

Un exemple de modélisation : le condensat de Bose-Einstein

La simulation numérique repose sur l'implémentation sur ordinateur de modèles théoriques. Elle sert à étudier les propriétés d'un système et à en prédire l'évolution.

> PAR IONUT DANAILA, MAÎTRE DE CONFÉRENCES, LABORATOIRE JACQUES-LOUIS-LIONS, UNIVERSITÉ PIERRE-ET-MARIE-CURIE

Imaginez qu'un matin, en effectuant le geste rituel de mélanger votre café avec une petite cuillère, le liquide refuse obstinément de tourner. Hautement improbable ? Pas tout à fait si le café, fluide de son état (comme tous les liquides et les gaz, il obéit aux lois fondamentales de la mécanique des fluides), est remplacé par un superfluide. Dans ce dernier, l'absence de toute forme de frottement entre molécules fait que la mise en rotation s'effectue suivant un scénario qui défie notre intuition (voir les deux photographies p. 18) : pour des rotations faibles, l'absence de forces de viscosité fait que le superfluide reste immobile ; pour des rotations importantes, des tourbillons quantifiés (ou vortex) apparaissent. Ces tourbillons sont des zones dépourvues d'atomes, autour desquelles le superfluide tourne localement. En augmentant progressivement la vitesse de rotation, de plus en plus de tourbillons apparaissent, s'organisant dans un réseau triangulaire qui porte le nom d'Alexei Abrikosov (Prix Nobel de physique en 2003).

Comment obtenir un « café » superfluide ? L'idée est de réduire l'agitation moléculaire, et, par la même occasion, le frottement entre molécules, en diminuant drastiquement la température du fluide. Comme l'eau reste figée sous forme de glace solide en dessous de 0 °C, il va falloir la remplacer par un gaz pour atteindre des températures inférieures et garder le même état fluide de la matière. On sait que la température est une mesure de

l'agitation atomique (ou moléculaire) d'un gaz et que le « zéro absolu » ou 0 kelvin (équivalent à - 273,15 °C) correspond au gel de toute agitation moléculaire. Ce qui est surprenant, c'est le fait qu'il est possible de discipliner le mouvement, habituellement désordonné, des atomes quand la température descend à quelques milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu, soit quelques nanokelvins (même l'espace interstellaire est maintenu par le rayonnement cosmologique à une température plus confortable d'environ 3 kelvins).

Cette discipline s'impose naturellement par la « condensation » des atomes dans le même état quantique fondamental, caractérisé par la même longueur d'onde. Car la mécanique quantique ne regarde plus les atomes comme des petites billes rondes, mais comme des ondes. Et pour ces températures horriblement froides, les ondes individuelles se recouvrent pour n'en faire apparaître qu'une seule. La valse des atomes est parfaitement synchronisée et l'on parle ainsi d'une onde géante ou d'un superatome pour décrire de manière imagée un nouvel état de la matière : le condensat de Bose-Einstein.

Notons que les atomes forment un réseau fixe dans un solide ; ils se déplacent suivant des trajectoires chaotiques dans un gaz et glissent les uns sur les autres dans un liquide. Dans un condensat de Bose-Einstein, ils oscillent avec la même longueur d'onde, ce qui est l'une des rares manifestations des propriétés quantiques de la matière à l'échelle macroscopique.

▼ ▼ Configurations suggérées par calcul numérique. Réseau en rotation de trois condensats en forme de galette (en haut, à droite) et vortex géant (ci-dessous). Les couleurs mettent en évidence les discontinuités de phase introduites par les tourbillons quantifiés.



Prédite par Einstein en 1925, suite à un calcul inspiré par les travaux du physicien indien Satyendra Nath Bose, la condensation d'un gaz ultrafroid a dû attendre soixante-dix ans pour être réalisée expérimentalement. Les Américains Carl Wieman et Eric Cornell et l'Allemand Wolfgang Ketterle ont obtenu pour la première fois, en 1995, un condensat de Bose-Einstein. Cette réalisation, attendue avec impatience par le monde scientifique, a été récompensée rapidement par le prix Nobel de physique en 2001. Quatre ans plus tôt, le même prix était attribué au Français Claude Cohen-Tannoudji et aux Américains William Phillips et Steven Chu pour la mise au point des techniques de refroidissement des atomes par laser, techniques qui ont ouvert la voie à la réalisation du condensat. Aujourd'hui, il existe dans le monde plus de trente laboratoires de recherche pouvant réaliser le condensat de Bose-Einstein, dont deux en France : le laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure et l'Institut d'optique d'Orsay. Néanmoins, une telle expérience reste très coûteuse, avec un coût de l'équipement supérieur à 100 000 euros, ce qui devrait nous « refroidir » dans notre tentative, même imaginaire, de réaliser le « café » superfluide. Un autre système manifeste des propriétés superfluides : l'hélium liquide, quand il est refroidi « seulement » à une température inférieure à 2,2 kelvins (soit environ

- 271 °C). La nature de la superfluidité, dans ce cas, est différente de celle décrite par Albert Einstein pour la condensation gazeuse.

La simulation numérique comme outil d'exploration. La formidable cohérence du condensat de Bose-Einstein et sa haute contrôlabilité laissent présager des applications qui pourraient apporter une véritable révolution technologique. La construction d'un laser à atomes pour graver des circuits électroniques à l'échelle atomique, l'amélioration – d'un facteur inimaginable de 100 milliards – de la précision des instruments de mesure du temps (horloges utilisées, par exemple, dans les GPS) ou de la position (gyroscopes laser pour les avions et les sondes spatiales) font partie des applications envisageables. On parle aussi du condensat de Bose-Einstein comme étant une voie possible pour la réalisation d'un objet technologique qui tient actuellement de la science-fiction : l'ordinateur quantique.

Il faut néanmoins savoir que le condensat produit en laboratoire est un objet minuscule d'environ 0,1 millimètre (ou 100 micromètres), entouré d'un nuage d'atomes non condensés. L'observation expérimentale est d'autant plus délicate que cette assemblée atomique est placée dans un piège magnétique. En effet, pour atteindre des températures proches du zéro absolu, les atomes ne doivent pas

entrer en contact avec des parois, d'où la nécessité de les mettre en suspension dans un champ magnétique fort, généré par deux grosses bobines.

Pour prendre des photographies, le piège magnétique est coupé, puis un bref éclair lumineux est envoyé à travers l'assemblée atomique afin de mesurer son absorption et d'évaluer ainsi sa densité. Malgré la difficulté de la tâche, les photos expérimentales montrent remarquablement bien la structure du condensat, en particulier la présence de tourbillons quantiques (voir p. 18). Cependant, certains régimes, comme celui de la rotation rapide, sont difficiles à explorer expérimentalement. La simulation numérique peut alors apporter un complément d'information nécessaire à la compréhension des phénomènes et à la validation des théories physiques ; elle permet aussi

une exploration détaillée de la structure tridimensionnelle (3D) du condensat et des lignes de tourbillon, ce qui est difficile – voire impossible – à visualiser dans les expériences de laboratoire.

Si l'on ajoute à l'argumentaire précédent le fait que le développement vertigineux des ordinateurs a rendu le coût de la simulation numérique très accessible, on peut se demander légitimement pourquoi l'expérimentation numérique ne remplace pas complètement l'expérience en laboratoire. Tout simplement parce que l'approche numérique est soumise à une série d'approximations ●●●

