

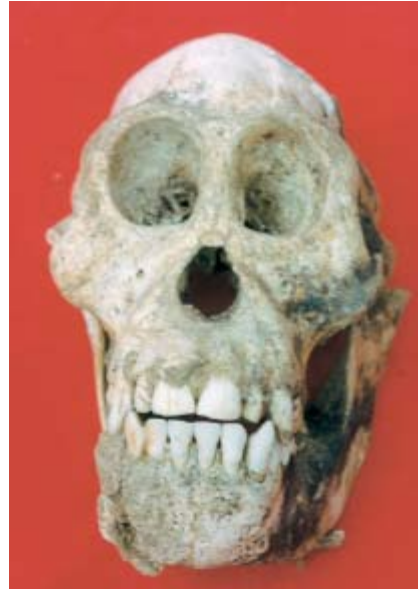
cène. Dans la partie de l'Asie qui nous intéresse, les terres émergées formaient le plateau de Sunda. L'Australie et la Papouasie formaient le plateau de Sahul, indépendant. Ce n'est qu'à la fin de cette période, il y a 10 000 ans, que l'immersion de Sunda, due à une remontée des eaux de 120 mètres, a modelé le continent eurasiatique tel qu'on le connaît aujourd'hui. La mer a séparé du continent les îles de l'Indonésie. Ces mouvements expliquent comment les faunes mammaliennes ont été morcelées et isolées géographiquement : certaines populations sont restées sur le continent, d'autres sur les îles.

Parallèlement au niveau des mers, le climat en Asie a aussi influé sur la distribution des zones subtropicales et tropicales où vivaient les orangs-outans. Ces zones ont été repoussées à la fois vers l'Est et vers le Sud : le recul des orangs-outans vers le Sud semble coïncider avec le recul de ces zones tropicales. Ces bouleversements ont aussi agi sur la répartition des grands mammifères et des autres primates, chaque espèce ayant évolué en fonction de ses capacités à s'adapter à ces changements environnementaux.

Une faible adaptabilité

L'équipe de Nina Jablonski, de l'Académie des sciences de Californie, a mis en évidence la variété des adaptations des primates aux modifications de l'environnement. Au Pléistocène inférieur, les gibbons, les orangs-outans et les gigantopithèques, une espèce de grand singe aujourd'hui disparue, occupaient essentiellement les zones tropicales, alors que les singes cercopithèques (les macaques et les colobes) et les hommes avaient une répartition plus étendue vers le Nord, dans les zones subtropicales. Au Pléistocène moyen, avec le recul de la forêt tropicale, l'aire de répartition des gibbons et des orangs-outans s'est concentrée vers le Sud. Au Pléistocène supérieur, alors que les cercopithèques et les hommes s'étendaient vers le Nord et s'adaptaient aux zones tropicales autant que tempérées, et jusqu'aux montagnes enneigées, les orangs-outans, plus vulnérables, se raréfiaient et ne survivaient que dans les zones qui deviendront les îles de Bornéo et de Sumatra lorsque le niveau des mers remontera à la fin du Pléistocène supérieur.

La présence de l'homme a également participé à la disparition de certaines populations d'orangs-outans. Par



4. LE SEUL SQUELETTE complet d'un orang-outan adulte a été trouvé dans une grotte, à Hoà Binh, au Vietnam, à quelques kilomètres de Hanoi. Il s'agit probablement d'une femelle (crâne de face et de profil).

exemple, de nombreux restes d'orangs-outans ont été trouvés dans des grottes de Sarawak et de Sabah, sur l'île de Bornéo. Ils ont vraisemblablement été la proie de chasseurs. De plus, il y a encore peu de temps, la tribu des Dayaks, à Bornéo, tuait les orangs-outans, des proies faciles en raison de leur lenteur, pour en consommer la chair. La vulnérabilité de ces grands singes a sans doute été un facteur important de raréfaction, voire de disparition. Toutefois, l'intervention de l'homme n'explique pas à elle seule l'éradication de ce primate sur le continent.

Ce primate serait-il plus fragile que les autres ? R. Delgado et C. van Shaik ont dressé l'inventaire des particularités anatomiques et physiologiques qui mettent en péril la survie de cette espèce : une durée de gestation longue et une première gestation tardive ; un intervalle de temps entre les naissances très long, jusqu'à huit ans ; le besoin d'une nourriture abondante et riche en calories ; un régime alimentaire composé principalement de fruits et de jeunes feuilles. Ces caractéristiques contrastent avec le taux de reproduction élevé et la nourriture plus variée des cercopithèques, ainsi plus aptes à s'adapter aux changements.

N. Jablonski avance d'autres arguments. Un poids élevé et un cerveau

volumineux imposent aux orangs-outans une nourriture abondante et énergétique : ils ne peuvent survivre dans une forêt où l'alternance de saisons trop contrastées prédomine. Quand les fruits se raréfient, les animaux ne peuvent maintenir leur poids. La première reproduction des femelles est alors retardée et la survie de l'espèce menacée.

Pour d'autres primatologues, les principaux facteurs qui fragiliseraient les orangs-outans sont une faible densité de population, la nécessité de parcourir une grande superficie pour la recherche de la nourriture, ou encore une localisation des populations aux basses latitudes.

Quoi qu'il en soit, une forte spécialisation, alimentaire notamment, serait la cause la plus vraisemblable d'un manque de plasticité adaptative lors des variations des conditions climatiques et environnementales.

Si l'on postule que les populations d'orangs-outans du Pléistocène avaient les mêmes caractéristiques que les populations actuelles, leur manque d'adaptabilité aux changements drastiques du climat qui ont eu lieu il y a quelque 10 000 ans expliquerait leur disparition des terres continentales de l'Asie du Sud-Est.

Anne-Marie BACON est paléontologue dans l'UPR 2147 du CNRS, «Dynamique de l'évolution humaine».

Nina JABLONSKI, M. WHITFORT, X. QIN-QI et N. ROBERTS-SMITH, *The influence of life history and diet on the distribution of catarrhine primates during the Pleistocene in eastern Asia*, in *Journal of Human Evolution*, n° 39, pp. 131-157, 2000.

A.-M. BACON et Vu THE LONG, *The first discovery of a complete skeleton of an orang-utan in a cave of the Hoà Binh Province, Vietnam*, in *Journal of Human Evolution*, n° 41, pp. 227-241, 2001.

R.A. DELGADO et C.P. van SHAIK, *The behavioral Ecology and conservation of the Orang-utan : A tale of two islands*, in *Evolutionary Anthropology*, pp. 201-218, 2001.

D'étranges objets quantiques

GRAHAM COLLINS

À l'échelle macroscopique, les condensats de Bose-Einstein révèlent les étranges comportements des objets quantiques.

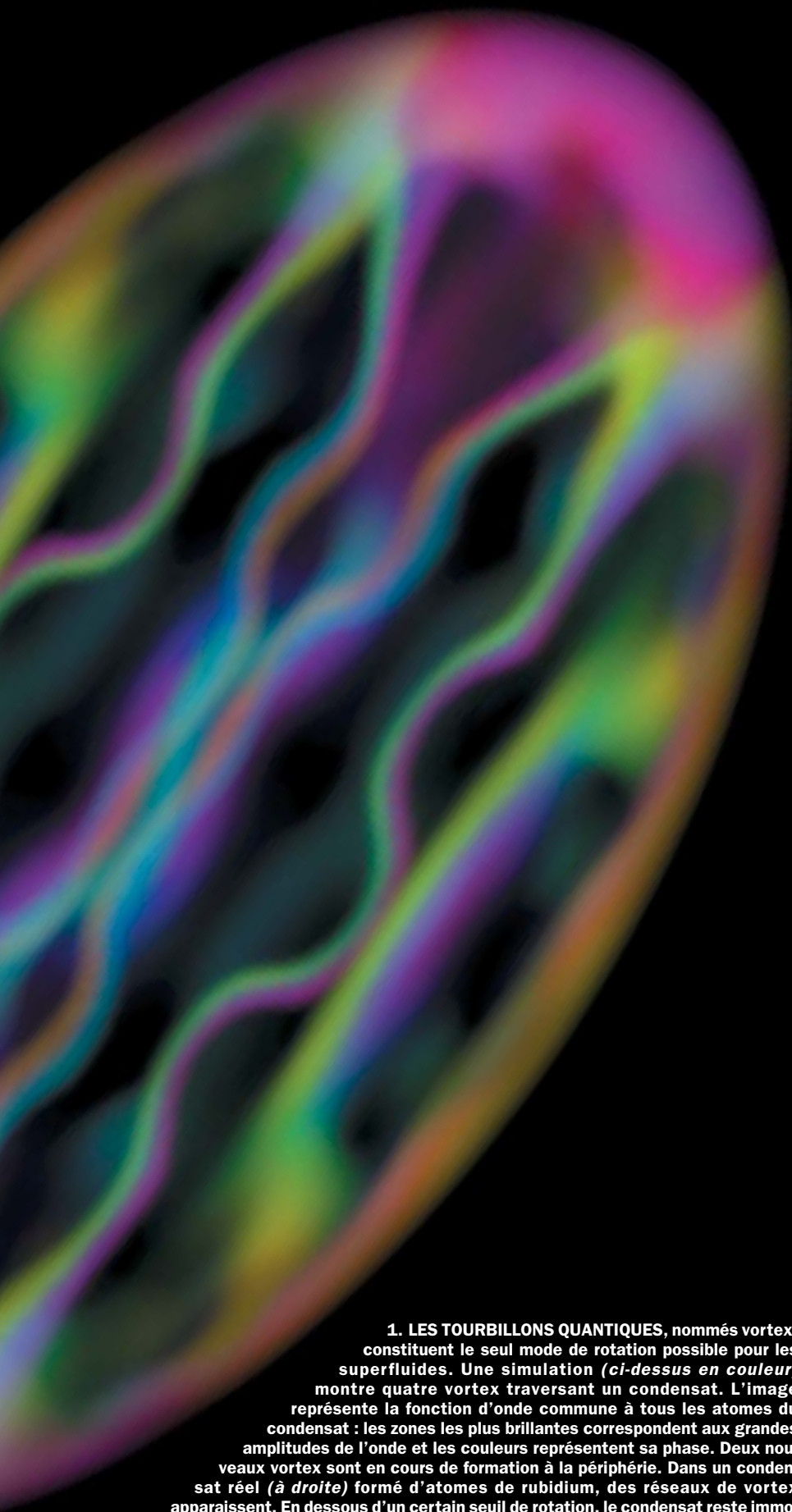
A la fin des années 1940, pour instruire ses lecteurs de la physique moderne, le physicien américain d'origine russe George Gamow, écrivit une série de livres intitulée *Les aventures de Monsieur Tompkins*. Il projetait son héros dans des contrées mystérieuses où les constantes fondamentales, par exemple la vitesse de la lumière ou la constante de Planck, prenaient des valeurs accessibles à l'entendement humain. Grâce à cet artifice, Monsieur Tompkins vivait au quotidien des effets relativistes ou quantiques. Par certains aspects, les condensats de Bose-Einstein font du rêve de Gamow une réalité : ce sont des manifestations à l'échelle humaine de phénomènes quantiques.

Imaginons Monsieur Tompkins réduit à la taille d'une molécule et plongé dans un des nuages de gaz où les physiciens fabriquent les condensats de Bose-Einstein. Les atomes lui apparaissent comme des billes de verre insécables, s'entrechoquant continuellement. Dans un premier temps, la vitesse des billes diminue, les distances qui les séparent décroissent et la densité du gaz augmente à mesure qu'il se refroidit. Puis les billes elles-mêmes changent d'aspect : les plus lentes deviennent troubles et un millier de fois plus «grosses», et les atomes deviennent fantomatiques. Au centre du nuage, deux des atomes parmi les plus lents et les plus nébuleux s'enveloppent mutuellement et semblent fusionner, formant un unique globule qui absorbe d'autres atomes, d'abord par petits groupes, puis par dizaines, jusqu'à ce que, soudain, il ne subsiste plus du nuage qu'une énorme bulle immobile. Quel est cet objet mystérieux ? Un «condensat de Bose-Einstein». Bien que les atomes qui le constituent aient conservé leur existence propre, ils ont perdu leur individualité.

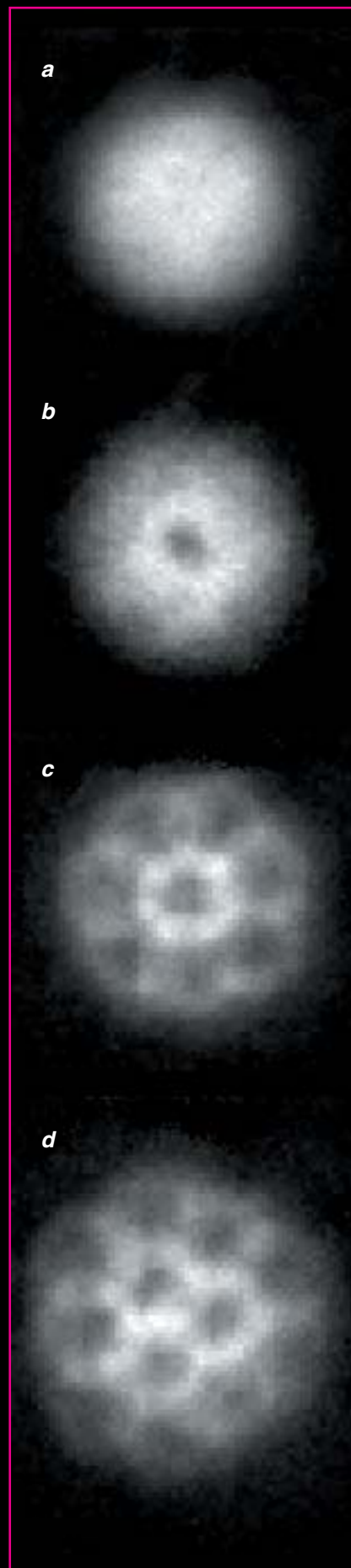
La mécanique quantique gouverne le monde. La plupart du temps, lorsque des myriades de particules sont en jeu, leurs étranges comportements quantiques se compensent mutuellement, créant ainsi la façade de physique classique que nous considérons comme la réalité.

La formation d'un condensat de Bose-Einstein repose sur quatre concepts fondamentaux qui régissent le monde quantique. Tout d'abord, les particules ne sont pas seulement de simples entités ponctuelles, mais se comportent aussi comme des ondes. Toute l'information qu'il est possible de connaître sur une particule est contenue dans une «onde de probabilité» que l'on nomme fonction d'onde de la particule : en chaque point de l'espace, l'amplitude de la fonction d'onde d'un électron, par exemple, donne sa probabilité de présence.

Le deuxième concept fut découvert en 1926 par le physicien allemand Werner Heisenberg. Il stipule que certains couples de grandeurs physiques ne peuvent être simultanément déterminés avec une précision parfaite. De même qu'une impulsion (lumineuse ou sonore) est un mélange de plusieurs fréquences, la fonction d'onde d'une particule



1. LES TOURBILLONS QUANTIQUES, nommés vortex, constituent le seul mode de rotation possible pour les superfluides. Une simulation (*ci-dessus en couleur*) montre quatre vortex traversant un condensat. L'image représente la fonction d'onde commune à tous les atomes du condensat : les zones les plus brillantes correspondent aux grandes amplitudes de l'onde et les couleurs représentent sa phase. Deux nouveaux vortex sont en cours de formation à la périphérie. Dans un condensat réel (*à droite*) formé d'atomes de rubidium, des réseaux de vortex apparaissent. En dessous d'un certain seuil de rotation, le condensat reste immobile (*a*). Une fois ce seuil franchi, un vortex apparaît (*b*). L'augmentation de la rotation engendre de nouveaux vortex (*c et d*).



À gauche : D. Feder et P. Kéicham ; à droite : K. Madison, Laboratoire Kastler-Brossel

«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.

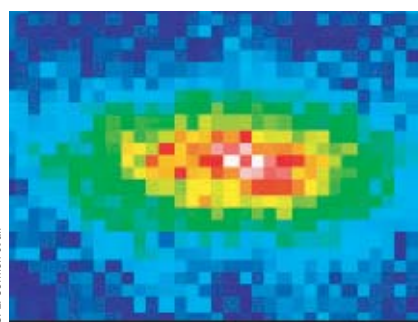
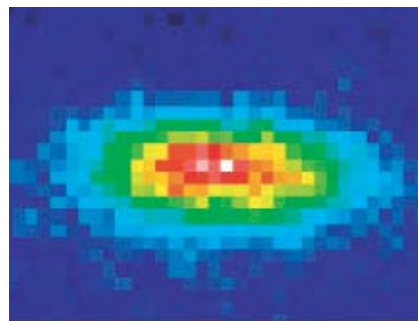
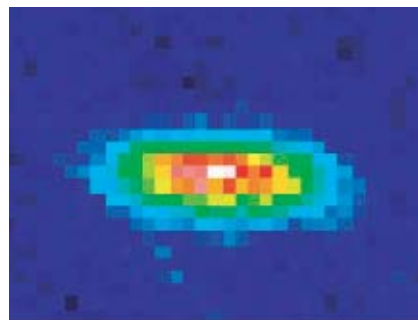
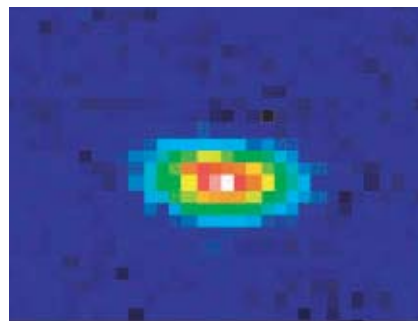
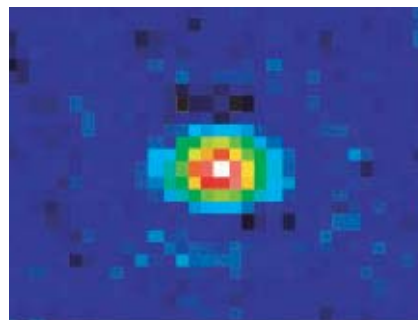
Lorsque la vitesse de rotation atteint un certain seuil, le récipient parvient toutefois à communiquer au liquide une certaine rotation, que les physiciens nomment un moment cinétique. Au sein du fluide, cette rotation se manifeste par l'apparition d'un tourbillon, ou vortex. Lorsque l'on augmente la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

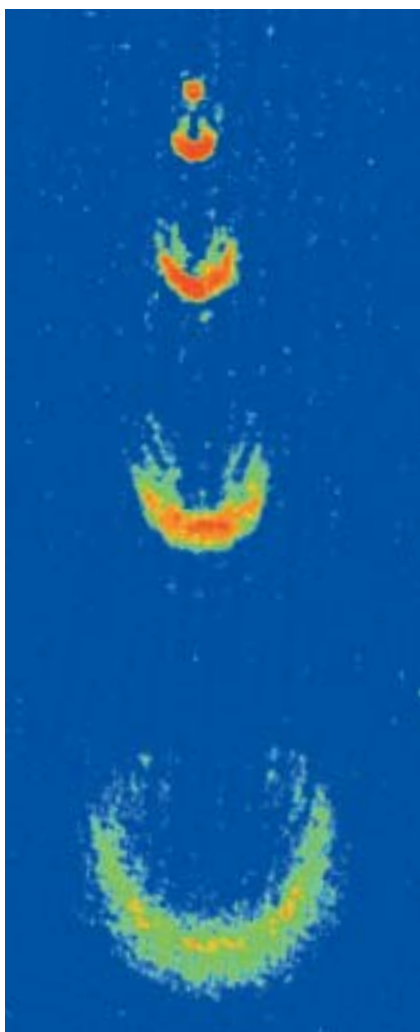
l'hélium superfluide, est manifeste dans les condensats. L'apparition des vortex traduit le fait que les atomes d'un condensat sont tous dans le même état quantique et, par conséquent, ont tous le même moment cinétique. De plus, en mécanique quantique, on montre que le moment cinétique est une grandeur 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.



En haut : S. Raiston ; 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.

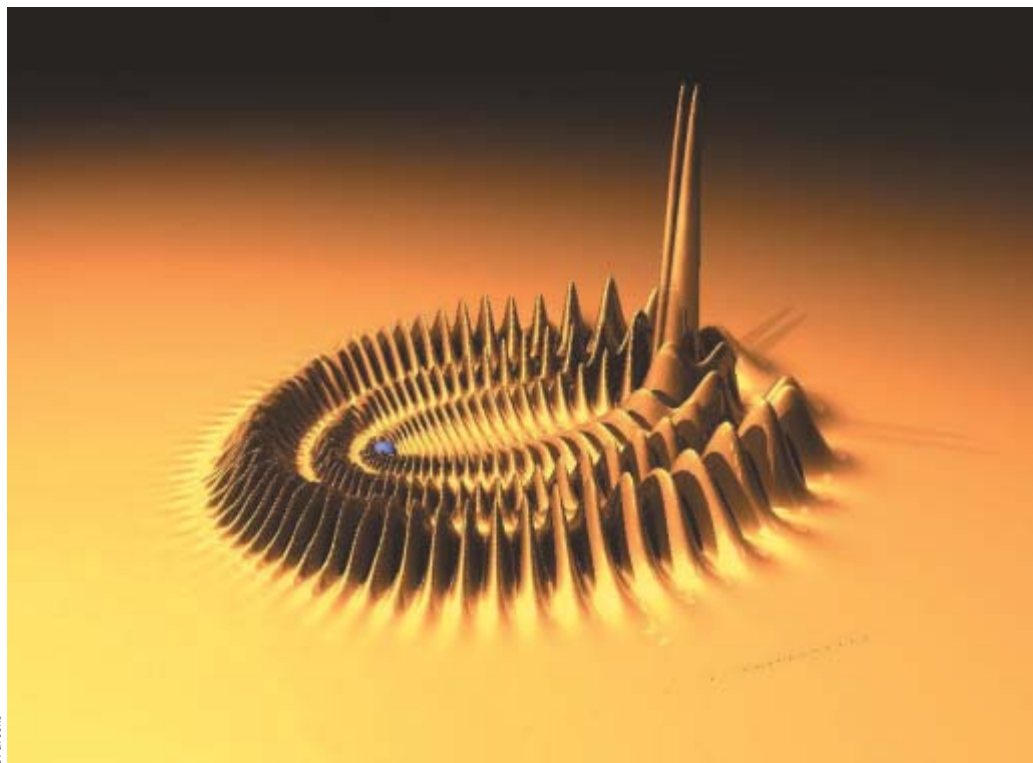
Lorsque l'on diminue progressivement la répulsion entre les atomes de rubidium, des effets spectaculaires se produisent : les condensats rétrécissent peu à peu et deviennent de plus en plus denses. Cinq millise-

condes environ après que les interactions sont redevenues attractives, les condensats implosent – phénomène que C. Wieman nomme avec humour «Bosenova», faisant référence aux supernovae qui marquent la fin des étoiles massives dont leur cœur s'effondre sur lui-même avant d'exploser. Dans le cas des condensats, ces implosions éjectent du piège environ un tiers des atomes : il ne reste alors qu'un reliquat de condensat entouré d'un nuage d'atomes plus chauds (si tant est que l'on puisse qualifier de «chaude» une température de 100 milliardièmes de kelvins).

Un avenir «lumineux»

Les étranges propriétés des condensats de Bose Einstein en font des objets d'étude fascinants. Manifestations macroscopiques des lois quantiques, ils se comportent comme des «ondes de matière». Leurs propriétés fluides sont mises en évidence par l'étude des vortex, alors que les lasers atomiques révèlent leurs comportements ondulatoires. Dans tous les cas, l'image classique qui assimile les condensats à des nuages de petites billes dures est trop naïve pour expliquer leurs propriétés.

Les condensats pourraient trouver des applications en optique non linéaire, l'étude des phénomènes au cours desquels la lumière interagit avec elle-même. Dans ce domaine de recherche aux applications importantes, par exemple pour la construction de processeurs d'information entièrement optiques, les chercheurs sont souvent gênés par les intensités importantes nécessaires à l'obtention d'effets notables. Comme les atomes interagissent beaucoup plus facilement que les photons, des effets analogues peuvent être obtenus avec de faibles intensités lorsque l'on remplace les faisceaux lumineux par des lasers atomiques : les condensats de Bose-Einstein pourraient devenir des outils intéressants pour l'étude des phénomènes non linéaires. Par ailleurs, ils ont déjà permis à plusieurs équipes d'obtenir des impulsions lumineuses ralenties (à quelque 17 mètres par seconde). Plus étonnant encore, selon Wayne Hui et ses collègues de l'Université Princeton, la physique des condensats aidera peut-être les cosmologistes à comprendre l'origine de la «matière sombre» qui



4. LA «MOLÉCULE TRILOBITE», constituée de deux atomes de rubidium, illustre la quête des physiciens : découvrir les plus gros objets susceptibles de subir une condensation de Bose-Einstein. Elle est 1 000 plus grosse qu'une molécule diatomique normale (les pics dorés indiquent la densité du nuage électronique formé par les deux électrons de liaison ; la bille violette représente l'un des atomes, l'autre est masqué par les deux «tours jumelles»). Les physiciens pensent que, sous l'action d'une excitation laser appropriée, elle est susceptible de se former à l'intérieur d'un condensat. Dans certains condensats, des techniques lasers similaires ont permis d'obtenir des molécules ultrafroides ordinaires. L'objectif est de découvrir si l'on peut réaliser un condensat formé de molécules plutôt que d'atomes.

constitue près de 90 pour cent de la masse de l'Univers. Selon W. Hui, ses propriétés pourraient s'expliquer s'il s'agissait d'un gigantesque condensat de Bose-Einstein, omniprésent dans l'Univers et constitué de particules de très faible masse.

Enfin, les chercheurs s'intéressent aujourd'hui aux fermions eux-mêmes. Les fermions ne sont pas susceptibles de se condenser, mais, dans certains cas, ils peuvent s'associer, à basse température, en paires de spin entier. Ces paires sont des bosons capables de condensation. Jusqu'ici, la réalisation de condensats à partir de gaz de fermions s'est

révélée ardue. L'instinct «individualiste» de ces particules les empêche d'interagir notablement et les échanges thermiques qui permettent d'obtenir les très basses températures nécessaires ne peuvent avoir lieu. Toutefois, Christophe Salomon, de l'École normale supérieure, à Paris, pense que la condensation de paires de fermions sera possible si l'on plonge les particules dans un «bain» de bosons froids capable d'abaisser leur température. Lorsque les physiciens y parviendront, ils auront la possibilité de fabriquer des fonctions d'onde macroscopiques avec les deux familles de particules de l'Univers.

Graham COLLINS est journaliste à *Scientific American*.

E. Cornell et C. Wieman, *La condensation de Bose-Einstein*, in *Pour la Science*, n° 247, mai 1998.

Daniel KLEPPNER, *The Yin and Yang of Hydrogen*, in *Physics Today*, vol. 52, n° 4, avril 1999.

K. HELMERSON, W. PHILLIPS, K. BURNETT et D. HUTCHINSON, *Atom lasers*,

in *Physics World*, vol. 12, n° 8, août 1999.

Y. CASTIN, R. DUM et A. SINATRA, *Bose condensates make quantum leaps and bounds*, in *Physics World*, vol. 12, n° 8, août 1999.

W. KETTERLE, *Experimental studies of Bose-Einstein condensation*, in *Physics Today*, vol. 52, n° 12, décembre 1999.

Lene V. HAU, *La lumière ralentie*, in *Pour la Science*, n° 287, septembre 2001.

Le commerce des poissons d'aquarium

SARAH SIMPSON

La pêche au cyanure utilisée pour attraper des poissons exotiques menace la plupart des récifs coralliens de l'Asie du Sud-Est. Une meilleure gestion du commerce international de ces poissons devrait préserver un écosystème fragile.

Le cyanure est un poison rapide : dès qu'il est absorbé, il bloque la respiration des cellules dans l'organisme, de sorte que les tissus sont rapidement asphyxiés. À des doses élevées, il ralentit le cœur et arrête l'activité électrique du cerveau. Le cyanure est mortel, mais il est pourtant utilisé pour capturer des poissons vivants dans les récifs coralliens. Cette pratique est courante en Indonésie et aux Philippines, où la collecte fournit environ 85 pour cent des poissons tropicaux qui peuplent les aquariums marins du monde entier.

Les plongeurs immobilisent les poissons avec du cyanure pour les attraper facilement, mais les conséquences sont graves. Lorsqu'ils lâchent du cyanure sur un récif corallien, la moitié des poissons empoisonnés meurt, et 40 pour cent de ceux qui survivent meurent avant d'atteindre un aquarium. Ce taux de mortalité ne tient pas compte des ravages produits sur les coraux, ni sur les invertébrés ni sur les autres poissons touchés par le poison.

La pêche au cyanure n'est pas la seule activité humaine qui détruit les récifs coralliens, mais dans les eaux d'Asie du Sud-Est, elle représente l'un des principaux fléaux. Cette région abrite presque 30 pour cent des coraux de la planète, et la diversité de la vie marine y est la plus élevée dans le monde. Seuls un peu plus de quatre pour cent des récifs des Philippines et à peine sept pour cent de ceux d'Indonésie sont encore en «bonne santé» : ils sont aussi devenus la cible privilégiée des pêcheurs.

Depuis près de 20 ans, les pays exportateurs font des efforts pour réglementer le commerce dévastateur des poissons d'aquarium, mais sans grand succès. Une nouvelle stratégie se met actuellement en place et vise davantage les pays importateurs, les détaillants et les acheteurs. Une organisation non gouvernementale (*Marine Aquarium Council*) participe à la sauvegarde de quelques-uns des derniers récifs. Elle cherche à

garantir que les poissons marins vendus chez les détaillants ont été pêchés dans le respect des règles écologiques. Les premiers poissons certifiés «pêchés écologiquement» seront bientôt sur le marché. Cette organisation met aussi en place un étiquetage spécifique et cherche à faire en sorte que l'on connaisse l'origine des poissons d'aquarium. Les espèces de poissons qui peuvent être élevées en captivité sont rares, de sorte que l'avenir des aquariums amateurs dépend de la préservation des récifs coralliens. Les aquariophiles le savent bien et achèteront de préférence des poissons «certifiés». Aujourd'hui, les détaillants n'ont aucun moyen de connaître l'origine exacte des poissons qu'ils achètent aux importateurs. En outre, des informations contradictoires circulent et l'on ignore l'étendue de l'utilisation de la pêche au cyanure.

Un commerce récent

L'utilisation du cyanure de sodium pour la capture des poissons d'aquarium a commencé en 1957, aux Philippines. En 40 ans, les pêcheurs ont jeté plus d'un millier de tonnes de cyanure sur les récifs des Philippines, selon une estimation de l'Alliance internationale pour la vie marine, une organisation non gouvernementale fondée en 1985 pour lutter contre l'extension des pratiques de pêche destructrices dans la région. La pêche au cyanure a été interdite dans la majeure partie du Sud-Est asiatique, et, en 1975, un décret présidentiel philippin a déclaré illégal le fait de pêcher au cyanure, d'en avoir en sa possession sur un bateau et de vendre du poisson capturé par ce moyen. Les Philippines qui pêchent au cyanure encourrent une peine de plusieurs mois de prison. L'Indonésie a pris des mesures similaires. Pourtant, il reste quelques usages autorisés du cyanure, par exemple pour l'extraction de l'or, de sorte que l'importation de ce poison n'est pas strictement réglementée. Force est de constater que la pêche au cyanure se poursuit.

Pendant ces 15 dernières années, l'organisation a consacré plus de six millions de