

combinant faisceaux lasers et champs magnétiques qui piègent, puis refroidissent un nuage d'atomes à l'intérieur d'une chambre à vide (voir l'encadré de la page 80).

Nous nous intéresserons à quelques-uns des résultats expérimentaux obtenus sur les condensats de Bose-Einstein : la superfluidité, la fabrication de faisceaux lasers constitués de matière plutôt que de lumière, et la possibilité de moduler les interactions entre les atomes.

Superfluides et vortex

Quand on abaisse la température de l'hélium liquide à 2,2 degrés au-dessus du zéro absolu, il devient superfluide, c'est-à-dire qu'il s'écoule sans la moindre viscosité. L'hélium superfluide est capable, par exemple, de jaillir d'un récipient en remontant le long des parois sous le seul effet des forces de capillarité. Ce phénomène fut découvert en 1938, par le physicien soviétique Piotr Kapitsa et par le physicien canadien John Allen. On pense qu'au sein de l'hélium liquide, des atomes seraient recrutés dans un condensat de Bose-Einstein (voir l'encadré de la page 83) lui conférant ses étranges propriétés. Les condensats que l'on fabrique aujourd'hui sont-ils, eux aussi, superfluides ? Oui : quand on essaie de mettre en rotation un condensat, la superfluidité se manifeste par la formation de vortex.

Quand on fait tourner un récipient contenant de l'hélium liquide ordinaire (ou tout autre liquide), le fluide est entraîné par la rotation des parois du récipient et se met à tourner avec lui. En revanche, dans un premier temps, le phénomène ne se produit pas avec de l'hélium superfluide : le liquide de viscosité nulle n'interagit pas avec les parois en rotation et reste immobile.

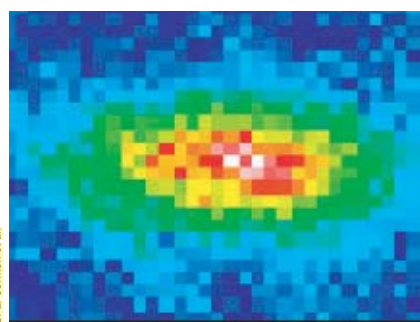
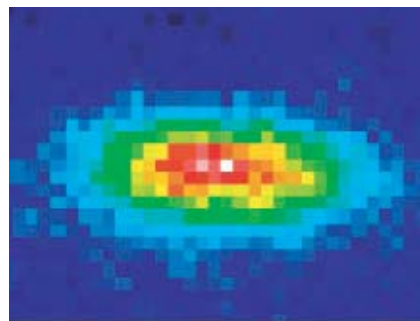
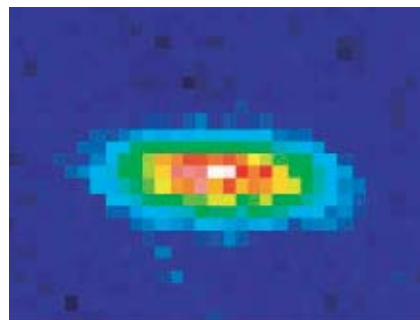
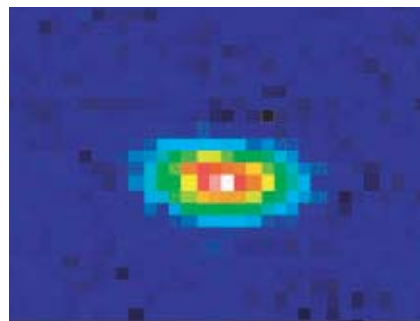
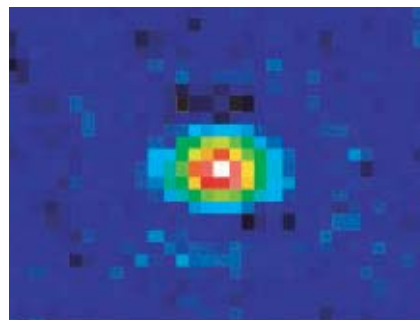
Lorsque la vitesse de rotation atteint un certain seuil, le récipient parvient toutefois à communiquer au liquide une certaine rotation, que les physiciens nomment un moment cinétique. Au sein du fluide, cette rotation se manifeste par l'apparition d'un tourbillon, ou vortex. Lorsque l'on augmente la vitesse de rotation du récipient, le moment cinétique du fluide croît par sauts discrets et le nombre de vortex augmente d'une unité à chaque saut.

Ce phénomène, mis en évidence au prix de nombreuses difficultés dans

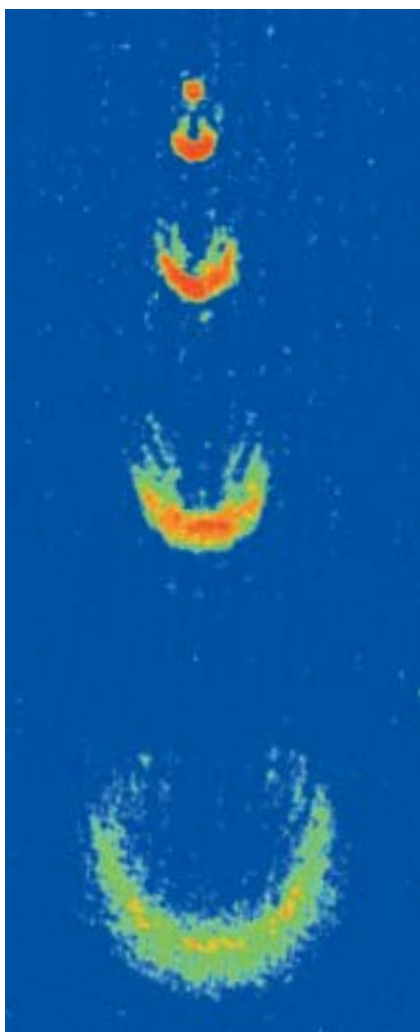
l'hélium superfluide, est manifeste dans les condensats. L'apparition des vortex traduit le fait que les atomes d'un condensat sont tous dans le même état quantique et, par conséquent, ont tous le même moment cinétique. De plus, en mécanique quantique, on montre que le moment cinétique est une grandeur quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne prend que des valeurs discrètes, ou quanta. Un quantum de moment cinétique est de l'ordre de 10^{-34} joule $\times$ seconde, de sorte qu'à l'échelle humaine, la rotation que l'on peut imprimer à un objet semble pouvoir prendre n'importe quelle valeur. Toutefois, dans le cas d'un condensat, le fluide ne peut être mis en rotation que si tous ses atomes acquièrent en même temps une unité de moment cinétique. Dans l'état immobile, les atomes ont tous un moment cinétique nul ; lorsqu'un vortex apparaît au centre d'un condensat sphérique, ils ont tous une unité de moment cinétique.

En 1999, Carl Wieman, Eric Cornell et leurs collègues de l'Institut pour l'astrophysique de laboratoire, à Boulder, ont mis en évidence la formation de vortex dans les condensats de Bose-Einstein. Ils communiquaient une unité de moment cinétique à un condensat de rubidium à l'aide d'un faisceau de micro-ondes et d'un laser. En effet, une onde électromagnétique (qu'il s'agisse de micro-ondes ou de lumière) peut transporter du moment cinétique. Ainsi, lorsque des électrons tournent dans une boucle métallique, ils engendrent une onde électromagnétique. Quand cette onde atteint une autre boucle métallique, elle y induit un courant électrique : elle fait tourner les électrons du métal, ce qui montre qu'elle leur a transféré un certain moment cinétique provenant des électrons de l'émetteur. Le moment cinétique apparaît dans la fonction d'onde d'une particule comme un changement de phase de l'onde de probabilité.

Le dispositif de C. Wieman et de E. Cornell comportait deux condensats formés d'atomes d'un même élément (le rubidium) et qui se recouvraient partiellement. Or, un condensat n'est autre qu'une fonction d'onde de taille macroscopique et, lorsque deux ondes semblables se chevauchent, elles interfèrent : les deux ondes disparaissent dans les régions de l'espace où les interférences sont



2. LES INTERACTIONS des atomes qui constituent un condensat déterminent sa forme et sa taille. Quand on ajuste les forces pour qu'elles passent de répulsives (*en bas*) à quasi nulles (*en haut*), le condensat évolue. Dès qu'elles deviennent faiblement attractives, le condensat s'effondre, puis explose.



En haut : S. Raoult ; 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 orange 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,