

«contient» de nombreuses composantes de vitesses différentes ; une grande précision sur la position d'une particule entraîne une grande imprécision sur sa vitesse, et réciproquement.

Lorsque l'on refroidit les atomes d'un gaz, on diminue leur vitesse. Quand leur température tend vers le zéro absolu, les effets quantiques dus

au principe d'indétermination d'Heisenberg se révèlent. Puisque l'on force les fonctions d'onde des atomes à adopter des vitesses proches de zéro, et par conséquent, bien déterminées, leur localisation diminue et leur position devient «floue». Les fonctions d'ondes de différents atomes finissent par se recouvrir.

La condensation dans tous ses états

La condensation de Bose-Einstein est à l'œuvre dans plusieurs phénomènes que les physiciens connaissaient bien avant 1995, date de la création des premiers condensats atomiques.

L'hélium superfluide

Lorsque l'on refroidit de l'hélium 4 au-dessous de 2,2 kelvins, il devient superfluide, c'est-à-dire qu'il s'écoule sans la moindre viscosité. On fabrique ainsi des «fontaines d'hélium» (*en bas*) : les forces de capillarité (qui font adhérer le fluide à la paroi du récipient) et un léger chauffage suffisent à vaincre la gravité, de sorte que le liquide jaillit spontanément. Dans cet état superfluide, près de dix pour cent des atomes d'hélium subissent une condensation de Bose-Einstein. Les interactions nombreuses et intenses entre les atomes du liquide rendent très difficile l'étude détaillée de la fraction condensée, tant au niveau théorique qu'expérimental. La création et l'étude de condensats «purs» devrait permettre de faire progresser notre compréhension des états superfluides.

Les lasers

Un faisceau laser peut être considéré comme un condensat de Bose-Einstein fait de photons. Dans la lumière ordinaire – telle celle qu'émet une ampoule usuelle –, les ondes associées aux photons sont indépendantes : leurs longueurs d'onde et leurs phases sont sans corrélation. Au contraire, dans un laser, toutes ces ondes sont «en phase», c'est-à-dire que les photons sont tous dans le même état quantique.

Les supraconducteurs

La condensation de paires d'électrons engendre des propriétés de supraconduction, c'est-à-dire que le courant électrique circule sans aucune résistance. Les électrons étant des fermions, ils ne devraient pas former de condensats de Bose-Einstein, constitués de bosons. Toutefois, dans certaines circonstances – par exemple, lorsqu'on refroidit de l'aluminium à 1,2 kelvin –, les électrons du métal se rassemblent en paires dont le spin est entier. Ces paires d'électrons sont des bosons et ne tardent pas à subir une condensation de Bose-Einstein. De même que les atomes de l'hélium superfluide ne peuvent être mis en mouvement individuellement (le superfluide restant, par conséquent, immobile),

les paires condensées ne peuvent heurter individuellement les atomes du métal, et le courant progresse sans résistance. De façon analogue, même si les atomes d'hélium 3 sont des fermions, on peut obtenir de l'hélium 3 superfluide lorsque les atomes s'associent par paires de spin entier.

Les excitons

Dans les matériaux semi-conducteurs, un déficit localisé d'électrons équivaut à une particule positivement chargée que l'on nomme «trou». Un trou et un électron formés à l'aide d'une impulsion laser peuvent s'apparier brièvement pour former une sorte d'atome exotique, nommé «exciton». Tout comme les électrons appariés dans un métal supraconducteur, ces excitons ont un spin entier et se comportent en bosons. En 1993, on a observé indirectement la formation d'un éphémère condensat d'excitons au sein d'un semi-conducteur d'oxyde de cuivre.

UNE FONTAINE D'HÉLIUM, déclenchée par un anneau de chauffage, est un exemple spectaculaire de superfluidité.



J. Allen, R. Donnelly

Selon le troisième concept, il existe deux grandes familles de particules, les bosons et les fermions. Les fermions sont «individualistes» : deux fermions ne peuvent se trouver simultanément dans un même état quantique. Ainsi, la probabilité que deux fermions se trouvent au même endroit est nulle. Au contraire, les bosons sont dotés d'un «instinct grégaire». Lorsque les fonctions d'onde de deux bosons se recouvrent, elles peuvent se «concentrer» dans la zone commune. Dans une assemblée constituée de nombreux bosons, les particules sont susceptibles de s'accumuler en un seul et même état quantique : c'est le phénomène de condensation de Bose-Einstein.

Comment des atomes, constitués de particules de matière, tels des électrons et des protons, c'est-à-dire de fermions, peuvent-ils subir cette condensation ? En raison du quatrième concept, le statut de boson ou de fermion d'une particule dépend de la valeur de son spin (une grandeur quantique dont l'équivalent classique serait la rotation de la particule sur elle-même). Les particules de spin entier sont des bosons, celles de spin demi-entier sont des fermions. Le spin d'un édifice de particules, un atome par exemple, est calculé en combinant les spins de tous ses constituants. Certains atomes ont un spin global entier et adoptent le mode de vie des bosons, bien qu'ils soient constitués de fermions. En vertu de ces quatre principes, quand on refroidit de tels atomes au voisinage du zéro absolu, ils se rassemblent en condensats de Bose-Einstein.

Ce type de condensat est 100 000 fois plus gros que le plus gros des atomes ordinaires, plus gros même que les cellules de l'organisme humain. Par conséquent, les physiciens peuvent observer son comportement quantique par des méthodes classiques. Une simple photographie de condensat n'est autre que l'image de la fonction d'onde quantique commune à l'ensemble des atomes du condensat.

Les premiers condensats de Bose-Einstein en phase gazeuse créés en laboratoire datent de 1995, soit 70 ans après que le phénomène a été prédit par Albert Einstein à partir des travaux du physicien indien Satyendra-nath Bose. Les expérimentateurs créent ces condensats dans des pièges magnéto-optiques, des dispositifs

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.

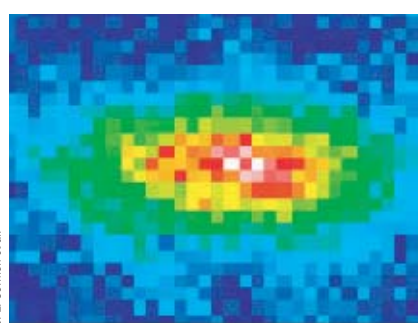
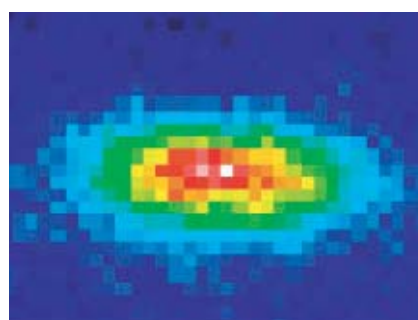
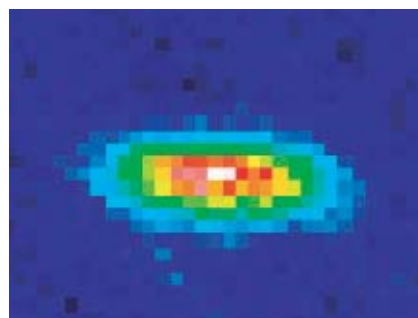
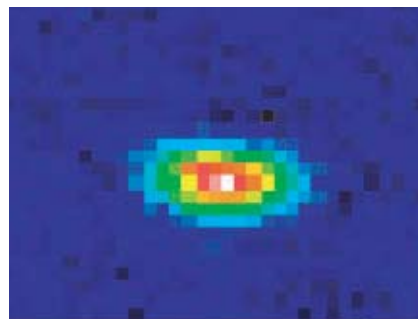
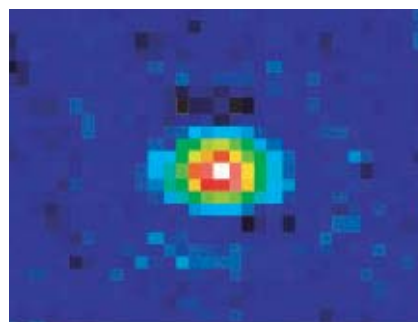
Lorsque la vitesse de rotation atteint un certain seuil, le récipient parvient toutefois à communiquer au liquide une certaine rotation, que les physiciens nomment un moment cinétique. Au sein du fluide, cette rotation se manifeste par l'apparition d'un tourbillon, ou vortex. Lorsque l'on augmente la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