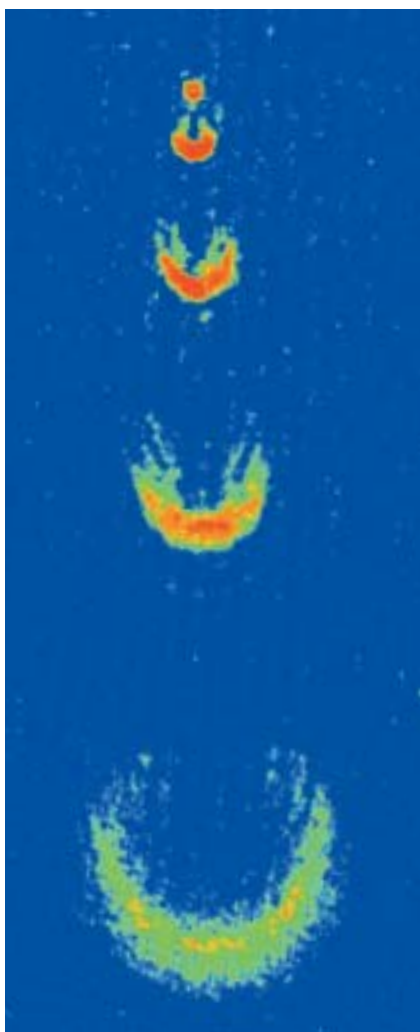




En haut : S. Raïson ; ci-contre : D. Durfee et M. Andrews

3. LES LASERS ATOMIQUES sont, pour l'essentiel, des condensats en mouvement. Ce sont des analogues matériels des impulsions lasers optiques. Dans le premier laser atomique (*ci-dessus*), les impulsions étaient formées de fragments de condensat mis en mouvement par la seule gravité. Des impulsions radio heurtant un condensat piégé (*le cercle orangé en haut*) libéraient du piège des fragments de nuage (*en forme de croissants*). La forme en croissant et sa dilatation au cours de la chute résultent de la répulsion qui s'exerce entre les atomes de sodium. Dans le premier laser atomique dirigé (*en haut*), les atomes du condensat étaient expulsés latéralement par l'action d'une série d'impulsions de lasers optiques.

destructives (où les creux de l'une coïncident systématiquement avec les crêtes de l'autre), créant des franges alternativement sombres et brillantes. De la même façon, des franges alternativement denses et vides apparaissent là où les deux condensats se superposaient. Comme la formation d'un vortex dans l'un des condensats se traduit par une modification de la phase de sa fonction d'onde, la figure d'interférences s'en trouve modifiée, ce qui permet de déterminer précisément la phase de la fonction d'onde (et, par conséquent, aussi le moment cinétique transmis au condensat). Les physiciens de Boulder confirmèrent alors ce que prévoit la théorie, un résultat que l'on n'avait pas pu obtenir de façon aussi précise et directe en 60 ans de travaux sur l'hélium superfluide.

Quelques semaines plus tard, l'équipe de Jean Dalibard, à l'École normale supérieure de Paris, réussissait à imprimer une rotation à un condensat de façon encore plus directe, c'est-à-dire en reprenant l'approche du récipient en rotation. Pour ce faire, l'équipe de J. Dalibard déplaçait un faisceau laser sur les bords du condensat, reproduisant l'action des parois d'un hypothétique récipient. Cette procédure fit apparaître des réseaux contenant jusqu'à 14 vortex. En septembre 2000, cette équipe a publié les valeurs des moments cinétiques mesurés sur ses condensats : le moment cinétique reste nul jusqu'à l'apparition du premier vortex, qui correspond à l'acquisition d'une unité de moment cinétique par tous les atomes du nuage.

Outre son intérêt fondamental, la dynamique des vortex revêt une certaine importance pour les supraconducteurs à haute température. En effet, lorsque les lignes de champ magnétique pénètrent dans un tel maté-

riau, elles y engendrent des boucles de courant électrique. Ainsi, les champs magnétiques créent des réseaux de vortex dans les supraconducteurs. Or, ces vortex dissipent de la puissance électrique ce qui entrave la disparition de la résistance au courant. L'étude des condensats de Bose-Einstein apportera peut-être la solution à ce problème.

Des lasers atomiques

Les bosons les plus familiers sont les particules qui constituent la lumière, les photons. Depuis plus de 40 ans, on sait produire une forme de condensation de Bose-Einstein avec des photons : il s'agit des rayons lasers. Dans un faisceau laser, les photons sont cohérents, c'est-à-dire que les ondes associées sont toutes identiques (ils sont notamment en phase), raison pour laquelle les faisceaux lasers restent focalisés sur de très grandes distances (et sont très intenses) et sont très monochromatiques (les photons ont tous la même longueur d'onde). En obtenant des condensats de Bose-Einstein à partir d'atomes et non de photons, les physiciens obtiennent des «lasers atomiques».

Dans la recherche comme dans l'industrie (par exemple dans les domaines des horloges atomiques, de la mesure des constantes fondamentales et de la production de puces électroniques), on utilise déjà des jets d'atomes. Toutefois, ces faisceaux, simplement expulsés d'un four contenant un gaz chaud, n'ont ni la brillance ni la cohérence d'un laser atomique, de même que le faisceau d'une lampe ordinaire n'a ni la brillance ni la cohérence d'un faisceau laser.

Un laser atomique est un condensat, ou un ensemble cohérent de condensats se déplaçant librement dans l'espace. Or, après sa formation,

un condensat est immobile dans son piège magnétique. Pour fabriquer un laser atomique, il faut libérer une partie des atomes du condensat. Un atome est doté d'un infime dipôle magnétique – proportionnel à son spin – c'est-à-dire qu'il se comporte un peu comme une minuscule aiguille de boussole : l'interaction entre le champ de confinement et cette petite aiguille maintient l'atome en place. L'application d'un rayonnement radio correctement réglé peut inverser le spin des atomes d'un condensat et les rendre totalement insensibles au champ magnétique de confinement. En 1997, l'équipe de Wolfgang Ketterle, à l'Institut de technologie du Massachusetts, utilisa cet effet pour réaliser le premier laser atomique. Des impulsions radio libéraient des atomes de sodium d'un condensat. Le faisceau ainsi produit était formé de fragments condensés en forme de croissant, qui

tombaient du piège : le faisceau «laser» était propulsé par la seule action de la gravité! À la fin de l'année 1998, à l'aide d'un système analogue, le groupe de Theodore Hänsch, à l'Université de Munich, créa un faisceau quasi continu d'atomes de rubidium, qui durait environ une seconde, le temps que tous les atomes soient expulsés du condensat. Ce faisceau était près d'un million de fois plus «brillant» que des jets contenant le même nombre d'atomes, mais produits par des techniques classiques.

À la même époque, William Phillips, Steven Rolston et leurs collègues de l'Institut américain de métrologie et de technologie réussirent à construire un laser atomique dont le faisceau pouvait être dirigé dans n'importe quelle direction. Des atomes étaient expulsés du condensat par une impulsion laser optique à chaque fois qu'un trou circulant à la périphérie du

piège magnétique se trouvait dans la direction souhaitée. Une succession d'impulsions lasers soigneusement synchronisées avec le mouvement du trou produisait alors un faisceau dont l'orientation était bien précise. Ils avaient obtenu un canon à atomes doté d'une précision équivalente à celle d'un laser. Toutefois, ces premiers faisceaux d'atomes semblaient si différents des lasers optiques que beaucoup ont refusé de les nommer des lasers atomiques, notamment parce que le phénomène d'amplification, à la base



S. Rolston

Les réfrigérateurs quantiques

Le refroidissement par laser

Pour créer un condensat de Bose-Einstein, les physiciens placent un gaz atomique dilué dans une chambre à vide et le portent à une température extrêmement basse. La première étape de ce refroidissement utilise presque toujours une «mélasse optique» : les atomes sont ralentis par des faisceaux lasers provenant de six directions différentes. Leur température passe de quelque 300 kelvins (la température ambiante) à 50 microkelvins environ – un vingt-millième de degré au-dessus du zéro absolu.

Le piège magnéto-optique

Un piège magnéto-optique est le dispositif le plus couramment utilisé au cours des expériences sur les condensats. Il combine le refroidissement par un laser et le confinement des atomes dans un champ magnétique. Ce champ magnétique peut être manipulé pour comprimer le gaz et accroître sa densité. De nombreux groupes de recherche utilisent successivement deux pièges de ce type. Le premier sert à collecter les atomes. Quant au second, en augmentant la densité du nuage, il permet d'achever le refroidissement par évaporation.

Le refroidissement par évaporation

La phase finale du refroidissement est analogue à ce qui se produit dans une tasse de café : les atomes les plus rapides s'échappent du piège par évaporation. La température du gaz restant dans la cavité diminue progressivement. Contrairement au refroidissement par laser, le refroidissement par évaporation est plus efficace lorsque la densité du nuage est élevée.

Le piège TOP

Le piège TOP (pour *Time-averaged orbiting potential*, c'est-à-dire potentiel circulant moyenné dans le temps) fut utilisé par le groupe d'Eric Cornell et de Carl Wieman lorsqu'ils créèrent le premier condensat atomique, en 1995. Depuis, il a été adopté par plusieurs autres groupes. Des bobines de fil électrique constituent un électro-aimant

UN CONDENSAT d'atomes de sodium, stabilisé dans un piège magnéto-optique, est maintenu en place par six faisceaux lasers de refroidissement. Le champ magnétique est produit par les bobines.

capable de produire un champ magnétique variable. Le champ magnétique produit présente un point où son intensité est nulle, ce qui permet à certains atomes de s'échapper. Quand on fait rapidement tourner le champ, le point d'échappement se déplace sur une trajectoire circulaire, et les atomes sont confinés dans un volume ellipsoïdal contenu à l'intérieur de cette trajectoire.

Les pièges de Ioffe-Pritchard

Ces pièges portent le nom des physiciens russe Mikhail Ioffe (inventeur d'un dispositif destiné à confiner des plasmas d'ions chargés) et américain David Pritchard, de l'Institut de technologie du Massachusetts. Un courant électrique circulant dans quatre barres parallèles (les barres de Ioffe) ou dans une bobine de forme variée, engendre un champ magnétique «étanche», dépourvu de point d'échappement. Les condensats y adoptent différentes formes allant de la sphère quasi parfaite à l'ellipsoïde en forme de cigare.

Les pièges magnétiques permanents

Le champ de certains pièges magnéto-optiques est fourni par des aimants permanents plutôt que par des électro-aimants. Dans ce cas, les condensats produits ne peuvent être manipulés en désactivant le champ de confinement et doivent être étudiés à l'intérieur du dispositif où ils sont formés. Randall Hulet, de l'Université Rice, l'utilise pour créer des condensats d'atomes de lithium.

des lasers optiques, ne semblait pas se produire dans le cas des faisceaux cohérents d'atomes.

Le sigle *laser* signifie amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. Quand un photon heurte un atome excité, ce dernier a de fortes chances d'émettre un photon identique, signe du comportement «grégaire» des bosons, auquel Albert Einstein donna le nom d'émission stimulée. Une onde lumineuse qui se réfléchit sur les parois d'une cavité adaptée s'enrichit progressivement de photons tous identiques : c'est le phénomène d'amplification laser, qui n'est autre que l'accumulation de photons dans un même état quantique. Quel est son équivalent dans le cas des faisceaux d'atomes ? Dans les premiers «lasers atomiques», cette amplification n'avait lieu qu'au cours de la phase de création du condensat, lorsque l'état quantique d'un atome initial est recopié (et donc amplifié) par la condensation de Bose-Einstein.

À la fin de l'année 1999, Wolfgang Ketterle, David Pritchard et leurs collègues de l'Institut de technologie du Massachusetts ont réussi à obtenir une amplification analogue à celle qui se produit dans les lasers optiques. Ce phénomène d'amplification de l'onde de matière a été obtenu également par Takahiro Kuga et ses collègues de l'Université de Tokyo. Le terme d'amplification de l'onde de matière ne signifie pas qu'il y ait création de matière à partir d'énergie. En fait, les physiciens envoient une petite impulsion de laser atomique (un fragment de condensat) à travers un condensat plus gros. L'impulsion initiale est amplifiée à mesure que de nouveaux atomes cèdent à leur instinct de bosons et la rejoignent. Comment des atomes, initialement immobiles, peuvent-ils se mettre en mouvement sans violer les principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement ? L'énergie nécessaire est puisée dans un faisceau laser dit de pompage, qui éclaire le condensat au cours de l'opération.

Aujourd'hui, on sait moduler les interactions des atomes. À température ordinaire, tous les atomes s'attirent à grande distance (ce sont ces interactions électriques qui sont à l'origine des forces de capillarité) et se repoussent lorsqu'on les rapproche au point que leurs cortèges électroniques se touchent. À très basse température,

les choses deviennent différentes. Les fonctions d'onde des atomes se superposent et ils ressentent simultanément l'attraction et la répulsion : l'interaction résultante peut être attractive ou répulsive suivant la nature des atomes. Les atomes de sodium 23, de rubidium 87 ou d'hydrogène, par exemple, repoussent les atomes de leur propre espèce à basse température. Inversement, des atomes de lithium 7 ou de rubidium 85 s'attirent.

Des interactions atomiques ajustables

Ces interactions sont infimes, mais elles suffisent à modifier les propriétés d'un condensat, telles que son énergie interne, sa taille, ses modes d'oscillation et sa vitesse de formation. De plus, quand les interactions entre atomes sont répulsives, le condensat est stabilisé. Ainsi les condensats obtenus à partir d'atomes de rubidium 87 ou du sodium contiennent plusieurs millions d'atomes et sont 20 fois plus gros qu'ils ne le seraient en l'absence de répulsion. Inversement, l'attraction limite à environ 1 500 atomes les condensats de lithium 7. Au-dessus de cette taille, le condensat se contracte et devient trop dense, les collisions entre atomes sont fréquentes et certains atomes sont expulsés du piège où le nuage est retenu. Au début des années 1990, ces résultats semblaient interdire la formation de condensats contenant des atomes attractifs.

On peut modifier ces interactions atomiques en recourant aux résonances dites de Feshbach, ainsi nommées en l'honneur de Herman Feshbach qui, dans les années 1960, étudia un phénomène analogue lors de collisions entre noyaux d'atomes. Supposons qu'un système quantique, un atome, par exemple, puisse se trouver dans deux états d'énergie distincts : l'état fondamental et l'état excité. En général, lorsque ce système est dans l'état fondamental, il ne peut absorber qu'une quantité d'énergie strictement égale à celle qui lui permet de passer à l'état excité, les états d'énergie intermédiaires lui étant interdits. Toutefois, quand l'atome percute une particule dont l'énergie n'est pas suffisante pour le faire passer dans un des états excités, il se lie parfois à cette particule en formant un état quantique «hybride» : l'atome

se trouve dans un état dit superposé, «mélange» de l'état fondamental et de l'état excité, et forme avec la particule incidente une association plus ou moins stable. Deux atomes qui se rencontrent peuvent ainsi se «coller» l'un à l'autre en formant brièvement ce que l'on nomme un état de Feshbach.

Dans certains cas, on peut ajuster la stabilité et la probabilité de formation d'un état de Feshbach à l'aide d'un champ magnétique. C'est le cas lorsque les atomes libres ont un spin global différent de celui de l'assemblage de Feshbach : l'écart d'énergie entre l'état libre et l'état de Feshbach – et, par conséquent, leur stabilité relative – varie avec le champ magnétique. On montre que, pour certaines valeurs du champ – les valeurs de résonance –, les atomes ont tendance à s'accoler plus facilement lors des collisions.

Dans le cas des atomes d'un condensat, où il n'y a plus d'atomes isolés, les forces d'interaction sont modifiées en permanence et non plus seulement au moment des collisions. L'effet se manifeste surtout lorsque le champ est proche d'une valeur dite de résonance.

En 1998, l'équipe de W. Ketterle a mis en évidence ce phénomène. Toutefois, quand le champ magnétique s'approche de la valeur de résonance, les condensats de sodium se désintègrent en quelques microsecondes, et il semblait impossible d'explorer leur comportement à proximité de cette valeur. Au début de l'année 2000, E. Cornell, C. Wieman et leurs collègues sont parvenus à créer des condensats d'atomes de rubidium 85 assez stables et dont les interactions sont plus précisément ajustables. Dans les conditions ordinaires, les interactions attractives entre atomes de rubidium empêchent la formation de condensats contenant plus de 80 atomes. Cependant, en utilisant les résonances de Feshbach pour transformer ces interactions attractives en interactions répulsives, l'équipe du Colorado a obtenu des condensats de près de 10 000 atomes qui ont survécu plus de 10 secondes.

Lorsque l'on diminue progressivement la répulsion entre les atomes de rubidium, des effets spectaculaires se produisent : les condensats rétrécissent peu à peu et deviennent de plus en plus denses. Cinq millise-