



Zoom science : juillet 2010

Magnétisme : l'oxygène dans tous ses états !

Stefan Klotz

« Physique des milieux denses »

Résumé : L'oxygène est la seule molécule élémentaire qui possède un moment magnétique. Dans une récente étude visant à caractériser l'ordre magnétique dans une certaine phase de l'oxygène, l'équipe « Physique des Milieux Denses » de l'IMPMC, a été la première à surmonter les difficultés expérimentales et à déterminer les structures par diffusion de neutrons.

Texte

Le problème du magnétisme dans l'oxygène est vieux de plus d'un siècle. En 1910, Kamerlingh-Onnes découvre que l'oxygène solide est magnétique¹. Depuis, la science avance à petits pas. Des mesures spectroscopiques donnent bien quelques indices, mais identifier et comprendre les différentes structures magnétiques de l'oxygène relève souvent du challenge. Ceci est particulièrement vrai pour des phases qui n'existent que sous très haute pression.

Dans les années 70, les techniques haute pression ont révélé l'existence de différentes phases dans l'oxygène, δ -O₂ (« phase orange », car elle apparaît en orange quand on l'observe aux travers des enclumes d'une cellule à enclumes de diamant) et ϵ -O₂ (« phase rouge ») (Fig. 1), dont la structure nucléaire vient seulement d'être élucidée.

Récemment, la contribution de l'équipe « Physique des Milieux Denses » (PMD) de l'IMPMC, a été d'appliquer la diffusion de neutrons sous très haute pression, pour résoudre le problème d'ordre magnétique dans la phase δ -O₂ [1]. Cette équipe est parvenue à condenser un échantillon de ~80 mm³ d'oxygène liquide dans une cellule dite « Paris-Edinburgh » et à comprimer ensuite l'échantillon jusqu'à 8 GPa (80 000 bar). Ces mesures ont été effectuées sur le diffractomètre à haute intensité D20, à l'Institut Laue-Langevin à Grenoble, avec un dispositif cryogénique spécifiquement développé pour ce type de presse.

Ces mesures montrent une richesse inattendue des structures magnétiques dans cette phase d'oxygène : δ -O₂ contient trois structures magnétiques, toutes antiferromagnétiques (Fig. 2). Cette phase possède donc un ordre magnétique dans tout son domaine d'existence, c'est-à-dire jusqu'à 8 GPa et 300 K. A cette pression l'oxygène devient alors un « aimant » à température ambiante ! La phase δ -O₂ se présente comme un arrangement lamellaire de molécules, avec l'axe des molécules perpendiculaire aux feuillets, et les moments magnétiques contenus dans les feuillets orientés le long de l'axe b, d'une façon antiferromagnétique (Fig. 2). L'explication de cette diversité magnétique, inhabituelle, réside dans l'extrême dépendance des forces de couplage entre deux spins de l'orientation des axes moléculaires, un phénomène absent dans des aimants « classiques ».

La littérature scientifique montre, au travers de calculs *ab initio* que, pour la plupart des orientations, ce couplage est antiferromagnétique. Ce qui explique pourquoi, les moments à l'intérieur des feuilles

s'alignent de telle ou manière. Une exception est l'orientation qui existe entre deux spins voisins dans des feuilles voisines (tel qu'il est indiqué par le trait « J » dans la Fig. 2) : pour cette orientation, l'interaction est faiblement ferromagnétique, ce qui justifie ce type d'empilement des moments dans la phase basse température. Sous l'effet de la température, l'orientation des molécules oscille de plus en plus et s'éloigne alors de plus en plus de l'orientation correspondant au couplage ferromagnétique. A suffisamment haute température, le couplage moyenné devient forcément antiferromagnétique, ce qui se vérifie dans l'expérience de l'équipe « Physique des Milieux Denses ».

La publication faisant l'objet de cet article a été choisie comme « Editor's Choice » de Phys. Rev. Letters, et a été affichée dans "Physics – Spotlighting Exceptional Research".

[1] S. Klotz, Th. Strässle, A.L. Cornelius, J. Philippe, Th. Hansen, « Magnetic ordering in solid oxygen up to room temperature », PRL 104, 115501 (2010).

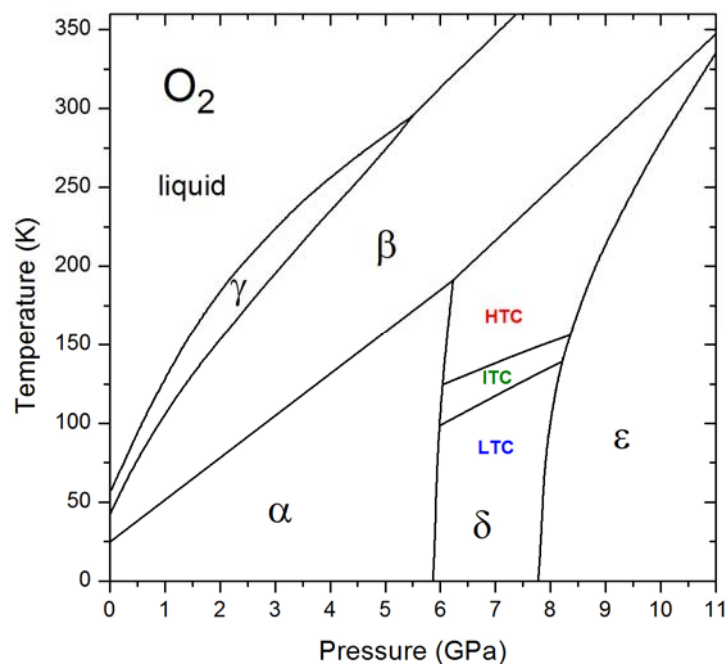


Figure 1 : Diagramme de phase de l'oxygène. La phase δ contient trois structures magnétiques, dénommées HTC (high temperature commensurate), LTC (low temperature commensurate), ITC (intermediate temperature commensurate). 1 GPa = 10 000 bar.

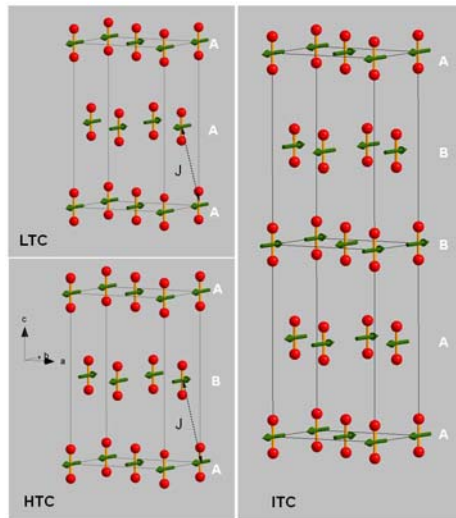


Figure 2 : Structures magnétiques de δ -O₂. On note que le couplage J des moments entre deux feuilles est ferromagnétique dans la structure HTC, antiferromagnétique dans la structures LTC, et alterné dans la phase intermédiaire ITC. « A » et « B » désignent la succession des couches O₂.

ⁱ Cet état est dû à une paire d'électrons dans la couche pi (les électrons d'un atome se trouvent dans les orbitaux qu'on dénomme avec des lettres: s, p, d, f...), ayant des spins non-couplés, une conséquence des "Règles de Hund".