
Les liquides de spin quantiques :

UN NOUVEL ÉTAT DE LA MATIÈRE

Céline Larivière-Loiselle, Université de Sherbrooke
Crédit image : Francis Pratt / ISIS / STFC

Un nouvel état de la matière bien étrange vient d'être découvert. Cet état, dont l'existence avait été prédite il y a 40 ans et qui a été observé en laboratoire pour la première fois en 2003, est appelé *liquide de spin quantique*. Sa découverte est un pas important dans la compréhension du monde quantique et montre que la matière a bien plus à offrir que les simples liquides, solides et gaz !

Un cube de glace, un verre d'eau, la vapeur sortant d'une bouilloire : la matière se présente à nous sous plusieurs formes. Toutefois, les solides, les liquides et les gaz ne sont que les états les plus connus. Dans des conditions particulières, la matière peut prendre des formes plus exotiques. L'une des plus étranges de toutes est l'état liquide de spin.

Les liquides de spin se distinguent des trois états discutés dans le paragraphe précédent, puisqu'ils sont la manifestation d'un état *magnétique*. Ce qui veut dire qu'un liquide de spin n'est pas à proprement parler... un liquide ! En fait, les liquides de spins quantiques sont le plus souvent des cristaux solides, mais c'est leur état magnétique qui est décrit comme étant liquide.

Quand les spins imitent les liquides

Pour commencer, il ne faut pas se laisser berner par le terme « spin » : il ne signifie pas que quelque chose dans la matière est réellement en train de tourner. Il s'agit plutôt d'une propriété que

possèdent certaines particules en mécanique quantique. On peut voir le spin comme une métaphore utile pour se donner une idée de ce qui se passe avec la particule. En ce qui nous concerne, le spin peut être imaginé comme un aimant élémentaire qui donne ses propriétés magnétiques à la matière. Il sera représenté comme une flèche pointant le long de l'axe magnétique de cet aimant.

On parle de « liquides » de spin parce que les spins de ces matériaux particuliers ont une attitude analogue à celle des molécules dans un liquide : ils sont *désordonnés*¹. En général, plus on augmente la température et plus la matière se désordonne. C'est une règle pratiquement universelle de la physique. *Pratiquement*, parce que les liquides de spin font exception. Une de leur principale caractéristique est de rester désordonnés même lorsqu'on les refroidit à de très, très basses températures - près du zéro absolu. Comment est-ce possible ?

La frustration magnétique

En général, les spins atomiques se trouvent dans un état aléatoire. Mais quand on refroidit la matière, ils interagissent plus fortement entre eux. L'état dans lequel ils se trouvent est alors dicté par leurs voisins rapprochés. Les liquides de spin tirent leurs propriétés marginales d'un phénomène appelé frustration magnétique. Pour bien cerner ce qui se passe dans un matériau magnétiquement frustré, explorons brièvement le ferromagnétisme et l'antiferro-

1. De fortes corrélations existent tout de même entre les spins, sans quoi on parlerait plutôt de « gaz » de spin

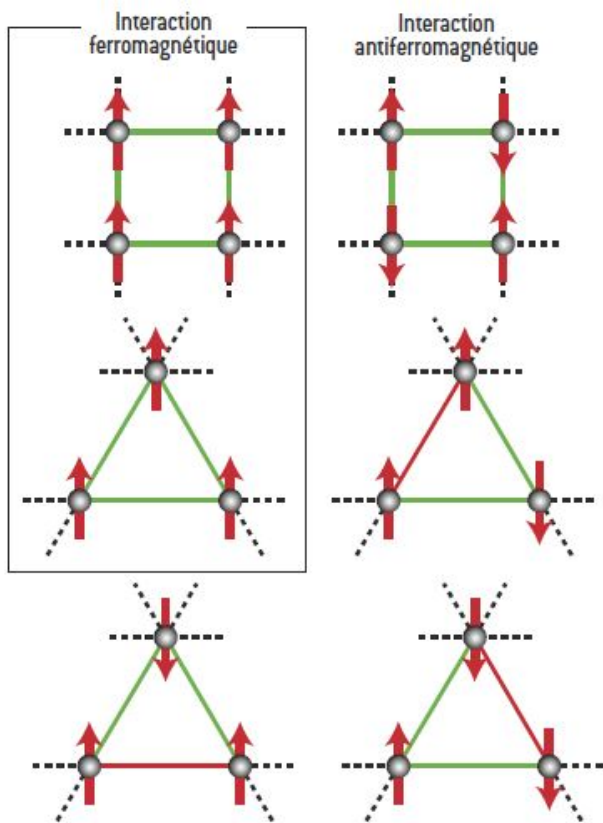


Figure 1 – Interactions ferromagnétiques et antiferromagnétiques dans des réseaux carrés et triangulaires (Figure tirée de [2])

magnétisme.

Ferromagnétisme Les aimants sur nos réfrigérateurs sont des exemples de matériaux ferromagnétiques. Dans un système ferromagnétique, en-dessous d'une certaine température, les spins vont tous s'aligner dans la même direction, de façon parallèle (voir figure 1, côté gauche). De tels matériaux, comme le fer et le nickel, présentent une aimantation.

Antiferromagnétisme L'antiferromagnétisme se manifeste plutôt par un alignement antiparallèle des spins, comme sur la figure 1 à droite. L'aimantation d'un matériau antiferromagnétique est nulle. C'est le cas du chrome, par exemple.

Dans les deux réseaux carrés de la figure 1, toutes les interactions binaires sont satisfaites. Il existe toutefois des situations pour lesquelles ceci est impossible : on parle alors de frustration. Tandis qu'un réseau triangulaire avec des interactions *ferromagnétiques* ne pose aucun problème, le même réseau triangulaire avec des interactions *antiferromagnétiques* est un bon exemple de frustration magnétique. La figure 1 illustre bien qu'aucune confi-

guration possible ne permet à toutes les paires de spins d'être antiparallèles, comme elles le souhaiteraient dans le régime antiferromagnétique. Ainsi, certaines interactions sont frustrées (représentées par des lignes rouges sur la figure). C'est la frustration qui fait en sorte que les liquides de spins ne s'ordonnent pas à basse température et continuent à fluctuer sans cesse².

Herbertsmithite et autres liquides de spin

Un des premiers liquides de spin à avoir été découvert, l'herbertsmithite, est un excellent exemple pour illustrer le comportement et l'origine de l'état liquide de spin. Ce composé de formule chimique $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ est un minéral rare découvert par G.F. Herbert Smith, un minéralogiste anglais. Ce sont toutefois des chimistes qui ont reconnu l'intérêt du matériau pour le magnétisme quantique et qui sont parvenus à le synthétiser en laboratoire. Des études physiques poussées ont ensuite permis de connaître la structure cristalline de l'herbertsmithite [4].

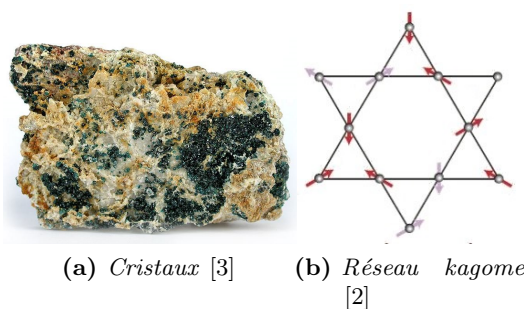


Figure 2 – Herbertsmithite

Ainsi, dans ce composé, les ions Cu^{2+} sont les seuls à présenter un moment magnétique et sont organisés selon un réseau de type *kagome* (voir figure 2 (b)). L'analyse a également permis de conclure que les interactions entre les spins sont de type antiferromagnétique. On a donc un réseau comprenant des formes triangulaires et des spins cherchant à être antiparallèles : recette parfaite pour la frustration magnétique et, par conséquent, l'état liquide de spin quantique. Les études du matériau ont confirmé les attentes - aucune aimantation locale n'a été trouvée sur les ions de cuivre jusqu'à une température aussi basse que 0,02 K [2][5].

2. On parle ici de « fluctuations quantiques ». Ce ne sont pas de vraies fluctuations, mais des superpositions d'états : le système de spins sera simultanément dans toutes les configurations frustrées de la figure 1, par exemple.

Voir à l'intérieur d'un atome

LA SPECTROSCOPIE RMN

Comment peut-on étudier des phénomènes magnétiques qui ont lieu à une échelle plus petite qu'un atome ? Une technique très puissante, la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN), nous permet une telle résolution. La RMN est un outil extrêmement polyvalent, qui permet de sonder le comportement magnétique de *noyaux* d'atomes, ainsi que d'analyser l'effet des électrons sur ceux-ci. Toute une prouesse ! Mais comment y arrive-t-on ?

Le phénomène de résonance magnétique nucléaire est assez intuitif. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué sur un noyau possédant un spin, il se met à tourner comme le fait une toupie sur le point de tomber - on appelle ce mouvement *précession*. Le spin étant en quelque sorte un « aimant », il produit un champ magnétique. Et qu'arrive-t-il lorsqu'on bouge un aimant près d'un fil conducteur ? On produit un courant ! Il s'agit donc de placer un fil (ou plus précisément, une bobine de fil) près de notre échantillon dans le spectromètre, et voilà. En mesurant l'intensité du courant, on a une mesure de la vitesse de précession des spins. On arrive ainsi à sonder l'intérieur d'un atome !

Cette technique est très utile pour l'étude des liquides de spin, puisque la précession du spin nucléaire nous permet de connaître les champs magnétiques générés par les spins d'électrons formant le liquide de spin quantique.

D'autres liquides de spin ont été découverts, et certains matériaux sont des candidats prometteurs. C'est le cas du $\text{Rb}_2\text{Cu}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ [6], que j'ai eu la chance d'étudier moi-même par spectroscopie RMN (technique expliquée dans l'encadré *Voir à l'intérieur d'un atome*). Les résultats obtenus en laboratoire sont prometteurs, car aucun ordre magnétique n'a été observé à basse température.

Un peu de liquide dans votre ordinateur ?

Nous entrons présentement dans l'âge de l'informatique quantique. Dans ce contexte, l'étude des liquides de spin se révèle très intéressante. On sait maintenant que les liquides de spin se divisent en différentes catégories avec des propriétés légèrement différentes, mais on sait aussi qu'ils supportent tous des phénomènes quantiques hors du commun. Outre l'intérêt purement théorique, ces propriétés pourraient être utilisées dans la fabrication d'ordinateurs quantiques, qui permettraient une puissance de calcul surpassant les plus puissants supercalculateurs que nous possédons aujourd'hui [7].

Pour l'instant, on ne sait pas exactement si tout cela va se concrétiser... C'est en partie ce qui fait

la beauté de la physique : on ne peut pas savoir avant de découvrir ! C'est la raison pour laquelle on étudie les phénomènes qu'on ne comprend pas. Une fois qu'on les comprend, les applications peuvent se révéler phénoménales.

Références

- [1] Fabrice Bert, Philippe Mendels, Olivier Cépas et Claire Lhuillier. *Quand la frustration rend plus dynamique : Les liquides de spin quantiques*. *Reflète de la Physique* n°37, 2013.
- [2] Rafik Ballou et Claudine Lacroix. *Liquides et glaces de spin*. *Pour la science*, n°364, février 2008.
- [3] Herbertsmithite. Digital image. *The Arkenstone*. N.p., Mar. 2010. Web. 5 Aug. 2016.
- [4] M.P. Shores et al., *Journal of the American Chemical Society*, 127 13462 (2005).
- [5] P.Mendels et al., *Phys. Rev. Lett.* 98.077204 (2007).
- [6] Y. Yasui et al., *Journal of applied physics*, 113, 17D910 (2013).
- [7] Hong-Chen Jiang, Zhenghan Wang et Leon Balents, *Nature Physics* 8.902 (2012).