

aimantation lorsqu'on lui applique un champ magnétique. Ainsi, ces matériaux ont une certaine susceptibilité au-dessus du seuil d'énergie de l'échelle, susceptibilité qui tombe à zéro au-dessous de ce seuil, car alors les spins se verrouillent deux à deux en états singulets et le système n'a aucune réponse magnétique.

La parité des montants

Que se passe-t-il lorsque le nombre de montants de l'échelle devient supérieur à deux ? De façon surprenante, le résultat ne dépend que de la parité du nombre de montants. Dans le cas d'un nombre pair, tout se passe comme dans l'échelle à deux montants que nous venons de décrire. En revanche, si le nombre de montants est impair, il reste toujours un spin non apparié par colonne (voir la figure 6). L'état de plus basse énergie est comparable à celui d'un spin unique et l'échelle se comporte comme une chaîne (en zig zag) de spins quantiques qui possède une réponse magnétique, même à très basse température (il n'existe pas de seuil au-dessous duquel la susceptibilité magnétique s'annule).

En fait, pour les échelles à nombre pair de montants, la physique est légèrement plus complexe que la description que nous en avons donnée ci-dessus. Les spins se verrouillent bien en singulets, mais plusieurs choix d'appariement sont possibles pour former le singulet (deux spins voisins sur un même barreau ou sur un même montant). Dès lors, la mécanique quantique nous dit que les appariements vont résonner entre des états différents (l'état de plus basse énergie sera une superposition des différents modes d'appariement). On parle d'état RVB (*Resonating Valence Bond*). Contrairement à un antiferromagnétique où chaque électron a son spin pointant dans une direction précise, dans le cas présent le spin de chaque électron résonne. On peut donc voir l'état magnétique de l'échelle comme un « liquide » de spin où l'état de chaque point dans le matériau change constamment au cours du temps. Un tel état liquide de spin est radicalement nouveau et une controverse a existé pour savoir si, dans un système à deux dimensions, des spins placés sur un réseau carré pouvaient posséder un état liquide de spin (une question importante pour la théorie de la supraconductivité à haute température). Cette controverse est maintenant résolue : l'état fondamental du système de spins sur un réseau carré en dimension deux est l'état de Néel (le solide de spin). Cependant, il existe des réseaux plus complexes, tels le réseau Kagomé ou le réseau pyrochlore, sur lesquels un liquide de spin bidimensionnel, peut en principe exister. Cette question fait l'objet de recherches actives en particulier à cause de l'intérêt qu'elle présente pour des systèmes comme CaV_4O_9 .

Les propriétés des échelles à deux montants offrent l'opportunité d'étudier un autre phénomène physique important. En appliquant un champ magnétique, il est possible d'abaisser l'énergie des triplets au-dessous de celle de l'état singulet ! Les triplets étant des bosons, il devient possible d'obtenir leur condensation de Bose. En réalité, toujours à cause du théorème de Mermin-Wagner, on n'obtient pas un véritable condensat, mais plutôt un liquide de Luttinger de triplets.

Ce changement de comportement collectif s'apparente à une transition de phase dans un système classique. La différence est ici que la transition de phase n'est plus

contrôlée par un changement de température, mais par un changement d'un des paramètres du système (en l'occurrence le champ magnétique ambiant) et peut donc se produire même au zéro absolu. Le rôle qui, dans une transition de phase classique est joué par l'agitation thermique (qui, rappelons-le, a disparu au zéro absolu) est joué ici par les fluctuations quantiques. On parle de phénomène critique quantique. Ces phénomènes critiques quantiques sont importants pour de nombreux matériaux. Ils ont été proposés comme origine possible de la supraconductivité dans les alliages « fermions lourds » ou dans les supraconducteurs à haute température. Cependant, cette question reste ouverte tant du point de vue théorique que du point de vue expérimental.

Les échelles dopées

Jusqu'ici nous avons considéré des composés à un électron par site, et qui, par conséquent, sont des isolants (de Mott) du fait des interactions coulombiennes. Supposons maintenant qu'en changeant la composition chimique du matériau, on puisse extraire certains électrons de l'échelle, ces électrons étant capturés par des atomes situés dans une autre partie du matériau. C'est ce qui se passe, par exemple, dans le composé strontium, calcium, oxyde de cuivre de formule $\text{Sr}_2\text{Ca}_{12}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ (voir la figure 1). On obtient alors une échelle dopée, où certains sites sont vides (on dit que l'on a injecté des trous dans l'échelle). Contrairement au cas de l'isolant de Mott, la présence de trous rend la conduction électrique à nouveau possible, le trou pouvant sauter d'un site au site voisin comme dans un jeu de taquin. Toutefois, ils empêchent la formation des singulets de spin, coûtant de ce fait de l'énergie. De plus, deux trous éloignés cassent deux singulets et coûtent plus d'énergie que deux trous voisins (voir la figure 5). Il devient alors préférable de positionner deux trous sur le même barreau pour ne casser qu'un seul singulet. Autrement dit, il existe une attraction entre les trous... et ceci alors même que toutes les particules considérées ont la même charge et que leurs interactions sont, au départ, purement, répulsives !

L'existence d'une telle attraction entre trous a des conséquences spectaculaires, signalées par Maurice Rice, de l'Institut fédéral de technologie de Zurich. Depuis la théorie de John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer, les physiciens savent qu'une attraction entre les électrons d'un solide conduit à la formation de paires d'électrons. Ces paires d'électrons – dites de Cooper – sont des bosons et sont susceptibles de se condenser en donnant lieu à un état superfluide qui produit la supraconductivité, c'est-à-dire le transport de courant sans résistance dans le matériau. Dans les solides usuels, l'attraction est due au couplage des électrons avec les vibrations du réseau et provient, *in fine*, de l'attraction entre les électrons et les ions positifs du réseau cristallin. Au contraire, dans une échelle, une attraction effective se manifeste directement qui n'implique que les électrons, et n'a pas recours aux vibrations du réseau. Or, les énergies des interactions entre électrons sont bien plus élevées que celles des vibrations des ions, et, par conséquent, on conçoit facilement que l'attraction entre trous dans une échelle sera beaucoup plus forte que celle qui est provoquée par l'interaction avec les ions du réseau : ainsi, cette nouvelle