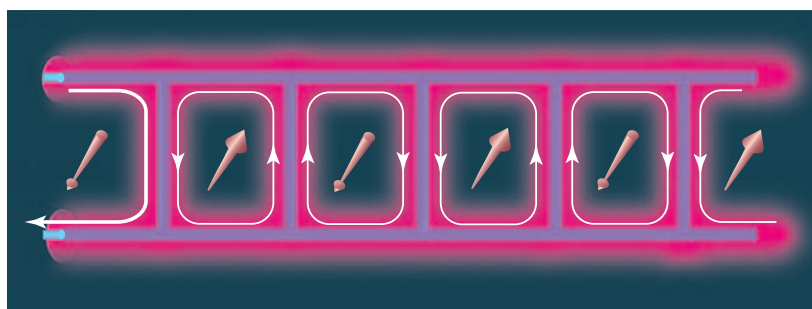


supraconductivité pourrait apparaître à une température bien supérieure à celle induite par le mécanisme de Bardeen, Cooper et Schrieffer. Certes, dans le cas unidimensionnel, le théorème de Mermin et Wagner empêche la formation d'un ordre supraconducteur à longue distance, mais l'analyse théorique permet de prédire une forte tendance supraconductrice. Dans le cas des échelles couplées où certains mouvements transverses sont possibles et où le théorème de Mermin et Wagner ne s'applique plus, il est possible que la phase supraconductrice soit stabilisée. Il existe de nombreuses analogies entre la supraconductivité prédite dans les échelles et celle qui a été mise en évidence expérimentalement dans les supraconducteurs à haute température critique, et dont on ne comprend toujours pas le mécanisme. Les échelles sont-elles une sorte de modèle réduit des supraconducteurs à haute température critique ? Il est trop tôt pour l'affirmer, mais l'hypothèse est séduisante. En attendant, cette prédiction théorique a conduit à une recherche expérimentale pour observer cette supraconductivité dans les échelles.

Une nouvelle phase

Les premières expériences de dopages se sont révélées infructueuses, les composés restant des isolants. Cependant, ces résultats ne sont pas surprenants. En effet, il est difficile de bénéficier des avantages du monde unidimensionnel sans souffrir de ses inconvénients : dans les systèmes unidimensionnels, les porteurs de charge ne peuvent plus contourner les obstacles et leurs propriétés conductrices sont extrêmement sensibles à la présence d'impuretés. Néanmoins, en 1996, Jun Akimitsu et ses collègues de l'Université Aoyama-Gakuin, à Tokyo, ont montré que le composé $\text{Sr}_2\text{Ca}_{12}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ sous forte pression présente une transition supraconductrice à la température critique de 12 kelvins.

En modifiant légèrement les interactions dans l'échelle, nous avons montré qu'on obtient une autre phase extrêmement étonnante. On empêche alors les charges de s'apparier et donc une supraconductivité « conventionnelle » d'apparaître. Cependant au lieu de rester immobiles les charges se mettent alors à tourner en formant des boucles de courant microscopiques (voir la figure 7). Il est important de noter que ce courant circule sans dissipation. Cette délocalisation de la charge est un peu analogue à celle qui se produit pour les électrons sur certaines molécules, tel le benzène, par exemple. La différence importante est qu'ici, le système brise spontanément la symétrie droite-gauche et, par conséquent, qu'un courant microscopique circule. Ces courants de charge changent de sens d'une « plaquette » à l'autre, ce qui fait qu'aucun courant macroscopique ne traverse l'échantillon. Cependant, au niveau macroscopique, ces boucles de courant ont des conséquences observables. Exactement comme une petite spire de courant produit un champ magnétique, chacune de ces boucles de courant va donner lieu à un petit moment magnétique. Ces moments alternent de plaquette en plaquette et l'on obtient un système antiferromagnétique, où, toutefois, les moments magnétiques ne sont pas des spins d'électrons, mais sont dus aux courants orbitaux circulant dans le système. Cette phase, qualifiée d'antiferromagnétique orbitale ou de phase de flux, est un nouvel état de la matière et possède des propriétés encore



7. UNE PHASE ÉTRANGE apparaît dans les échelles sous certaines conditions. Comme dans une molécule de benzène, les électrons (en rose) sont délocalisés sur l'édifice atomique et des courants électroniques microscopiques circulent sur les motifs de l'échelle. Ces courants, telles de petites spires, engendrent des moments magnétiques opposés. Il s'agit d'un antiferromagnétisme particulier qui n'est pas dû au spin des électrons (ces spins sont, quant à eux, verrouillés deux à deux en états singulets). C'est l'antiferromagnétique orbital.

mal comprises. En plus de son intérêt théorique, nous avons montré qu'elle présente une propriété de transport surprenante : elle ne n'est pas supraconductrice, mais elle est capable de transporter du courant sans dissipation, même en présence de désordre (impuretés) dans le système. Une telle phase pourrait donc être une nouvelle forme de supraconduction. En fait, dès 1988, Ian Affleck et Brad Marston d'une part, et indépendamment, Alexander Nersesyan de l'autre ont postulé que des phases de flux analogues étaient à l'origine des propriétés des supraconducteurs à haute température critique. Récemment, des expériences de photoémission sur les supraconducteurs à haute température, réalisées par Juan-Carlos Campuzano à l'Université d'Urbana-Champaign, ont relancé l'intérêt pour ces phases de flux, car elles ont mis en évidence de tels courants.

Les composés en échelles sont des matériaux surprenants par la richesse de leur physique, tant dans leur phase isolante que dans leur phase métallique. Leur comportement peut aller du liquide de spin au supraconducteur inhabituel. De plus, ils se prêtent remarquablement bien à l'étude de transitions critiques quantiques et de passage dimensionnel. Aussi bien d'un point de vue expérimental que théorique, nous sommes encore très loin d'avoir épuisé leur richesse.

Thierry GIAMARCHI est professeur à l'Université de Genève et chercheur CNRS au Laboratoire de physique des solides de l'Université de Paris-Sud. Edmond ORIGNAC est chercheur CNRS au Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure de Paris. Didier POILBLANC est chercheur CNRS au Laboratoire de physique théorique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.

E. DAGOTTO et T. RICE, *Surprises on the Way from 1D to 2D Quantum Magnets*, in *Science*, vol. 271, p. 618, 1996.

M. UEHARA *et al.*, *Superconductivity in the Ladder Material $\text{Sr}_{0.4}\text{Ca}_{13.6}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41.84}$* , in *J. Phys. Soc. Japan*, vol. 65, p. 2764, 1996.

C. HAYWARD et D. POILBLANC, *Luttinger Liquid Behavior and Superconducting Correlations in Ladders*, in *Phys. Rev. B*, vol. 53, p. 11721, 1996.

E. ORIGNAC et T. GIAMARCHI, *Effect of disorder on two strongly correlated coupled chains*, in *Phys. Rev. B*, vol. 56, p. 7167, 1997.

T. GIAMARCHI, E. ORIGNAC, D. POILBLANC et H. SCHULZ, *Les échelles quantiques*, in *Images de la Physique*, CNRS, 1999.