

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.

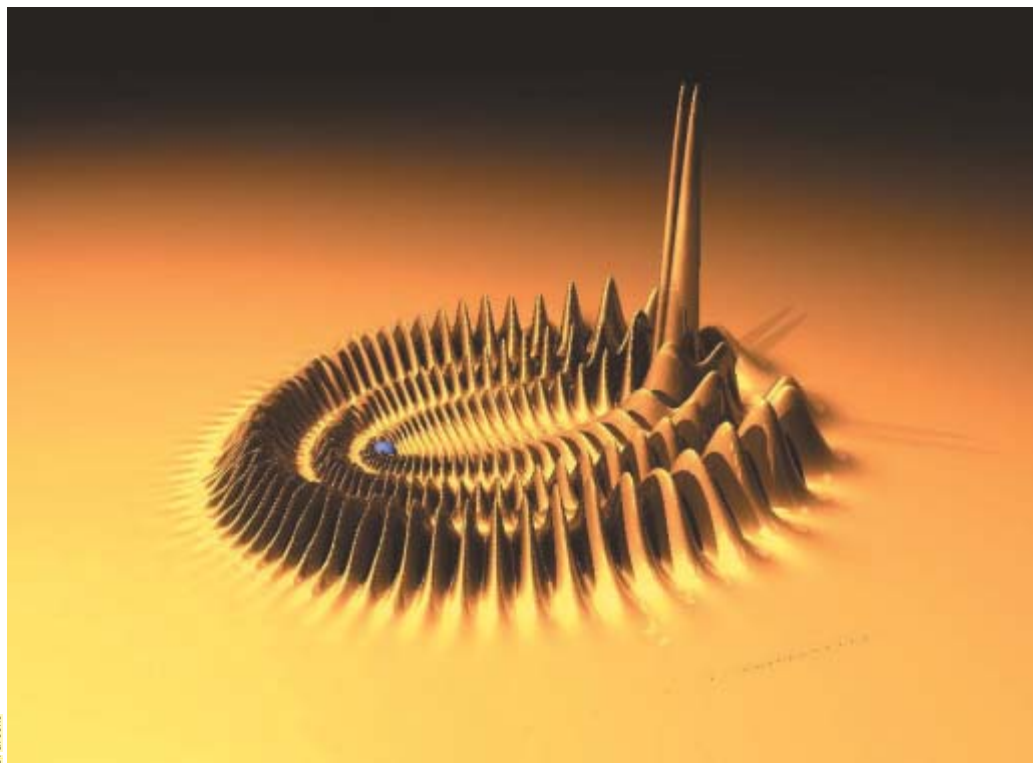
Lorsque l'on diminue progressivement la répulsion entre les atomes de rubidium, des effets spectaculaires se produisent : les condensats rétrécissent peu à peu et deviennent de plus en plus denses. Cinq millise-

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.