

Les superfluides

I. SUPERFLUIDITÉ

La superfluidité est une propriété quantique de certains liquides ou gaz qui deviennent infiniment fluides **en dessous** d'une certaine **température**. Un superfluide coule sans le moindre effort à travers de fins capillaires ou même de petits trous de la dimension de quelques atomes à peine.

Par exemple : remplissez un récipient poreux, en porcelaine, avec de l'hélium superfluide, il se videra tout seul ! Faites le tourner dans un anneau, il tournera des semaines sans ralentir!

La superfluidité est semblable à la supraconductivité : écoulement d'un liquide sans frottement dans un cas, circulation d'un courant électrique sans résistance dans l'autre.

Origines de l'hélium

La plus grande partie de l'hélium présente aujourd'hui dans l'univers a été formée lors de la nucléosynthèse primordiale, c'est-à-dire quelques fractions de secondes après le Big Bang quand la chute de température a "condenser" les particules en atomes. Il représente environ 25 % de toute la matière de l'univers, dans les étoiles et nuages gazeux interstellaires, bien que sur Terre il soit assez rare car sa faible densité est peu propice à une capture gravitationnelle, du moins par notre toute petite planète.

De l'hélium continue à être produit encore aujourd'hui dans l'univers mais par d'autres processus. Cela se passe notamment au cœur des étoiles, où l'hydrogène fusionne en hélium. Il existe huit isotopes de l'hélium, dont deux stables : l'hélium 3 (deux protons et un neutron) et l'hélium 4 (deux protons et deux neutrons).

Le plus abondant est l'hélium 4, et sur Terre il représente 0.000524% de l'atmosphère, soit en gros 75 fois moins que le CO₂. Il est produit par la radioactivité α d'éléments lourds présents sur Terre. L'hélium 3 est lui environ 1 million de fois moins abondant.

Comme n'importe quel gaz, l'hélium 4 peut être refroidi pour devenir liquide : Kammerlingh-Onnes montre en 1908 que cela se passe à 4,22 K (soit -268.93°C) à pression atmosphérique. Mais contrairement aux autres éléments, l'hélium reste liquide jusqu'au zéro absolu (il peut cependant se solidifier à des pressions supérieures à 25 atmosphères).

En 1927, Keesom observe en dessous de 2,17 K un deuxième état liquide différent pour l'hélium ! Il distingue alors ce qu'il appelle l'hélium I et l'hélium II.

II. Point Lambda :

La superfluidité est un état quantique de la matière qui a été découvert pour la première fois avec l'hélium en 1937 par Pyotr Leonidovitch Kapitsa, simultanément avec, John F. Allen et A. Don Misener.

Les physiciens ont constaté qu'en dessous de la température critique de **2,17 °K**, (soit - 270,98°C), ce que nous appelons le **point lambda (λ)**, l'hélium 4 subissait une transition de phase. Il passait d'un état liquide à un autre aux propriétés sensiblement différentes. En effet, l'expérience, confirmée par la suite, montra que ce nouvel état de l'hélium conduisait très bien la chaleur, ce qui ne pouvait s'expliquer que par une faible viscosité ou nul.

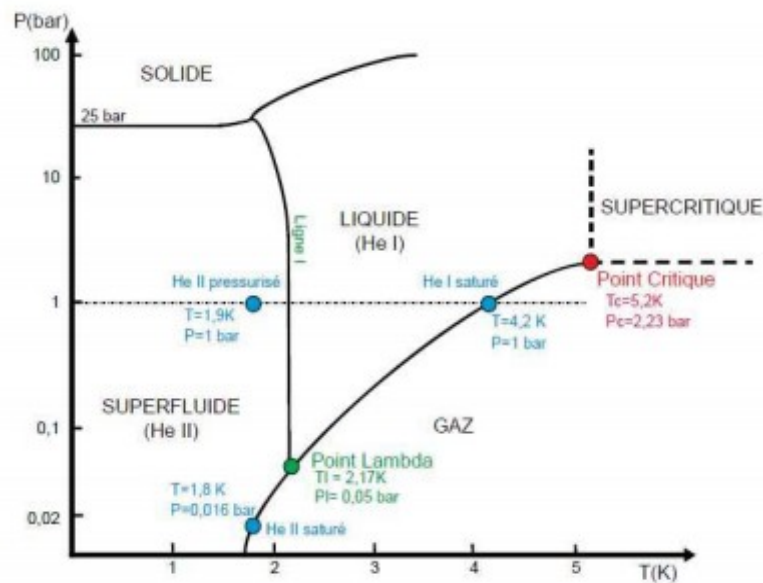


Diagramme de phase de l'hélium

Des expériences plus spécifiques à la mécanique des fluides montrèrent ensuite que l'écoulement de cet hélium dans un tuyau était sensiblement indépendant de la pression appliquée sur les parois du tuyau, et de plus indépendant de la section du tuyau en question !

Ceci ne pouvait s'expliquer que par une absence totale **de viscosité**, d'où le nom de **superfluidité**.

En bref, un liquide est dit superfluide s'il n'oppose aucune résistance à l'écoulement. En conséquence, les solides qui se meuvent de dans ne subissent aucun frottement visqueux.

Propriété d'un superfluide :

Propriétés étonnantes vérifiées sur l'hélium superfluide

- ✓ Reste liquide à pression normale, jusqu'à 0°K.
- ✓ Viscosité encore plus faible que l'hélium classique.
- ✓ Lorsqu'on le chauffe, il s'évapore sans bouillir.
- ✓ Il conduit étonnamment bien la chaleur, 1000 fois plus que le cuivre.
- ✓ Il est capable de remonter les parois d'un récipient pour redescendre à l'extérieur.
- ✓ Il coule à une vitesse très élevée à travers un petit trou, sans dépendance avec la pression ni avec le diamètre du trou.
- ✓ Si on fait tourner lentement une boîte contenant un superfluide, les parois de la boîte tournent mais le superfluide reste immobile dans un état de repos (état fondamental d'énergie minimale). Au-delà d'une certaine vitesse de rotation, le superfluide commence à tourner mais d'une façon très particulière : des tourbillons tous identiques envahissent la boîte. Ces tourbillons sont une preuve de l'existence d'un état quantique cohérent où tous les atomes se déplacent ensemble et de la même manière.

Modèle des deux fluides :

Le principe de ce modèle dit que l'hélium superfluide est, en réalité, l'interpénétration, le mélange, de deux fluides aux propriétés très différentes. Il se composerait d'un *fluide normal* et d'un *superfluide*. Le fluide normal se compose d'atomes n'ayant pas subi la condensation. Ils occupent donc, des états différents de **l'état fondamental** et les atomes qui le composent sont donc localisés. Le superfluide, lui, est identifié au condensat. C'est-à-dire que l'ensemble des atomes sont compressés dans l'état fondamental habituel.

Contrairement au fluide normal, ses particules sont complètement délocalisées, du point de vue quantique.

Le fait que l'hélium soit composé de ces deux éléments, n'est bien sûr qu'un modèle dont la validité reste à prouver.

D'autres superfluides

Dans les années 70, Douglas Osheroff, David M. Lee et Robert C. Richardson ont découvert un état superfluide pour l'isotope rare de l'hélium, l'hélium 3, à une température de 2mK environ, bien inférieure à la température de transition superfluide mesurée dans l'hélium 4. Pour cette découverte, le prix Nobel de physique leur a été attribué en 1996.

Les superfluides

La différence entre les deux isotopes de l'hélium est que les atomes d'hélium 4 sont des bosons, alors que les atomes d'hélium 3 sont des fermions, ce qui fait que leur comportement à très basse température suit des lois radicalement différentes.

Comme l'a suggéré Fritz London dans les années 40, la formation d'un état superfluide dans l'hélium 4 correspond à une condensation de Bose-Einstein des atomes d'hélium qui sont des particules quantiques bosoniques. Toutefois, contrairement au cas du gaz de Bose idéal, dans l'hélium 4 la répulsion entre les atomes est très forte, et même à très basse température, seulement 10% des atomes sont dans le condensat.

Au contraire, à cause de son caractère fermionique, l'hélium 3 à très basse température forme un liquide de Fermi. C'est l'existence d'une très faible attraction entre les atomes d'hélium 3 qui produit un appariement des atomes fermioniques d'hélium 3 en dessous de la transition superfluide. Un phénomène similaire conduit à la **supraconductivité** dans les métaux. Dans ce dernier cas, les particules formant un état superfluide sont des paires d'électrons ("paires de Cooper"), et l'absence de viscosité se traduit par une absence de résistivité électrique.

La théorie des phases superfluides de l'hélium 3 est une extension de la théorie BCS développée par Balian, Werthamer, Anderson, Brinkmann, Morel et Leggett.

Applications

Mais à quoi peut bien servir aujourd'hui l'hélium liquide, après avoir excité les chercheurs au début du XXe siècle ?

L'hélium superfluide est essentiellement utile pour la manipulation des champs magnétiques puissants qui réclament des quantités énormes d'électricité, et donc une résistance électrique minimale pour éviter les déperditions d'énergie. L'hélium superfluide permet de refroidir des conducteurs électriques jusqu'à les rendre supraconducteurs.

Ainsi l'imagerie médicale de type **IRM** (et les appareils de recherche de type RMN) utilisent de puissants aimants rendus supraconducteurs à basse température grâce à l'hélium liquide.

De la même manière les accélérateurs de particules comme ceux utilisés dans certains hopitaux pour les traitement par radiothérapie, ou encore comme le LHC au CERN utilisent des électroaimants refroidis à l'hélium superfluide (9593 aimants mesurant chacun 15m et pesant 34 tonnes, refroidis par 94 tonnes d'hélium II à 1,9K (-271,3°C) pour faire passer un courant de 12000 ampères ; il faut 6 semaines pour refroidir le tout !).

Les superfluides

Une autre application concerne les horloges atomiques qui définissent le temps de référence international et permettent la synchronisation des systèmes de télécommunication planétaire (satellites, téléphones mobiles) ainsi que des systèmes de géolocalisation comme le GPS de nos voitures.

L'étude de tous les phénomènes quantiques en recherche fondamentale, dont les recherches pour réaliser des ordinateurs quantiques, est aussi basée là-dessus.

L'hélium liquide est bien partout autour de nous !

Les dernières recherches étudient aujourd'hui de nouveaux phénomènes comme la super solidité qui équivaldrait à la superfluidité d'un cristal.