

La superfluidité des condensats

DAVID GUÉRY-ODELIN

Plusieurs expériences prouvent la superfluidité des condensats de Bose-Einstein, ce qui confirme les prédictions théoriques faites au début du XX^e siècle. Ces milieux permettent aux physiciens de mieux comprendre cet état de la matière où la viscosité disparaît.

« Cette théorie est jolie, mais contient-elle aussi quelque chose de vrai ? » Cette interrogation figure dans l'une des lettres qu'Albert Einstein écrit au physicien Paul Ehrenfest, après avoir prédit un nouvel état de la matière en 1925. Analysant le comportement des gaz parfaits à basse température, il prévoyait l'existence de gaz au sein desquels tous les atomes se trouveraient dans un même état d'énergie minimale. En 1995, ce nouvel état de la matière a été observé pour la première fois sur des gaz dilués refroidis à très basse température, quelque 70 ans après l'interrogation émise par Einstein : c'était le condensat de Bose-Einstein.

Par ailleurs, 12 ans après l'hypothèse d'Einstein, l'équipe de Willen Keesom à Leyde, aux Pays-Bas, découvrit qu'à basse température, l'hélium 4 liquide présente des propriétés spectaculaires. Refroidissant de l'hélium 4 (deux neutrons et deux protons) à quelques kelvins, les physiciens hollandais ont observé que ce liquide perd toute viscosité au-dessous de 2,17 kelvins. Les propriétés particulières du nouvel état de l'hélium liquide furent explorées dans la décennie qui suivit sa découverte, mais son origine restait un mystère. Le mot superfluidité fut introduit plus tard par le physicien russe Piotr Kapitza pour qualifier cet état de l'hélium. En 1938, Fritz London interpréta la superfluidité de l'hélium comme la manifestation de l'existence d'un condensat de Bose-Einstein au sein du liquide refroidi. Toutefois, il fondait l'origine de l'un des comportements les plus étranges de la matière sur l'existence d'un état quantique, dont doutait son inventeur lui-même !

Aujourd'hui, nous savons que son intuition était correcte. Les théoriciens ont montré que la formation d'une phase condensée constituée d'une fraction des atomes d'hélium peut expliquer la superfluidité du milieu ; de surcroît, on sait aujourd'hui préparer des condensats de Bose-Einstein en phase gazeuse. Encore fallait-il vérifier leur superfluidité ! Après avoir rappelé quelques caractéristiques des condensats de Bose-Einstein et l'origine de l'intuition géniale de London, nous décrirons quatre expériences récentes qui mettent en évidence le caractère superfluide des condensats de Bose-Einstein. Leur étude combinée améliore notre

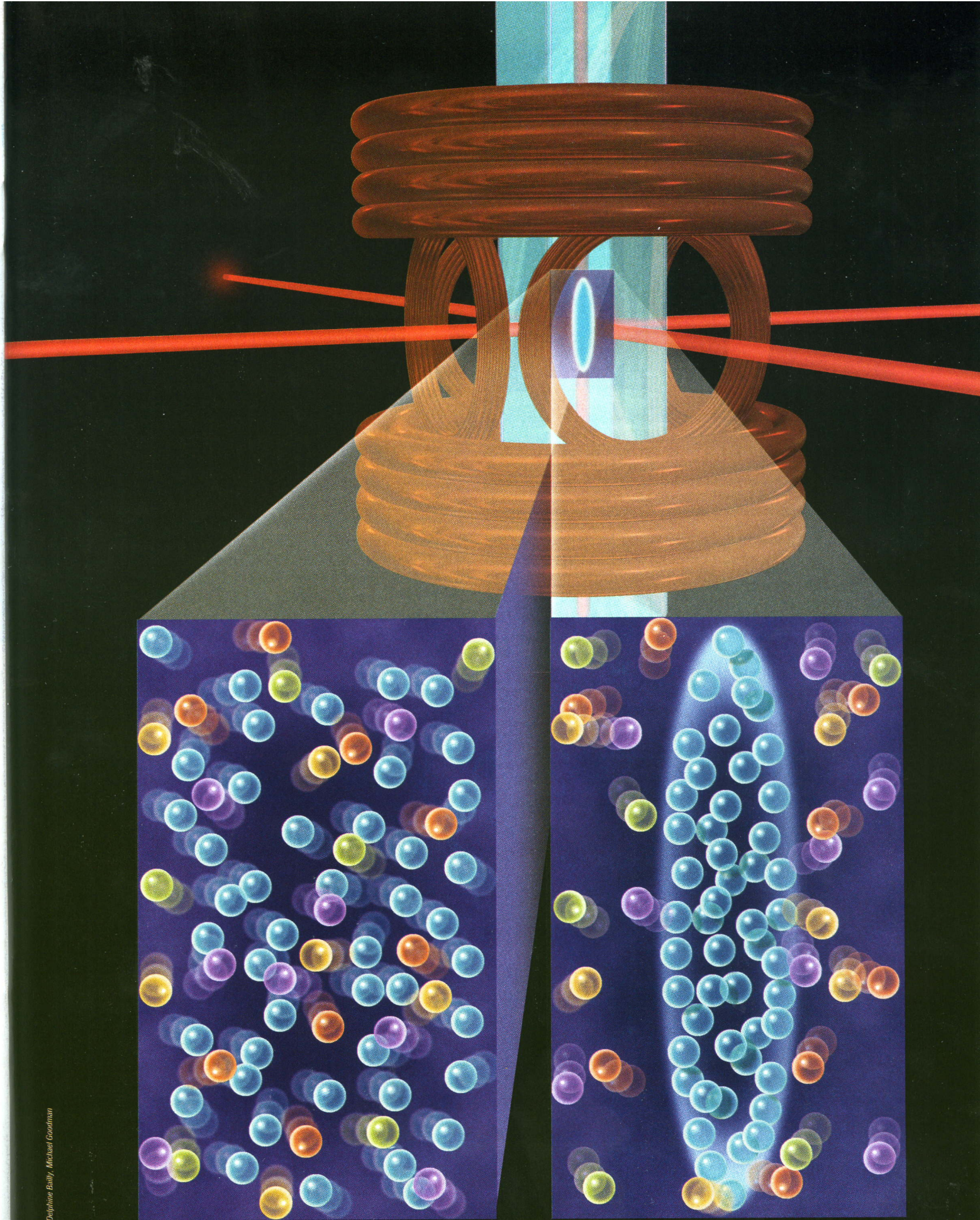
compréhension de la superfluidité. En effet, dans de tels milieux, les phénomènes quantiques se manifestent à l'échelle macroscopique.

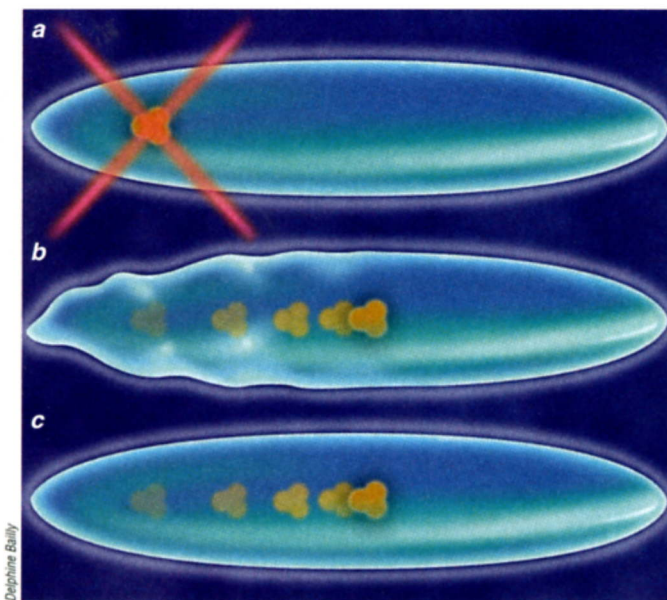
Fonction d'onde collective

Les physiciens divisent l'ensemble des particules quantiques en deux groupes : les fermions et les bosons. Seuls, des bosons peuvent se trouver dans le même état quantique. Tandis que le spin d'un fermion est demi-entier, celui d'un boson est toujours entier. Pour cette raison, le caractère bosonique ou fermionique d'un atome se déduit directement du nombre de particules qu'il contient. Ainsi, l'hélium 3 qui comporte un nombre impair de fermions (deux protons, un neutron et deux électrons) ne peut être qu'un fermion. Au contraire, l'atome d'hélium 4, qui est constitué de deux protons, de deux neutrons et de deux électrons, a un nombre pair de fermions : c'est un boson.

Ainsi, les bosons sont les seuls à pouvoir être ensemble dans le même état d'énergie minimale, l'état fondamental. Dans un condensat de Bose-Einstein, des atomes bosoniques, tels des « jumeaux », se trouvent tous ensemble dans l'état fondamental. La prédiction d'Einstein portait sur des gaz parfaits, c'est-à-dire sur des assemblées d'atomes bosoniques qui n'interagissent pas. Einstein imaginait ces atomes libres de se mouvoir dans une enceinte. Leur énergie individuelle est alors égale à leur énergie cinétique. À température nulle, tous ces atomes se retrouvent dans l'état fondamental, d'énergie nulle. Dans la pratique, les condensats de Bose-Einstein

1. L'ÉTUDE DE LA SUPERFLUIDITÉ dans les condensats de Bose-Einstein a amélioré notre compréhension de ce phénomène. On obtient ces condensats en laboratoire avec des gaz dilués d'atomes d'alcalins que l'on refroidit. Ces atomes sont refroidis par des rayons laser, puis par évaporation dans un piège magnétique (en haut). Tant que les conditions ne sont pas réunies, par exemple que la température n'est pas assez basse, les atomes du milieu ont des vitesses et des directions différentes (en bas à gauche, chaque couleur correspond à une vitesse particulière des atomes). Quand la température passe au-dessous d'un microkelvin, un grand nombre d'atomes s'accumulent dans le même état : ils forment alors un condensat de Bose-Einstein (en bas à droite).





Delphine Bailly

2. UN GROUPE D'ATOMES excités est obtenu à l'aide de faisceaux laser (a) ; il se propage dans le condensat (b). Tant que la vitesse de cet «objet» microscopique est supérieure à une valeur critique, le condensat «résiste» à sa propagation et se déforme. Quand la vitesse du groupe d'atomes devient inférieure à la vitesse critique, le condensat «ignore» l'objet qui le traverse et cesse de se déformer (c).

apparaissent à une température assez élevée pour que des échanges d'énergie entre atomes subsistent. Malgré ces interactions, une phase constituée d'un grand nombre d'atomes bosoniques dans l'état fondamental apparaît. Cette phase condensée est décrite par une «fonction d'onde collective». Elle apparaît lorsque la «longueur d'onde de de Broglie» devient comparable à la distance moyenne entre les atomes.

Les condensats réels

Pour obtenir un condensat, les physiciens manipulent, sous très faible pression, des gaz d'atomes alcalins (bosoniques), tels le rubidium, le sodium ou le lithium. La première étape de refroidissement est assurée par un piège, dit magnéto-optique. Un gradient de champ magnétique créé par des bobines et six faisceaux laser qui se croisent au centre d'une chambre expérimentale, nommée cellule, permettent de «piéger» une assemblée d'atomes, qui est ensuite transférée dans un piège magnétique. Finalement, au prix de la perte d'une partie des atomes, on refroidit le nuage par «évaporation».

Cette opération est difficile. Les condensats gazeux obtenus depuis 1995 ont tous une densité de l'ordre de «seulement» 10^{20} atomes par mètre cube (la densité de l'hélium liquide est proche de 10^{27} atomes par mètre cube). À cette faible densité, la température de condensation (qui doit être atteinte) est inférieure à 0,000001 kelvin ! En outre, les condensats sont extrêmement instables : ils ne subsistent guère plus d'une minute après avoir été produits.

En 1938, les physiciens ignoraient tout de la préparation d'un condensat. London eut l'intuition d'un lien entre l'état prédit par Einstein pour les gaz de bosons et la superfluidité de l'hélium, parce que l'hélium 4 est un boson. Pour se rapprocher du cas considéré par Einstein, il assimila l'hélium 4 liquide à un gaz parfait de même densité, et il calcula sa température de condensation. Il obtint une valeur de 3,1 kelvins, proche de la température de transition vers l'état superfluide mesurée, qui est égale à 2,17 kelvins. London rap-

procha ainsi les observations expérimentales sur l'hélium liquide des prédictions théoriques d'Einstein. Néanmoins, il souligna lui-même la difficulté notable que posait son raisonnement : loin d'être un gaz sans interaction, tels ceux qu'Einstein considérait, l'hélium 4 est un liquide, c'est-à-dire un milieu où les interactions jouent un rôle prépondérant ! L'objection semblait alors imparable.

London avait raison : la superfluidité de l'hélium liquide s'explique par la formation d'un condensat de Bose-Einstein en son sein. Vers 1956, les physiciens américains Oliver Penrose et Lars Onsager démontrèrent qu'à cause des interactions interatomiques, moins de huit pour cent des atomes d'hélium 4 liquide participent à un tel condensat.

Les condensats de Bose-Einstein disponibles depuis 1995 représentent des instruments expérimentaux intéressants pour l'étude de la superfluidité. Comme les atomes de tout liquide, ceux de l'hélium interagissent beaucoup. Ces interactions complexes ont longtemps empêché les théoriciens de décrire précisément le mécanisme d'apparition de la superfluidité au sein de l'hélium liquide. En revanche, on peut modéliser les gaz dilués d'atomes en considérant qu'ils se comportent comme le ferait un gaz de sphères atomiques. Ainsi, la donnée d'un seul paramètre – le «rayon d'interaction» des atomes – suffit à décrire les interactions des atomes à très basse température.

Au-dessus de la température de condensation, ce rayon est de quelques nanomètres, alors que les atomes sont dix fois plus petits. Comme ce rayon peut être contrôlé grâce à des champs magnétiques, les physiciens sont en mesure, en le modifiant, de réaliser un condensat de Bose-Einstein au sens d'Einstein, c'est-à-dire où les interactions des atomes ont disparu.

Comment mettre en évidence la superfluidité des condensats ? Que ce soit en y déplaçant un obstacle ou en les faisant tourner, les atomes qui les composent se comportent différemment suivant qu'ils sont condensés ou pas. Cette situation crée plusieurs «effets de seuil». Les quatre expériences que nous allons décrire ont été conçues pour faire apparaître ces changements brusques. Étant donné la métastabilité des condensats de Bose-Einstein, toutes ont été réalisées pendant une durée inférieure à la seconde.

Confirmations expérimentales

Pour tester la viscosité d'un fluide ou, au contraire, l'absence de viscosité, on y déplace un obstacle. Lorsqu'on réalise cette expérience au sein d'un gaz classique (donc visqueux), on constate que l'obstacle est ralenti sous l'effet des collisions avec les atomes du gaz : de l'énergie est dissipée dans le milieu. Il en va autrement au sein d'un superfluide : en 1941, le physicien russe Lev Landau montra comment la réponse collective des atomes d'un superfluide supprime la dissipation d'énergie au-dessous d'un certain seuil de vitesse. Il établit qu'un obstacle microscopique cesse d'être freiné par le milieu superfluide quand sa vitesse de déplacement devient inférieure à une certaine vitesse critique. Plutôt que de considérer le comportement individuel des atomes comme le voudrait le raisonnement «classique», il considère leur comportement collectif. Si, dans l'hélium liquide, la prédiction par cette méthode de la vitesse critique est un problème épineux à cause des interactions au sein du fluide, elle est aisée dans un condensat de Bose-Einstein gazeux. On essaie donc

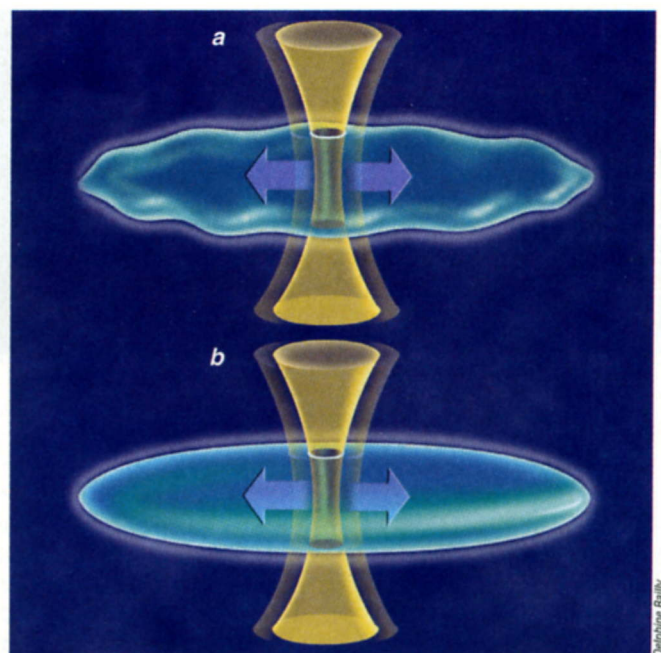
de comparer la valeur théorique de la vitesse critique de déplacement d'un obstacle dans un superfluide au résultat de la mesure de cette grandeur.

En 2000, l'équipe de Wolfgang Ketterle (prix Nobel de physique 2001), à l'Institut de technologie du Massachusetts, a réussi à déplacer un obstacle microscopique au sein d'un condensat de Bose-Einstein. Cet obstacle microscopique est un groupe d'atomes extraits du condensat à l'aide de faisceaux lumineux. La lumière permet, d'une part, de modifier les états internes de quelques atomes issus du condensat, afin de les distinguer des atomes condensés et, d'autre part, de leur communiquer une vitesse. Le paquet d'atomes ainsi extrait joue le rôle d'une sonde microscopique qui se déplace au sein du condensat. Qu'observe-t-on? Tant qu'il se déplace à une vitesse supérieure à une vitesse seuil, ce paquet d'atomes interagit avec le reste du condensat: il y a des frottements. En revanche, quand sa vitesse devient inférieure à ce seuil, tout se passe comme si le milieu au sein duquel le paquet d'atomes se déplace était absent. L'expérience révèle que la vitesse de seuil est de l'ordre de un centimètre par seconde, ce qui est en accord avec la prédiction théorique.

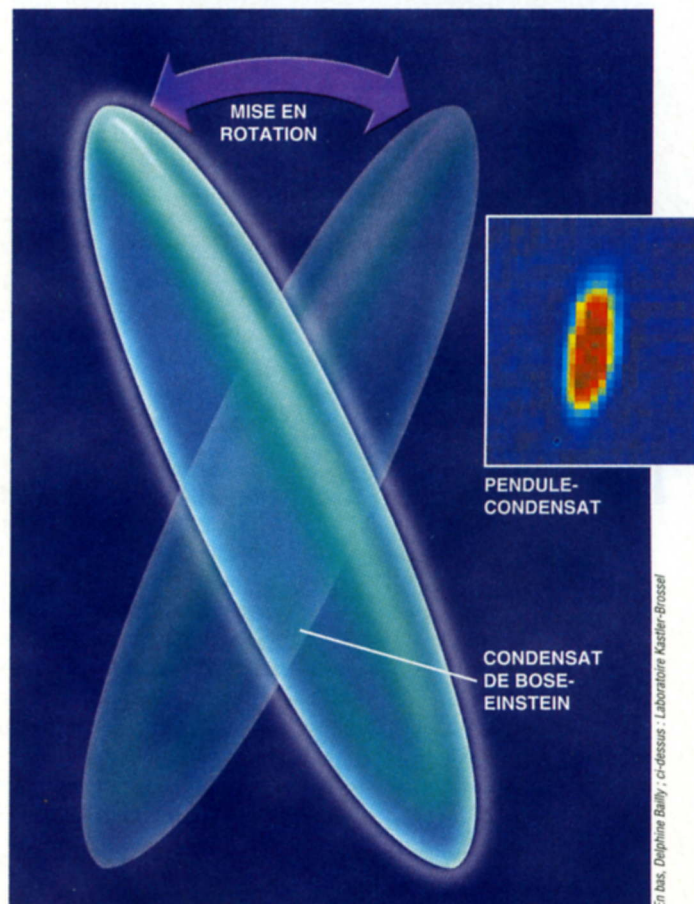
Vitesse de seuil

Obtiendrait-t-on des résultats comparables avec une sonde macroscopique? La même équipe a montré à l'aide d'une sonde lumineuse que c'est bien le cas. Un faisceau lumineux peut être perçu par les atomes environnants comme un milieu attractif ou répulsif. On observe cet effet quand l'énergie des photons est proche de l'énergie de l'une des transitions électroniques permises dans l'atome. Dans ce cas, le champ électrique de la lumière déforme le nuage électronique des atomes, ce qui se traduit par l'apparition d'un dipôle électrique induit. Suivant la fréquence de la lumière, l'interaction de ce dipôle atomique et du champ électrique de la lumière crée une force attractive ou répulsive. L'équipe américaine a choisi la fréquence de son pinceau lumineux, de sorte qu'il apparaisse comme un cylindre répulsif de dix micromètres de diamètre; elle a ensuite agité ce cylindre lumineux dans un condensat de 200 micromètres de longueur, un peu comme on agite un bâton dans un seau de peinture afin d'en estimer la viscosité. Une nouvelle fois, un effet de seuil se manifeste: au-dessus d'une certaine fréquence d'agitation, cette expérience met en évidence l'existence d'une vitesse critique analogue à celle prédite par Lev Landau pour les obstacles microscopiques, ce qui confirme une nouvelle fois la superfluidité du condensat.

Une autre façon de prouver la superfluidité est d'étudier le comportement d'un condensat en rotation. En collaboration avec Sandro Stringari, de l'Université de Trente, en Italie, nous avons proposé de mettre un condensat de forme oblongue en oscillation en l'inclinant d'un petit angle. Pour cela, nous modifions le dispositif de confinement afin que le condensat se retrouve en équilibre suivant un axe incliné. Puis, le confinement magnétique retrouve sa configuration d'origine, et le condensat se met à osciller, tel un bâton suspendu par son centre de gravité. Son énergie cinétique est proportionnelle à une grandeur qui est aux mouvements de rotation ce que la masse est aux mouvements de translation: le moment d'inertie. À la différence de la masse, le moment d'inertie dans un contexte quantique dépend de la distribution des vitesses au sein du nuage. On établit que,



3. UNE «CUILLÈRE OPTIQUE» est un faisceau lumineux qui repousse les atomes d'un gaz dilué (a). Des frottements apparaissent lorsqu'on déplace rapidement un tel obstacle macroscopique au sein d'un condensat de Bose-Einstein (b). Ces perturbations cessent quand on déplace la cuillère optique à une vitesse inférieure à une vitesse critique, pour laquelle le milieu semble disparaître.



4. CE NUAGE D'ATOMES oscille comme un pendule classique. Il condense lorsque la température est inférieure à la température critique et devient superfluide: sa fréquence d'oscillation augmente alors. Dans le cartouche, une image du condensat de Bose-Einstein oscillant a été enregistrée avec une caméra ultrasensible (CCD).



pour cette raison, le moment d'inertie est plus petit dans une phase condensée que dans une phase gazeuse (à répartition de masse identique). En conséquence, la fréquence d'oscillation d'un nuage de gaz visqueux est inférieure à celle de ce même nuage devenu superfluide. L'expérience peut être faite au-dessus de la température de condensation, quand le gaz d'atomes de rubidium n'est pas encore superfluide, et au-dessous, quand il l'est.

Plusieurs équipes ont réalisé l'expérience que nous avons proposée. En 1999, Christopher Foot et ses collègues de l'Université d'Oxford, ont mesuré la fréquence du mouvement pendulaire dans les deux régimes. Leurs résultats confirment nos prévisions, et elles ont fourni, en outre, la valeur du moment d'inertie du condensat.

D'autres expériences ont pour objet l'étude de la formation de tourbillons au sein de condensats de Bose-Einstein, lorsqu'on les met en rotation. Une fois de plus, la superflui-

5. DES TOURBILLONS QUANTIQUES se forment dans un condensat de Bose-Einstein mis en rotation assez rapide. Ils apparaissent et se multiplient à mesure que la vitesse de rotation augmente. Leur formation est liée à la quantification du moment angulaire du condensat.

dité se manifeste sous la forme d'un effet de seuil : les tourbillons n'apparaissent qu'au-delà d'une certaine vitesse de rotation, dite vitesse critique. Ces tourbillons qui apparaissent aussi dans l'hélium liquide sont d'autant plus nombreux que la vitesse de rotation est élevée. Ils sont une manifestation directe de la quantification du moment angulaire des particules dans la phase condensée. Mettre en rotation un objet, c'est augmenter son moment angulaire, l'équivalent angulaire de la quantité de mouvement. Le moment angulaire du condensat est quantifié, ce qui implique que pour un tourbillon quantique centré, chacun de ses atomes porte exactement un quantum élémentaire de moment angulaire.

Tourbillons quantiques

Que se passe-t-il lorsqu'on met un condensat de Bose-Einstein en rotation avec une vitesse qui augmente ? Au début, les « parois » tournent sans entraîner les atomes, puis elles confèrent un moment angulaire suffisant au nuage pour que des atomes forment un premier tourbillon, qui traverse le condensat de part en part. Ce tourbillon s'établit autour d'une ligne de densité nulle, c'est-à-dire sans atomes. Ainsi, la vitesse critique est celle pour laquelle chaque atome reçoit exactement un quantum de moment angulaire pour former un tourbillon complet.

Ces tourbillons quantiques ont été observés indirectement sur l'hélium 4 liquide à la fin des années 1960. Le groupe de Jean Dalibard, de l'École normale supérieure de Paris, a observé la formation de tels tourbillons quantiques dans un condensat de rubidium. Pour réaliser cette expérience, les physiciens ont mis un condensat en rotation grâce à un pinceau lumineux tournant autour du condensat. Comme nous l'avons mentionné, une fréquence optique appropriée de ce pinceau peut le transformer en un obstacle macroscopique, que l'on utilise comme une « cuillère optique ». Grâce à cette méthode, on contrôle la vitesse de rotation, c'est-à-dire le moment où apparaît le premier tourbillon. En augmentant encore la vitesse de rotation, on provoque l'apparition d'un deuxième tourbillon, puis d'un troisième, etc. Ils finissent par former un réseau régulier de plus en plus serré à mesure que la vitesse de rotation augmente. Chaque tourbillon est caractérisé par un trou de densité dont le diamètre est de quelques micromètres pour les condensats gazeux. Ils sont donc observables facilement, ce qui n'est pas le cas dans l'hélium liquide, où la taille caractéristique des trous de densité est de

seulement quelques nanomètres. De plus, l'expérience réalisée sur les condensats gazeux a permis d'étudier le mécanisme de nucléation de ces tourbillons quantiques.

Qu'ont apporté ces expériences? Elles ont d'abord confirmé les caractéristiques du phénomène constaté dans l'hélium superfluide: l'existence d'une vitesse critique de déplacement d'un obstacle et l'apparition de tourbillons quantiques. De surcroît, les observations faites ont révélé par quel mécanisme quantique la superfluidité se met en place. En physique classique, un obstacle microscopique animé initialement d'une vitesse est freiné par les multiples collisions avec les particules qui composent le fluide où il se déplace. Cet effet est à l'origine des frottements sur le fluide, qui sont d'autant plus importants que ce dernier est visqueux.

Cette vision classique perd toute validité dans une phase condensée d'atomes. Puisque des atomes condensés réagissent collectivement, il est vain d'expliquer les effets de frottement par l'addition de leurs comportements individuels. Les atomes condensés sont tous dans un même état quantique collectif, ce qui signifie que leurs mouvements (au sens quantique) sont ordonnés, même s'ils sont éloignés les uns des autres à l'échelle atomique. En conséquence, lorsqu'un obstacle microscopique se déplace à très faible vitesse (au-dessous de la vitesse critique), le milieu ne s'oppose pas à son mouvement. Rappelons la justification physique de ce phénomène: l'existence de frottements sous-entend que l'obstacle transfère une partie de son énergie au milieu. Le raisonnement de Landau, déjà évoqué, montre que le transfert d'énergie de l'obstacle vers le milieu condensé au-dessous d'une certaine vitesse critique viole deux lois de conservation fondamentales: celle de l'énergie et celle de la quantité de mouvement. Ainsi, pour que ces principes ne soient pas violés, les frottements doivent disparaître: à basse température, le condensat devient superfluide!

David GUÉRY-ODELIN est chargé de recherche au CNRS, membre du laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure de Paris. Il est spécialiste des gaz d'atomes ultrafroids.

Eric CORNELL et Carl WIEMANN, *La condensation de Bose-Einstein, Pour la*

Dans l'hélium liquide, les interactions atomiques sont plus fortes. L'explication de la superfluidité dans ce milieu est plus difficile à formuler. Toutefois, le mécanisme d'émergence de la superfluidité dans les condensats éclaire le mécanisme, plus complexe, qui fait disparaître la viscosité dans l'hélium liquide.

De la superfluidité dans les étoiles

Bien sûr, les condensats de Bose-Einstein sont un état extrême de la matière et la superfluidité est une anomalie rare. Pourtant leur étude précise nos connaissances du phénomène de la superfluidité. Or, que ce soit dans certaines structures de l'Univers ou dans diverses applications industrielles, les superfluides interviennent souvent. Ainsi, l'hélium superfluide est de plus en plus employé pour l'étude et la mise au point de dispositifs supraconducteurs, tels des câbles supraconducteurs ou les SQUID, utilisés notamment en magnétoencéphalographie. Soulignons que la supraconductivité n'est rien d'autre que la superfluidité de paires d'électrons.

La superfluidité jouerait aussi un rôle dans les «sursauts» des étoiles à neutrons. Ces étoiles, qui résultent de l'explosion d'une supernova, sont très denses et tournent très vite sur elles-mêmes à raison de 500 tours par seconde en émettant un rayonnement électromagnétique intense sous forme d'impulsions très brèves. On dit qu'elles «sursautent» lorsque la fréquence de ces bouffées de rayonnement augmente brusquement avant de revenir à sa valeur normale. Pour expliquer le phénomène, les astrophysiciens comparent le cœur stellaire à un gigantesque noyau d'atomes au sein duquel les neutrons s'appariement rendant superfluide la matière stellaire. Selon les astrophysiciens, les sursauts seraient liés à des changements de régime lors de la formation de tourbillons quantiques dans les étoiles à neutrons.

Science, n° 247, mai 1998.

D. GUÉRY-ODELIN et S. STRINGARI, *Phys. Rev. Lett.* 83, pages 4452-4455, 1999.

K. W. MADISON, F. CHEVY, W. WOHL-LEBEN, et J. DALIBARD, *Phys. Rev. Lett.* 84, 806-809, 2000.

Ce que disent les pierres



CE QUE DISENT LES PIERRES

Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

Code 075001
100 F • 15,24 €
144 pages

Voir bon de commande
page 96

BELIN • POUR LA SCIENCE