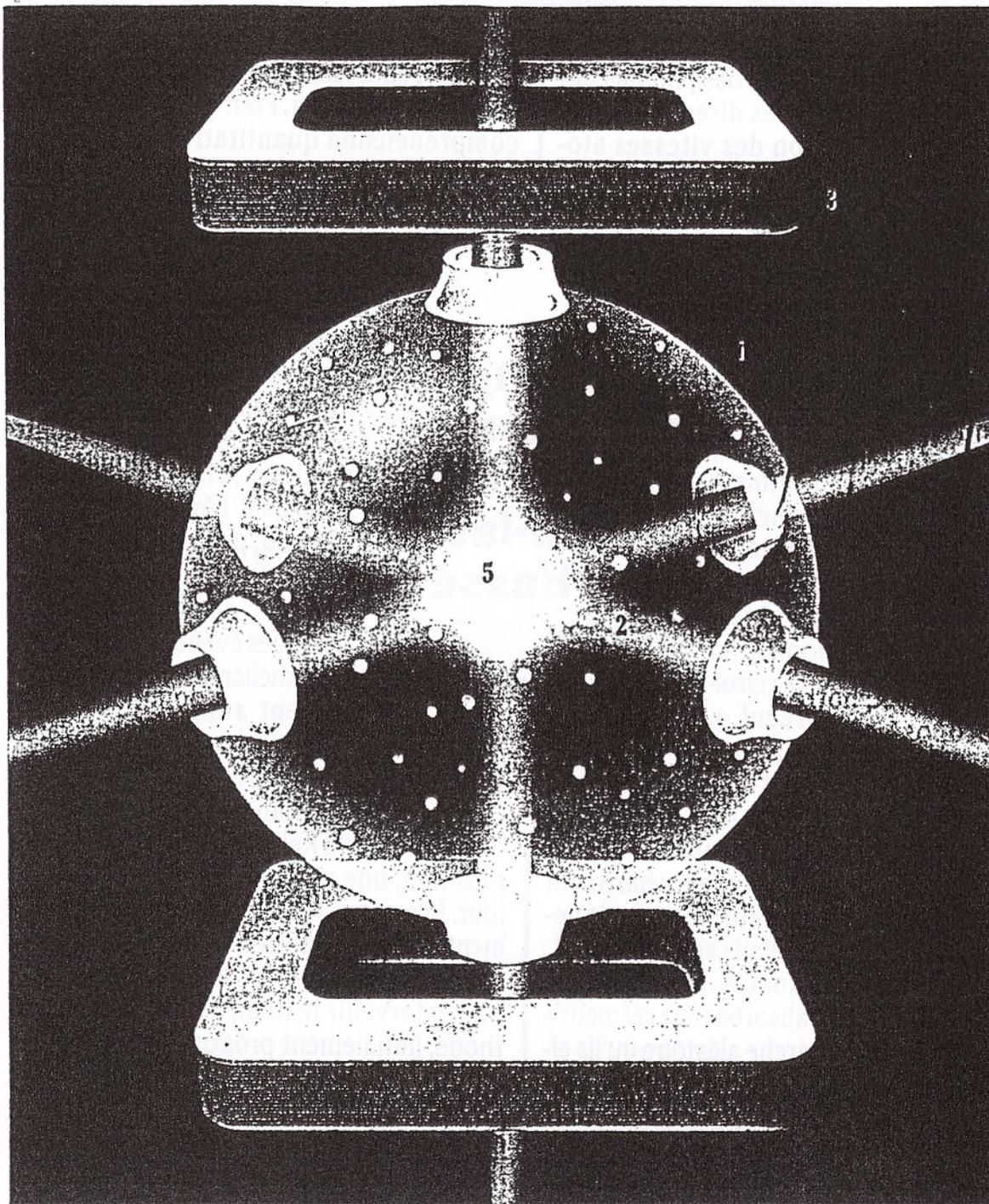
Ces mécanismes furent rapidement

identifiés, en particulier par notre équipe à Paris. Ils font intervenir les transitions de pompage optique entre les divers sous-niveaux d'énergie de l'état fondamental des atomes étudiés, ainsi que les déplacements énergétiques de ces sous-niveaux

produits par l'irradiation lumineuse. Celle-ci est légèrement désaccordée par rapport à la résonance dans une mélasse optique. Là aussi, ce fut une agréable surprise que de voir réapparaître des effets anciens, comme le pompage optique et les déplacements lumineux (découverts et étudiés dans notre laboratoire au cours des années 50 et 60), et de constater qu'ils jouaient un rôle essentiel dans un nouveau domaine de re-

cherche. Donnons un simple exemple de ces nouveaux mécanismes de refroidissement. Par suite des interférences qui existent entre les diverses ondes de la mélasse, les déplacements lumineux produits par ces ondes varient dans l'espace de manière périodique. L'atome en mouvement « voit » une série de collines et de vallées de potentiel, comme s'il se déplaçait sur une tôle ondulée. Quand il gravit une colline de potentiel, il est ralenti ; quand il descend au fond d'une vallée, il est accéléré. Par ailleurs, cet atome subit en permanence des transitions de pompage optique qui le font passer d'un sous-niveau de l'état fondamental à un autre sous-niveau où il « voit » de nouvelles ondulations de potentiel, déphasées par rapport aux précédentes. Le point important est alors le suivant : dès que l'atome a atteint le sommet d'une colline de potentiel dans un certain sous-niveau, il est pompé optiquement dans un autre sous-niveau, se retrouvant alors brusquement replacé au fond d'une vallée. A partir de là, il doit de nouveau gravir une colline de potentiel, et ainsi de suite... L'atome est ainsi condamné à gravir sans cesse des collines

**Tel Sisyphe,
l'atome est
condamné à
gravir sans
cesse des
collines de
potentiel...**



DESSINI. CORREIA

Un piège magnéto-optique pour les atomes : dans une enceinte en verre (1) les atomes sont soumis à l'action de six faisceaux laser (2) qui se croisent au centre. Deux bobines de fil (3), parcourues par des courants de sens opposés, créent un champ magnétique inhomogène : il est nul au centre de la cellule et augmente quand on s'en écarte. La somme des forces exercées par les six faisceaux laser contient alors à la fois une force de friction, qui amortit la vitesse des atomes, et une force de rappel qui les ramène au centre de la cellule. Les atomes (4) sont ainsi progressivement refroidis et piégés. Au centre de la cellule une petite tâche lumineuse (5) apparaît. Elle est due à la lumière de fluorescence émise par les atomes piégés.

de potentiel, ce qui le ralentit très efficacement. Sa situation rappelle celle de Sisyphe, héros de la mythologie grecque, qui était condamné à pousser perpétuellement un rocher vers le sommet d'une colline, le rocher retombant alors aussitôt au bas de la colline. C'est pourquoi nous avons donné, avec J. Dalibard, le nom de « refroidissement Sisyphe » à ce nouveau mécanisme. Notre équipe a pu vérifier expérimentalement que les températures mesurées dans les mélasses, de l'ordre du millionième de degré Kelvin, obéissaient bien aux lois prévues théoriquement à partir de notre modèle d'effet Sisyphe.

L'état d'équilibre auquel conduit le refroidissement Sisyphe correspond à une situation dans laquelle l'atome a perdu

une telle énergie au cours des cycles Sisyphe qu'il n'en a plus suffisamment pour gravir de nouvelles collines. Il se retrouve piégé au fond des puits de potentiel associés aux vallées. On obtient ainsi un « réseau » d'atomes régulièrement disposés dans l'espace, analogue en quelque sorte à un cristal dont la maille élémentaire serait de l'ordre du micron plutôt que de l'angström. Les propriétés de ces réseaux d'atomes font actuellement l'objet de nombreuses recherches menées par notre équipe, à Paris, en collaboration avec celle de G. Grynberg, à Munich, Gaithersburg et Tokyo.

Y a-t-il une limite inférieure au refroidissement Sisyphe? En fait, l'atome piégé au fond d'un puits ne cesse d'absorber et de

réémettre spontanément des photons qui le font reculer dans des directions aléatoires. La dispersion des vitesses atomiques ne peut donc être inférieure à la vitesse de recul communiquée par l'émission d'un seul photon, et la température inférieure à une certaine valeur qu'on appelle la température de recul. Est-il possible de descendre en dessous de cette valeur ? En fait, cette limite, qui semble à première vue infranchissable, peut être contournée. En collaboration avec A. Aspect, notre équipe a proposé et démontré en 1988 une méthode de refroidissement « subrecul ».

L'idée générale consiste à bloquer sélectivement l'absorption de photons par les atomes de vitesse quasi nulle. Objectif : protéger ces atomes des effets néfastes du recul aléatoire que leur communiqueraient les photons réémis spontanément. En revanche, les atomes de vitesse non nulle continuent à absorber et à réémettre des photons. La marche aléatoire qu'ils effectuent dans l'espace des vitesses peut alors les conduire vers des états de vitesse quasi nulle, au sein desquels ils se retrouvent piégés et s'accumulent. On peut se convaincre aisément qu'une telle méthode de refroidissement n'a pas de limite inférieure. Plus long est le temps d'interaction atome-laser, plus basse sera la température atteinte. La première expérience, réalisée en 1988, ne permettait de refroidir qu'une composante de la vitesse. En l'améliorant depuis, nous avons pu observer pour la première fois, au cours de ces dernières semaines, un refroidissement subrecul à trois dimensions, permettant d'atteindre sur des atomes d'hélium des températures 22 fois plus basses que la température de recul. En 1992, M. Kasevich et S. Chu, à Stanford, avaient proposé une autre méthode de refroidissement subrecul, basée sur des idées analogues et

Plus long est le temps d'interaction atome-laser, plus basse est la température

utilisant l'effet Raman, et démontrée à une et deux dimensions. Pour parvenir à une compréhension quantitative de ces diverses méthodes de refroidissement, nous avons été amenés à développer des nouvelles approches théoriques. En collaboration avec J.P. Bouchaud, nous avons en particulier montré l'intérêt d'appliquer au refroidissement subrecul des concepts, introduits notamment par le mathématicien français P. Lévy dans les années 30, pour analyser les marches aléatoires anormales dominées par quelques événements rares.

Actuellement, le refroidissement subrecul permet d'atteindre des températures de quelques dizaines de nanokelvins (milliards de degré Kelvin).

Pour aller encore plus loin, une nouvelle tendance se fait jour. Elle consiste à relayer le refroidissement laser par d'autres méthodes, tel que le refroidissement « évaporatif » qui ne fait plus intervenir la lumière. Une telle méthode, initialement proposée par F. Hess en 1986, a été déjà appliquée, par l'équipe de D. Kleppner au MIT et celle de J. Walraven à Amsterdam, à des atomes d'hydrogène capturés dans un piège magnéto-statique et préalablement refroidis par des méthodes purement cryogéniques. Elle est étendue maintenant à des atomes alcalins. L'idée consiste à utiliser les collisions élastiques entre des atomes piégés, préalablement refroidis par laser. Au cours d'une telle collision, l'énergie totale des deux atomes en jeu est conservée. A l'issue du choc, l'un des deux atomes peut avoir acquis une énergie suffisante pour s'échapper du piège. L'autre possède alors une énergie plus faible. Par collision avec les autres atomes restants dans le piège, l'ensemble atteint rapidement un nouvel état d'équilibre caractérisé par une énergie, et donc une température, plus basse. La situation est la

même que lorsqu'on souffle sur un bol de soupe pour le refroidir, en chassant les molécules les plus chaudes présentes au-dessus de la surface du liquide.

DES ATOMES ULTRAFROIDS : POUR FAIRE QUOI ?

La vitesse très faible des atomes ultrafroids, de l'ordre du centimètre, voire du millimètre par seconde, ainsi que le fait qu'on puisse les garder piégés pendant plusieurs secondes ou plusieurs minutes, ouvrent des perspectives très intéressantes pour toutes les mesures de très haute précision. Mesures qui sont d'autant plus précises que les temps d'observation sont plus longs.

Considérons par exemple les horloges atomiques. L'unité de temps, la seconde, est définie maintenant à partir de la fréquence d'une transition atomique reliant deux sous-niveaux d'énergie de l'état fondamental de l'atome de césium. En utilisant des atomes de césium ultrafroids, C. Salomon, dans notre laboratoire et A. Clairon, au Laboratoire primaire du temps et des fréquences de l'observatoire de Paris, ont conçu un nouveau type d'horloges. Elles permettent des temps d'observation 100 fois plus longs que les meilleures horloges actuelles, ce qui les rend donc potentiellement 100 fois plus précises. D'autres voies sont également explorées, comme celle de la microgravité : des horloges à atomes froids en satellite n'auraient plus les limitations dues au champ de pesanteur. Quelles retombées peut-on attendre d'horloges atomiques cent fois plus précises ? Outre des tests plus sévères de théories fondamentales comme la relativité générale, elles permettraient certainement une amélioration significative du système GPS (Global Positioning Sys-

tem) de navigation assistée par satellite.

Depuis les travaux de Louis de Broglie, on sait qu'à toute particule matérielle est associée une onde dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse de la particule. Les atomes ultrafroids, ayant une vitesse très faible, ont une longueur d'onde de De Broglie très grande, beaucoup plus grande que les dimensions de l'atome. On s'attend donc à ce qu'il devienne possible d'observer aisément toute une série d'effets physiques, liés au caractère ondulatoire du mouvement de ces objets composites que sont les atomes. Effectivement, des nouveaux champs de recherche sont apparus récemment, comme l'optique atomique ou l'interférométrie atomique. Ils ont pour objectif de réaliser pour les ondes de De Broglie atomiques l'équivalent des composants bien connus (miroirs, lentilles, lames séparatrices) de l'optique traditionnelle, et d'étudier les phénomènes d'interférence ou de diffraction qui peuvent être observés sur ces ondes. Ainsi, plusieurs laboratoires, à Constance, au MIT et à

Tokyo, ont répété l'expérience des franges de Young sur des atomes traversant un écran percé de deux fentes. Les atomes sont aussi beaucoup plus sensibles que les photons au champ de gravitation ou à des champs inertiels comme ceux qui apparaissent dans un référentiel animé d'un mouvement de rotation. Des interféromètres atomiques permettant de mesurer ces champs ont été construits à Stanford, par M. Kasevich et S. Chu, et par une équipe à Braunschweig, en collaboration avec C.

Grâce aux atomes ultrafroids, on peut fabriquer des horloges cent fois plus précises

Bordé. A Paris, notre équipe essaie actuellement de réaliser des « cavités gravitationnelles » pour atomes. Un nuage d'atomes ultrafroids est lâché au dessus d'un « tapis » de lumière, formé par une

Très récemment, les atomes ultrafroids ont permis d'observer la condensation d'un gaz de Bose-Einstein

onde laser évanescente qui se propage sur une surface concave creusée à la surface d'un prisme. Il est possible de régler la fréquence et l'intensité de l'onde laser, de manière que l'onde évanescente fasse apparaître une barrière de potentiel sur laquelle les atomes viennent rebondir avant de toucher la paroi. Nous avons déjà pu observer plusieurs dizaines de rebonds des atomes sur un tel « trampoline » atomique. Le but ultime d'une telle expérience est d'essayer de mettre en évidence les modes propres des ondes de De Broglie se propageant dans une telle cavité, fermée vers le bas par le miroir associé à

l'onde évanescente et vers le haut par la gravité. Ces modes propres seraient l'équivalent, pour les ondes de De Broglie, des ondes résonantes stationnaires lumineuses ou sonores dans une cavité Fabry-Pérot, ou dans un tuyau sonore. Dès à présent, des effets quantiques ont pu être observés par J. Dalibard et ses élèves, comme la modulation de fréquence des ondes de De Broglie se réfléchissant sur un miroir vibrant.

Enfin, les atomes ultrafroids rendent possible la création de nouveaux états de la matière. Très récemment, ils ont permis de réaliser une grande première :

l'observation de la condensation d'un gaz de Bose-Einstein. Un tel phénomène, prévu par Bose et Einstein en 1925, n'avait jamais été observé auparavant sur un gaz. Il consiste en l'accumulation d'un nombre macroscopique d'atomes identiques (obéissant à la statistique de Bose) dans un même état quantique, l'état fondamental de la boîte ou du puits dans lequel sont confinés les atomes. Il doit apparaître quand la température du gaz est suffisamment basse et sa densité suffisamment élevée pour que la distance

moyenne entre les atomes soit supérieure à leur longueur d'onde de De Broglie. Pour atteindre le seuil de la condensation et le dépasser, E. Cornell et son équipe à Boulder sont partis d'un gaz d'atomes de rubidium, piégés et préalablement refroidis par laser. Ils sont ensuite parvenus à comprimer ce gaz et à abaisser suffisamment sa température par les méthodes de refroidissement évaporatif (décrites plus haut) pour pouvoir observer la condensation. Le condensat de Bose-Einstein, formé par un nombre macroscopique d'atomes tous décrits par la même fonction d'onde, est un objet fascinant. Ses propriétés pourraient réserver bien des surprises et il pourrait être utilisé pour de nombreuses applications. Plusieurs équipes dans le monde semblent sur le point d'observer le même phénomène sur d'autres atomes alcalins, comme le lithium ou le sodium. Certaines, dont la nôtre, explorent également la possibilité de réaliser un « laser à atomes », sorte d'équivalent d'un laser ordinaire où les photons seraient remplacés par des atomes obéissant à la statistique de Bose.

Ce bref exposé aura, je l'espère, montré la richesse et le dynamisme d'un domaine de recherche très jeune, puisqu'il n'a que dix ans d'âge. Ce qui le caractérise, c'est, à mon avis, la simplicité des idées et des concepts de base ainsi que le fait que les expériences sont relativement légères et peu coûteuses, comparées à d'autres expériences de cryogénie hautement sophistiquées. Des petites équipes, avec de bonnes idées, peuvent se fixer des objectifs ambitieux tout en ayant une chance raisonnable d'obtenir des résultats significatifs. Je reconnais là plusieurs caractéristiques auxquelles Pierre-Gilles de Gennes est très sensible, et je crois ainsi comprendre pourquoi il a désigné ce thème de recherche parmi ceux qui lui paraissaient importants. Je puis témoigner aussi que ces recherches procurent à ceux qui les poursuivent un incontestable plaisir ludique et esthétique. Et après tout, n'est-ce pas là le moteur essentiel de toute recherche? ■