

«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