Atomes froids
et condensats quantiques

David GUÉRY-ODELIN et Jean DALIBARD

Lorsque plusieurs lasers convergent sur des atomes, ils agissent comme un puissant réfrigérant qui ralentit leur course. Ces atomes transis dévoilent alors leurs aspects quantiques les plus surprenants.

Quand une comète s'approche du Soleil, elle entraîne derrière elle une queue lumineuse. Au contraire, quand la comète s'éloigne, cette queue la précède. Pour expliquer ce phénomène, Johannes Kepler (astronome et physicien allemand de la fin du XVIe siècle) introduisit la notion de pression de radiation, c'est-à-dire l'action mécanique de la lumière sur la matière. Kepler fit l'hypothèse que la queue d'une comète est constituée de grains de poussière, éjectés de la comète et poussés par la lumière du Soleil vers l'extérieur du Système solaire.

On sait aujourd'hui que cette explication n'est pas totalement correcte, car d'autres mécanismes entrent en jeu dans la formation des queues de comètes. Toutefois, l'intuition de Kepler reste pertinente : la lumière exerce effectivement une force sur la matière, qui peut être considérable si la couleur et l'intensité de cette lumière sont convenablement choisies. Au cours des 20 dernières années, le développement de sources laser intenses et accordables a permis l'émergence d'un champ de recherche très actif : la manipulation d'atomes par laser et la production de gaz ultra-froids.

Une force qui fige les atomes

On décrit l'interaction d'un atome ou d'une molécule avec le rayonnement électromagnétique en termes d'absorption et d'émission de photons, les quanta d'énergie associés à un faisceau lumineux. Considérons un faisceau laser monochromatique, pour lequel chaque photon transporte la même énergie et la même impulsion. Ces deux quantités sont conservées lors des interactions entre matière et lumière. En conséquence, lorsqu'un atome absorbe ou émet un photon, l'état de son cortège d'électrons est modifié pour s'ajuster au gain ou à la perte de l'énergie du photon. En outre, son impulsion est augmentée ou diminuée, d'une manière similaire au canon qui recule quand il envoie un obus. Ainsi, un atome de sodium qui émet ou absorbe un photon jaune (couleur caractéristique du sodium présent dans les lampes d'éclairage public) modifie sa vitesse de trois centimètres par seconde.

Cette quantité semble négligeable comparée à la vitesse d'agitation thermique d'atomes de sodium, qui est proche de plusieurs centaines de mètres par seconde. Néanmoins, ces processus d'absorption-émission se répètent fréquemment. Voyons ce qui se passe quand un atome de sodium, initialement dans son état électronique de plus basse énergie, est éclairé avec une onde lumineuse résonnante. Ce dernier terme signifie que l'énergie d'un

John Gleason-Nasa

1. La pression de radiation exercée par la lumière du soleil est un des effets qui façonne la queue des comètes. Les grains de poussière éjectés par la comète sont balayés par le souffle lumineux (ici la comète de Hale-Bopp en 1997).

photon est égale à la différence d'énergie entre un état électronique excité et l'état fondamental, de plus basse énergie. Si l'atome absorbe un photon du laser, il passe dans l'état excité. Mais cet état est instable et l'atome retombe, après quelques dizaines de nanosecondes, dans son état fondamental, en émettant un photon de fluorescence. Rien n'empêche alors un deuxième cycle d'absorption-émission, puis un troisième, etc.

Chaque photon du laser interagissant avec l'atome transfère à celui-ci une impulsion dirigée dans le sens de propagation du laser. Les photons de fluorescence sont émis dans toutes les directions et ils cèdent à l'atome, après une moyenne sur plusieurs cycles, une impulsion nulle. Le bilan effectif d'un cycle d'absorption-émission se résume donc à une modification de la vitesse de l'atome des trois centimètres par seconde précédemment indiqués. Pour un laser résonnant et suffisamment intense, ces cycles se répètent au mieux toutes les 30 nanosecondes et l'accélération de l'atome de sodium qui en résulte est 100 000 fois plus grande que la pesanteur terrestre !

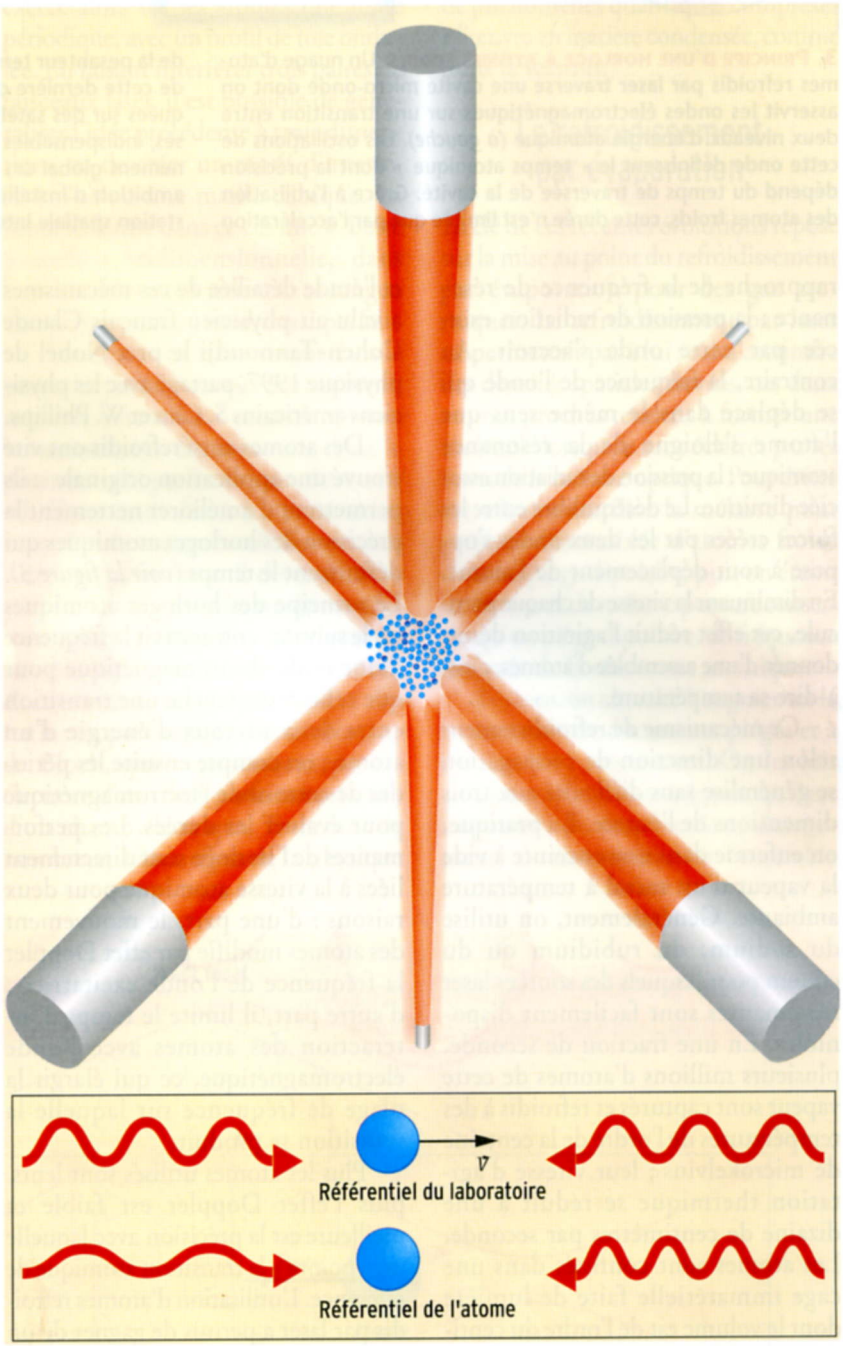
La mélasse optique

Dès 1983, l'équipe du physicien américain W. Phillips réussit à arrêter un jet d'atomes de sodium grâce à la force de pression de radiation. Le jet atomique sortant d'un four à une vitesse proche de 1 000 mètres par seconde était opposé à un faisceau lumineux intense ; un mètre plus loin, ces atomes étaient immobilisés.

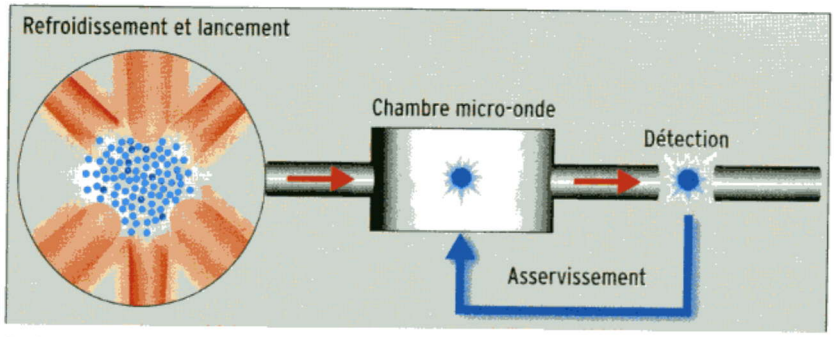
La « mélasse optique », que l'on retrouve dans pratiquement tous les laboratoires dédiés à la manipulation atomique, est une application spectaculaire des effets de la pression de radiation sur les atomes. Elle consiste à croiser en un même point plusieurs faisceaux laser pour y réaliser un milieu visqueux où les atomes sont englués *(voir la figure 2)*.

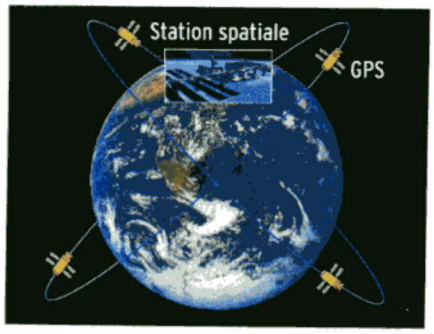
Considérons pour simplifier un mouvement selon une seule direction de l'espace. Deux faisceaux laser identiques, de même fréquence et de même puissance, se propagent en sens opposés. La fréquence de ces lasers est choisie légèrement inférieure à la fréquence de résonance des atomes à manipuler. Nous allons tout de suite voir pourquoi. Pour un atome au repos, placé au centre des deux faisceaux, les forces de pression de radiation exercées par chaque onde sont d'intensités égales et de sens contraires : elles s'équilibrent et l'atome ne ressent aucune force moyenne. Si l'atome bouge, l'effet Doppler modifie la fréquence apparente des ondes et vient perturber cet équilibre.

Plus précisément, lorsqu'un atome se déplace sur l'axe des faisceaux, la fréquence de l'onde qui vient à sa rencontre augmente, si bien qu'elle se



2. Des atomes sont refroidis dans une mélasse optique produite au point de convergence de six faisceaux laser *(en haut)*. Si l'on considère une seule direction de l'espace, un atome au repos est éclairé par deux faisceaux laser identiques. Lorsque l'atome est en mouvement, les fréquences apparentes des deux faisceaux diffèrent en raison de l'effet Doppler *(en bas)*. Si la fréquence des faisceaux laser est accordée juste en dessous de la fréquence de transition électronique, l'atome absorbera préférentiellement des photons du faisceau venant à sa rencontre. Il en résulte une force opposée à la vitesse de l'atome qui agit comme une force de friction.





3. Principe d'une horloge à atomes froids. Un nuage d'atomes refroidis par laser traverse une cavité micro-onde dont on asservit les ondes électromagnétiques sur une transition entre deux niveaux d'énergie atomique *(à gauche)*. Les oscillations de cette onde définissent le « temps atomique » dont la précision dépend du temps de traversée de la cavité. Grâce à l'utilisation des atomes froids, cette durée n'est limitée que par l'accélération de la pesanteur terrestre (les atomes tombent...). On s'affranchit de cette dernière dans l'espace. Les horloges atomiques embarquées sur des satellites permettent des mesures de temps précises, indispensables au fonctionnement des systèmes de positionnement global GPS *(à droite)*. Le projet européen PHARAO a pour ambition d'installer prochainement ce type d'horloge dans la station spatiale internationale.

rapproche de la fréquence de résonance : la pression de radiation exercée par cette onde s'accroît. Au contraire, la fréquence de l'onde qui se déplace dans le même sens que l'atome s'éloigne de la résonance atomique : la pression de radiation associée diminue. Le déséquilibre entre les forces créées par les deux ondes s'oppose à tout déplacement de l'atome. En diminuant la vitesse de chaque particule, cet effet réduit l'agitation désordonnée d'une assemblée d'atomes, c'est-à-dire sa température.

Ce mécanisme de refroidissement selon une direction de propagation se généralise sans difficulté aux trois dimensions de l'espace. En pratique, on enferme dans une enceinte à vide la vapeur d'un métal à température ambiante. Généralement, on utilise du sodium, du rubidium ou du césium pour lesquels des sources laser résonnantes sont facilement disponibles. En une fraction de seconde, plusieurs millions d'atomes de cette vapeur sont capturés et refroidis à des températures de l'ordre de la centaine de microkelvins ; leur vitesse d'agitation thermique se réduit à une dizaine de centimètres par seconde. Les atomes sont confinés dans une cage immatérielle faite de lumière dont le volume est de l'ordre du centimètre cube.

On réalise ainsi une situation paradoxale où le laser, traditionnellement associé à l'idée de chaleur, devient un puissant réfrigérant. Le refroidissement par effet Doppler n'est qu'un des processus à l'œuvre dans une mélasse optique, et l'étude détaillée de ces mécanismes a valu au physicien français Claude Cohen-Tannoudji le prix Nobel de physique 1997, partagé avec les physiciens américains S. Chu et W. Phillips.

Des atomes ainsi refroidis ont vite trouvé une application originale : ils permettent d'améliorer nettement la précision des horloges atomiques qui définissent le temps *(voir la figure 3)*. Le principe des horloges atomiques est le suivant : on asservit la fréquence d'une onde électromagnétique pour que celle-ci déclenche une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ; on compte ensuite les périodes de cette onde électromagnétique pour évaluer les durées. Les performances de l'horloge sont directement liées à la vitesse atomique pour deux raisons : d'une part, le mouvement des atomes modifie par effet Doppler la fréquence de l'onde excitatrice ; d'autre part, il limite le temps d'interaction des atomes avec l'onde électromagnétique, ce qui élargit la plage de fréquence sur laquelle la transition se produit.

Plus les atomes utilisés sont lents, plus l'effet Doppler est faible et meilleure est la précision avec laquelle on « pointe » la transition atomique de référence. L'utilisation d'atomes refroidis par laser a permis de gagner de un à deux ordres de grandeur sur la précision du temps atomique. Des horloges à atomes froids sont désormais présentes dans tous les grands laboratoires de métrologie du monde, en particulier au Laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris, où l'équipe d'André Clairon et Christophe Salomon a joué un rôle pionnier dans le domaine.

Le piège dipolaire

La pression de radiation n'est qu'un aspect de l'action mécanique de la lumière sur la matière. Un autre aspect est la force dipolaire qui s'exerce sur un atome placé dans un gradient d'intensité lumineuse. Pour comprendre l'origine de cette force, nous pouvons nous représenter l'atome comme une petite bille en verre placée dans un faisceau lumineux focalisé. À la traversée de la bille de verre, les rayons lumineux sont réfractés. Dans le cas où l'indice de la bille en verre est supérieur à celui du milieu environnant, les rayons incidents sur la partie supérieure de la bille sont réfractés vers le bas, et ceux de la partie inférieure sont réfractés vers le haut *(voir la figure 4a)*. La présence de la bille modifie donc l'impulsion du rayonnement.

L'impulsion totale du système constitué de la bille et du rayonnement est conservée ; la bille acquiert donc une impulsion du fait de la traversée de la lumière. Ce changement d'impulsion attire la bille vers la zone de grande intensité lumineuse : c'est la force dipolaire. La figure 4*b* représente la situation inverse où la bille, d'indice inférieur à celui du milieu environnant, est repoussée par la région de haute intensité.

Cette représentation par une bille macroscopique n'est pas rigoureuse, mais rend compte de manière qualitative de

la force agissant sur un atome lorsqu'il est éclairé par une onde lumineuse dont l'intensité varie dans l'espace. Lorsque la fréquence de la lumière est inférieure à la fréquence de résonance de l'atome, une situation similaire à celle de la figure 4*a* se produit et l'atome est attiré par les régions de haute intensité lumineuse. Au contraire, si la fréquence lumineuse est supérieure à la fréquence de l'atome, ce dernier est repoussé par les régions de haute intensité.

La force dipolaire que nous venons de décrire s'ajoute à la force de pression de radiation. Selon l'écart à la résonance entre la lumière et les atomes, l'une ou l'autre de ces forces domine. Quand les fréquences atomiques et lumineuses sont proches, la force de pression de radiation est prépondérante. Au contraire, pour un grand désaccord entre les deux fréquences, la force dipolaire domine la dynamique de l'atome dans l'onde lumineuse. Cette force dipolaire est fréquemment utilisée pour guider ou piéger des atomes.

Le plus simple de ces pièges, nommé piège dipolaire, est obtenu grâce à un faisceau laser, de fréquence plus basse que la résonance atomique, qu'on focalise au centre d'une enceinte à vide. Les atomes sont alors confinés au voisinage du foyer. En utilisant simultanément plusieurs faisceaux laser, on réalise des motifs de piège plus compliqués. Ainsi, en superposant deux faisceaux laser de même fréquence et de même intensité se propageant en sens opposés, on crée une onde stationnaire, avec des nœuds où l'intensité lumineuse est nulle et des ventres où l'intensité laser est maximale.

La distance entre deux nœuds consécutifs est égale à la moitié de la longueur d'onde lumineuse, soit une fraction de micromètre. La lumière exerce alors sur les atomes une force périodique, avec un profil de tôle ondulée. En faisant interférer trois paires de faisceaux laser, il est possible de généraliser l'idée précédente à trois dimensions, et de créer un motif d'interférences selon une maille cubique. La lumière forme dans ce cas une « boîte à œufs » tridimensionnelle, dans laquelle les atomes viennent se ranger, formant ainsi un cristal quasi parfait.

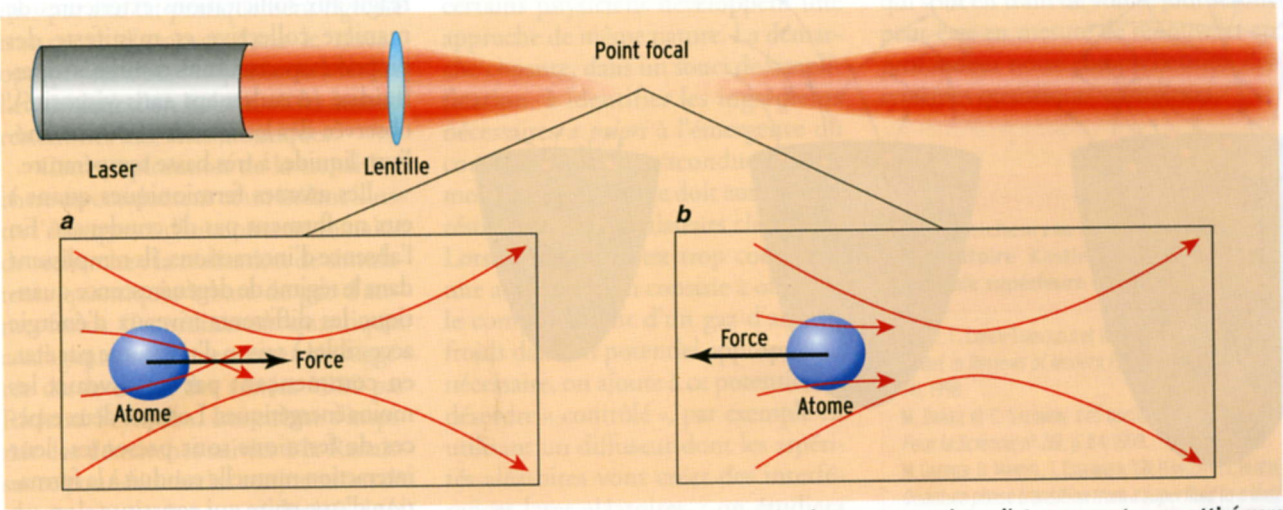
Ces atomes en mouvement dans le potentiel périodique des réseaux lumineux présentent une forte analogie avec le mouvement des électrons dans le potentiel créé par les atomes d'un cristal. Cette équivalence a suscité beaucoup d'enthousiasme et d'effervescence parmi les physiciens. Il devenait alors possible de comprendre ou de modéliser des phénomènes de matière condensée, conséquences du mouvement des électrons dans un réseau cristallin. Ce fut le cas, par exemple, des oscillations de Bloch, qui se produisent par les électrons d'un cristal parfait en présence d'un champ électrique. Toutefois, de nombreux autres effets de la physique des solides demeuraient inaccessibles à ces gaz atomiques, car le taux de remplissage des sites, de l'ordre de quelques pour cent, restait trop faible.

Depuis 2000, on a appris à contrôler ces assemblées d'atomes et on sait désormais préparer un réseau qui contient un ou plusieurs atomes par site. On réalise ainsi des « simulations » de phénomènes quantiques complexes à l'œuvre en matière condensée, comme nous le verrons.

Le refroidissement par évaporation

La clé de ces récentes évolutions repose sur la mise au point du refroidissement par évaporation pour des gaz atomiques. Le refroidissement par laser ne permettait pas à lui seul d'atteindre des densités spatiales élevées, car deux atomes proches tendent à former une molécule lorsqu'ils sont éclairés par les lasers de la mélasse optique. Pour éviter cet effet, on utilise la mélasse pour préparer l'assemblée d'atomes froids dans un piège dipolaire, puis on éteint ces faisceaux de mélasse pour ne conserver qu'un piège dipolaire, de fréquence éloignée de la résonance atomique.

Ensuite, on cherche à augmenter la densité spatiale des atomes piégés et à réduire leur température. Or, les lois de la physique nous enseignent qu'il est impossible de faire ces deux changements simultanément sur l'ensemble



4. Un piège dipolaire simple est conçu en utilisant un laser unique focalisé par une lentille convergente. L'intensité du faisceau va croître jusqu'au point focal, puis s'atténuer progressivement. Sous l'effet de ce gradient lumineux, un atome va subir une force dite dipolaire. Si la fréquence du laser est plus petite que la fréquence de résonance atomique, l'atome se retrouve attiré vers les zones de forte intensité *(a)*. Ainsi, l'atome est piégé dans un puits de potentiel au niveau du point focal. À l'inverse, si la fréquence du laser est plus élevée que la fréquence de résonance, l'atome s'éloigne des zones de forte intensité *(b)*.

du gaz en utilisant simplement la force dipolaire. Pour contourner cette limite, les physiciens ont fait appel au refroidissement par évaporation.

Chacun utilise le refroidissement par évaporation pour rafraîchir une assiette de soupe trop chaude. En soufflant sur le liquide, on facilite l'évaporation des molécules d'eau les plus énergétiques et on abaisse la température de la soupe de quelques degrés. D'une manière similaire, on diminue l'intensité du piège dipolaire, de sorte que les particules les plus énergétiques s'en échappent pour laisser une assemblée refroidie *(voir la figure 5)*.

Dans le piège dipolaire, les particules évaporées ont acquis leur énergie par le biais de collisions élastiques qui conservent l'énergie totale des deux particules concernées : lors de ces collisions, l'une des particules emporte l'essentiel de l'énergie au détriment de l'autre. La particule la plus énergétique s'échappe du piège (elle s'évapore) et sa partenaire reste piégée, quasi immobile au fond du piège. Ce mécanisme diminue fortement la température du nuage d'atomes piégé tout en augmentant la densité atomique. Notons que le piège dipolaire n'est qu'une des options de confinement possibles pour créer le refroidissement par évaporation. On utilise également des pièges magnétiques, fondés sur l'interaction entre le moment magnétique porté par les atomes et un gradient de champ magnétique.

Condensat de Bose-Einstein

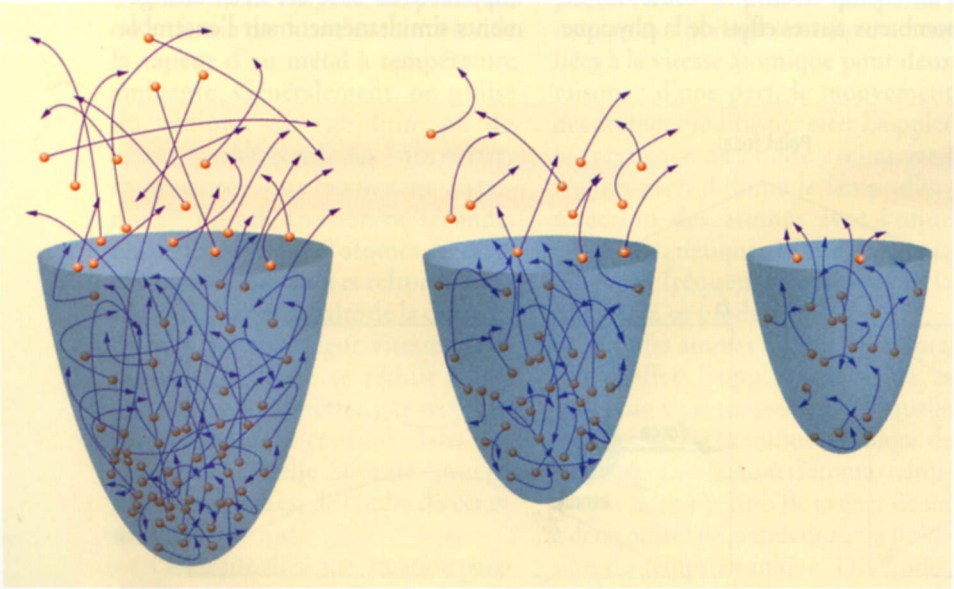
L'efficacité du refroidissement par évaporation est telle qu'elle permet d'atteindre le régime de dégénérescence quantique, une situation où la nature quantique du mouvement des atomes se manifeste de manière spectaculaire sur le comportement collectif du gaz. Jusqu'ici, nous avons traité nos atomes comme des corpuscules classiques, caractérisés par leur position et leur impulsion. Mais cette description n'est qu'une approximation : on sait depuis Louis de Broglie (physicien du XXe siècle et prix Nobel de physique 1929 pour ses travaux sur la nature ondulatoire des particules matérielles) que la description des atomes en termes d'onde est nécessaire, en particulier à basse température quand la longueur d'onde associée aux particules devient grande.

Le régime de dégénérescence quantique nécessite un gaz froid et dense : il est atteint lorsque la longueur d'onde associée aux particules devient supérieure à la distance moyenne entre ces particules. En pratique, le régime de dégénérescence quantique est atteint en sacrifiant près de 999 atomes sur 1 000 : la température finale du nuage d'atomes est inférieure au microkelvin, soit un millionième de degré au-dessus du zéro absolu !

Afin de prédire la dynamique du gaz dans ces conditions, il faut déterminer si les atomes sont des particules au comportement grégaire, encore appelées bosons, qui acceptent de s'accumuler dans le même état quantique, ou au contraire des particules au comportement individualiste, ou fermions, qui ne partagent jamais un même état. Pour nos atomes neutres, on montre à partir des premiers principes de la théorie quantique que cette distinction entre bosons et fermions ne dépend que d'un seul paramètre : la parité du nombre de neutrons contenus dans le noyau atomique. Ainsi, lorsqu'on travaille avec l'isotope 3 de l'hélium (un neutron) ou l'isotope 6 du lithium (trois neutrons), on a affaire à un gaz de fermions. Si le gaz est composé de l'isotope 4 de l'hélium (deux neutrons) ou de l'isotope 7 du lithium (quatre neutrons), les atomes sont des bosons.

En dessous d'une certaine température, les bosons s'accumulent dans l'état de plus basse énergie du système. Ils deviennent alors en quelque sorte tous jumeaux et forment ce qu'on appelle un condensat de Bose-Einstein, qui comporte jusqu'à plusieurs millions d'atomes. Ce milieu quantique est décrit par une onde de matière macroscopique, qui présente de fortes analogies avec l'onde lumineuse associée à un laser. Il réagit aux sollicitations extérieures de manière collective et manifeste des propriétés spectaculaires comme la superfluidité (écoulement sans viscosité), observée dès les années 1930 sur l'hélium liquide, à très basse température.

Les atomes fermioniques quant à eux ne forment pas de condensat. En l'absence d'interactions, ils remplissent dans le régime de dégénérescence quantique les différents niveaux d'énergie accessibles à raison d'un atome par état, en commençant par les niveaux les moins énergétiques. Lorsque deux espèces de fermions sont présentes, leur interaction mutuelle conduit à la formation d'une paire qui constitue alors un boson. La supraconductivité (conduction électrique sans résistance) tire ainsi son origine de l'appariement d'électrons de conduction. En 2004,



5. Refroidissement des atomes par évaporation. Des faisceaux laser forment un piège à atomes selon toutes les directions de l'espace. En diminuant la puissance lumineuse de chaque faisceau *(de gauche à droite)*, on diminue l'intensité du piège. Les atomes les plus énergétiques s'échappent, ce qui permet de ne garder, au fond du piège, que les atomes les plus froids.

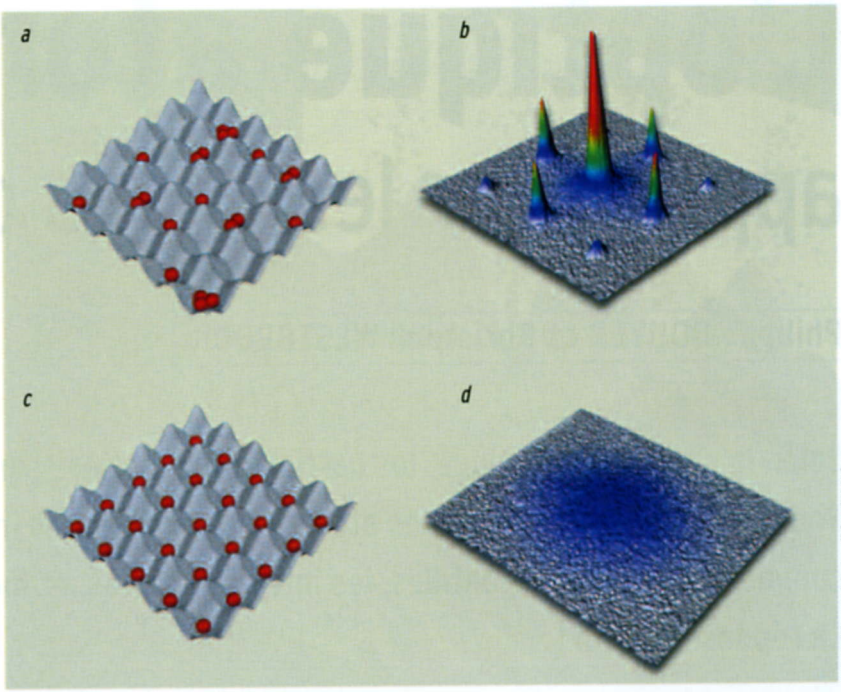
plusieurs équipes spécialisées dans l'étude des gaz de fermions ultra-froids ont réalisé dans le même esprit des condensats de molécules constitués de deux atomes fermioniques dans des états électroniques différents.

Simuler la matière condensée

Une voie de recherche actuellement très étudiée consiste à placer ces gaz quantiques, bosoniques ou fermioniques, dans le potentiel de « boîte à œufs » décrit plus haut, avec une densité d'atomes particulière qui assure que tous les sites sont occupés par au moins un atome. Le groupe d'Immanuel Bloch, de l'Université Johannes Gutenberg en Allemagne, a étudié la distribution de bosons (isotope 87 du rubidium) dans une telle situation *(voir la figure 6)*. Dans un premier temps, le réseau optique a une faible profondeur et les atomes sont délocalisés sur l'ensemble du réseau. Certains sites sont occupés par un atome, d'autres sites par deux atomes, d'autres encore sont vides. Les atomes sont capables de sauter, presque librement, d'un site à l'autre, ce qui modélise un conducteur, où les électrons circulent dans le réseau cristallin d'un site atomique à un autre.

En augmentant la profondeur des pièges périodiques du réseau optique, on réduit la possibilité pour un atome de se déplacer d'un site à l'autre. Pour des pièges suffisamment profonds, on atteint un régime où le nombre d'atomes par site est pratiquement figé. Le transport d'atomes dans le réseau optique est alors bloqué et on a réalisé l'équivalent d'un isolant, où les atomes restent liés aux sites atomiques.

Cette exploration de la transition entre un conducteur et un isolant illustre l'émergence d'un nouveau domaine de recherche : la réalisation de simulateurs quantiques à base de gaz d'atomes froids. Ces ordinateurs quantiques analogiques reprennent une idée suggérée dès le début des années 1980 par Richard Feynman. Lui-même s'inspirait des démarches suivies à la Renaissance pour déduire les conjonctions de planètes à une époque où les lois de la gravitation n'étaient pas connues. L'idée consistait à observer les périodicités dans le mouvement des planètes, et à les reproduire à l'aide d'engrenages. La modélisation mécanique permettait de faire des prédictions sur les futures conjonctions de planètes.



I. Bloch, Johannes Gutenberg Universität, Mainz

6. Un réseau de pièges atomiques est produit par plusieurs faisceaux laser. Le comportement des atomes piégés dépend de l'intensité lumineuse. À basse intensité, les atomes se déplacent quasi librement dans la structure périodique *(a)*, à la manière des électrons de conduction d'un métal. Ils forment une onde de matière géante dont la cohérence est révélée par la figure d'interférence *(b)* ; celle-ci est obtenue en éteignant les faisceaux laser et en laissant les ondelettes issues des différents sites se superposer. À haute intensité, chaque atome est piégé sur un site donné, comme les électrons d'un matériau isolant *(c)*. Les ondelettes associées à chaque site sont incohérentes entre elles, et aucune interférence n'apparaît quand elles se superposent *(d)*.

Pour comprendre les phénomènes quantiques complexes présents en matière condensée, comme la supraconductivité à haute température, certains physiciens développent une approche de même nature. La démarche consiste, dans un souci de simplification, à identifier les ingrédients nécessaires *a priori* à l'émergence du comportement supraconducteur. Le modèle qui en résulte doit ensuite être résolu par des calculateurs classiques. Lorsque ce calcul est trop complexe, une autre solution consiste à observer le comportement d'un gaz d'atomes froids dans un potentiel approprié. Si nécessaire, on ajoute à ce potentiel un désordre « contrôlé », par exemple en utilisant un diffuseur dont les aspérités aléatoires vont créer des interférences laser aléatoires ; on étudiera également le mélange de gaz atomiques composés par des espèces différentes pour suivre l'apparition de nouvelles phases quantiques de ces gaz.

Il est ainsi spectaculaire de voir cette physique des atomes froids, qui a d'abord révolutionné l'approche de la spectroscopie à très haute résolution et de la métrologie, apporter désormais de nouveaux outils pour l'étude des phénomènes collectifs. Ces simulateurs qui sont en train de voir le jour seront peut-être en mesure de renouveler en profondeur notre compréhension des systèmes quantiques complexes.

David Guéry-Odelin et Jean Dalibard sont chercheurs au CNRS, et travaillent au Laboratoire Kastler Brossel à l'École normale supérieure de Paris.

S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W.D. Phillips, *Conférences Nobel*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 70, pp. 685-741, 1998.

M. Dahan et C. Salomon, *Les oscillations de Bloch*, in *Pour la Science*, n° 261, p. 84, 1999.

M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T.W. Hänsch et I. Bloch, *Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atomes*, in *Nature*, vol. 415, p. 369, 2002.

A. Aspect et J. Dalibard, *Le refroidissement des atomes par laser*, in La Recherche, n° 261, vol. 25, pp. 30-37, janvier 1994.