

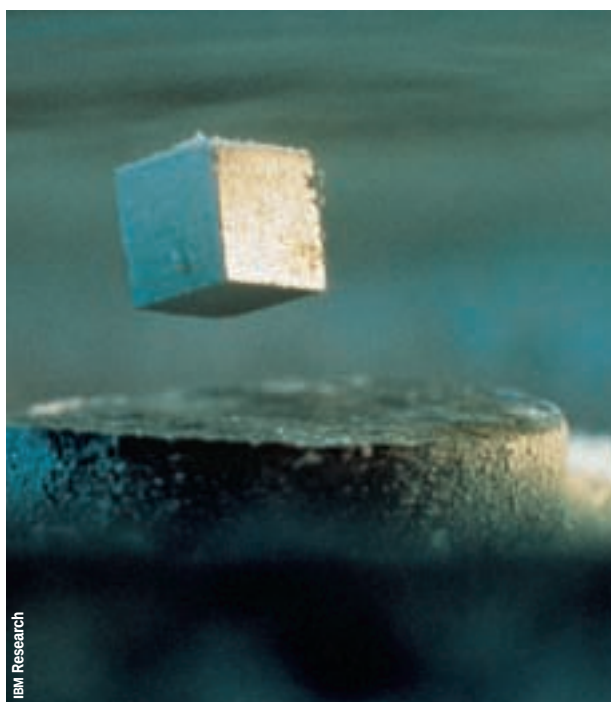
La supraconduction à haute température

JOHN KIRTLEY • CHANG TSUEI

Des expériences qui testent des phénomènes quantiques dans les matériaux conduisent vers une explication de la supraconduction à haute température.

Le 18 mars 1987, dès 19 heures 30, la salle de réception de l'hôtel Hilton de New York est comble. Plus de 2 000 physiciens s'y pressent, entassés jusque dans les couloirs, pour assister à une séance de communications du congrès de la Société américaine de physique. Cette séance, programmée à la va-vite en raison du grand nombre de communications envoyées en dernière minute, se prolonge jusqu'à trois heures du matin, sans que l'attention des participants faiblisse. Ceux-ci parleront ensuite d'un «Woodstock de la physique».

Quelques mois avant, à la fin de 1986, Georg Berdnoz et Alexander Müller, de la Société IBM à Zurich, ont fait sensation en annonçant qu'un oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane devient supraconducteur (il perd toute résistance électrique) au-dessous de la température critique de 35 kelvins (-238°C). Quoique basse, cette température est supérieure de plus de dix degrés aux températures critiques les plus élevées des supraconducteurs classiques, métaux ou alliages. Rapidement, des équipes se sont passionnées pour le phénomène ; leurs explorations les ont conduites à des matériaux nouveaux dont les températures critiques sont supérieures à 90 kelvins ; des rumeurs de supraconduction à 130 ou à 240 kelvins se sont même répandues. Cette animation est compréhensible : la décou-



1. LA LÉVITATION D'UN PETIT AIMANT au-dessus d'un supraconducteur à base d'yttrium préfigure peut-être des applications industrielles telles que la lévitation des trains.

verte d'un matériau qui serait supraconducteur à la température ambiante (autour de 300 kelvins) bouleverserait l'électricité et l'électronique.

Dès le mois de mars 1987, des physiciens présentent donc leurs résultats théoriques et expérimentaux sur les nouveaux supraconducteurs. Les utilisations potentielles de ces matériaux ne sont pas leur seule motivation. Certains d'entre eux craignent aussi que ces oxydes de cuivre, nommés cuprates, ne livrent leurs secrets à d'autres collègues ; le prix Nobel de physique a déjà été attribué quatre fois (un record pour un seul sujet) pour des

travaux sur la supraconduction. Ceux qui élaboreraient la théorie de la supraconduction à haute température seraient certainement honorés de cette distinction (quelques mois plus tard, G. Berdnoz et A. Müller reçoivent effectivement le prix Nobel de physique pour leur découverte).

Aujourd'hui, presque dix ans ont passé, mais des milliers de physiciens essaient encore de comprendre pourquoi et comment les cuprates sont supraconducteurs à de si hautes températures. Ces questions restent ouvertes, mais les progrès ont été considérables. Des expériences récentes montrent des différences fondamentales entre les cuprates et les supraconducteurs classiques : leurs résultats contribuent à réduire le nombre de

théories possibles. Elles indiquent en particulier que l'une d'entre elles mérite l'attention des physiciens : la théorie de l'onde de spin, selon laquelle la supraconduction est liée à l'excitation collective des moments magnétiques, ou spins, des atomes.

L'idée que le magnétisme soit à l'origine du phénomène est incompatible avec la théorie classique de la supraconduction à basse température. Cette dernière apparaît lorsque les électrons s'apparient en «paires de Cooper» (d'après Leon Cooper, de l'Université de l'Illinois, qui a introduit ce concept). Contrairement aux

électrons isolés, les paires de Cooper n'interagissent pas et ne sont pas perturbées par les défauts du milieu conducteur : leur mouvement ne rencontre aucune résistance. Dans un métal refroidi jusque dans l'état supraconducteur, au-dessous de la température dite critique, un courant électrique circule sans qu'aucune tension ne soit appliquée et, dans une boucle, il persiste indéfiniment.

L'existence de paires d'électrons dans les supraconducteurs est un phénomène remarquable : deux particules chargées négativement devraient se repousser. Dans les années 1950, L. Cooper et ses collègues John Bardeen et Robert Schrieffer ont expliqué ce phénomène en élaborant la

théorie BCS (ces trois lettres sont leurs initiales). Selon cette dernière, une partie de la charge négative de chaque électron est masquée par le déplacement des autres électrons : la force de répulsion entre les électrons d'une paire de Cooper est alors réduite.

Un échange de phonons

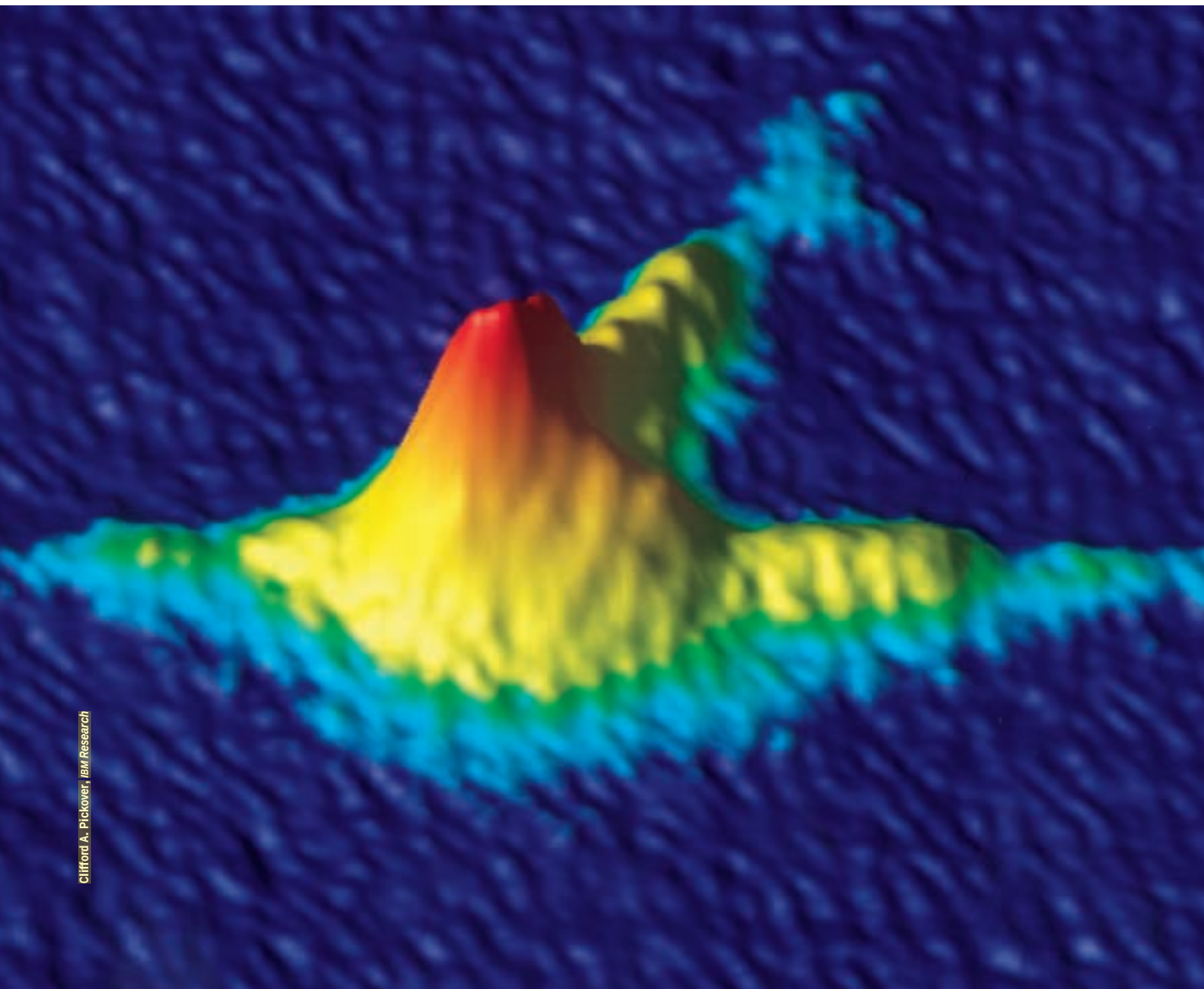
D'autre part, les ions positifs qui constituent le métal (les atomes, neutres, deviennent des ions positifs après avoir libéré les électrons de conduction) servent d'intermédiaires dans l'appariement. Lorsqu'il se déplace, un électron modifie légèrement la position des ions situés sur son parcours. Ces distorsions, nommées phonons, créent de petites

zones positives qui attirent l'autre électron de la paire. Ce phénomène ressemble à ce qui se produit lorsque l'on pose deux boules de bowling sur un lit : la déformation du matelas créée par la première boule favorise le rapprochement de la seconde. L'analogie est toutefois partielle : les électrons, à la différence des boules de bowling, se repoussent fortement.

D'autres physiciens expliquent que les électrons restent appariés en échangeant des phonons, comme deux joueurs de rugby progressent sur le terrain en se passant le ballon pour éviter les plaquages. Le mécanisme des phonons, une fois inclus dans la théorie BCS, explique parfaitement la supraconduction des matériaux classiques.

2. EN MESURANT LE CHAMP MAGNÉTIQUE dans un contour supraconducteur posé à la jonction de trois cristaux, on étudie le comportement des charges électriques dans le matériau. De telles

expériences montrent que le mécanisme de la supraconduction à haute température serait complètement différent de celui de la supraconduction classique.



J. Bardeen a proposé une autre analogie pour expliquer la mobilité des paires de Cooper : ces dernières sont comme de petits groupes de personnes accrochées les unes aux autres dans une foule dense. Une telle foule en mouvement est difficile à arrêter car, pour arrêter une personne, il faut briser l'élan de tout un groupe. Le flot d'individus s'écoule autour des obstacles sans se briser.

Toutefois plusieurs équipes pensent que l'échange de phonons entre les électrons d'une paire de Cooper n'explique pas l'appariement dans les oxydes de cuivre à haute température : dans les supraconducteurs de température critique élevée, les interactions des électrons et des phonons devraient être si fortes qu'elles déformeraient la structure du matériau et lui feraient perdre sa supraconductivité, voire sa conductivité.

En outre, la théorie BCS suppose que l'énergie des électrons est supérieure à celle des phonons. Comme les électrons se déplacent plus vite que les phonons, le premier électron est loin de l'ion qu'il a déplacé lorsque le second électron arrive. La distance ainsi introduite entre les électrons réduit leur répulsion mutuelle. Dans les cuprates, au contraire, électrons et phonons auraient des vitesses voisines, ce qui réduirait la distance entre les électrons.

Jusqu'ici, nous avons considéré que la conduction électrique était assurée par les électrons. Dans la plupart des cuprates, ce sont en fait les trous, les zones chargées positivement laissées par le départ des électrons, qui créent un courant en se déplaçant. Des trous apparaissent lorsqu'on ajoute au matériau des atomes supplémentaires nommés dopants, qui captent des électrons. Dans la suite de cet article, nous désignerons sous le nom de « porteurs » toutes les particules qui forment les paires de Cooper.

Dans les cuprates (où l'on observe effectivement la formation de paires de Cooper), quel « ballon de rugby » les porteurs d'une paire de Cooper échan- gent-ils pour maintenir leur cohésion ? Nous avons vu que ce ne sont probablement pas des phonons. Plusieurs autres candidats ont été proposés : les excitons (les porteurs déplacent localement le nuage de charges qui les entoure), les plasmons (les porteurs de charge provoquent un déplacement collectif du nuage électrique) et les polarons (les porteurs déplacent de façon

importante les ions et les autres porteurs de charge au milieu desquels ils évoluent). D'autres théories considèrent chaque porteur comme la combinaison de deux particules dont l'une transporterait la charge électrique et l'autre le moment magnétique : ces deux particules, dissociées dans les cuprates, sauteraient entre les couches du matériau (dans les cuprates, plusieurs couches isolent la principale couche conductrice, formée d'oxyde de cuivre).

Aucune expérience ni aucun résultat n'ont été admis par l'ensemble des physiciens comme des preuves irréfutables en faveur d'un mécanisme ou d'un autre. On comprend toutefois mieux la symétrie de l'état supracon-

ducteur, et l'on espère que ce progrès permettra de tester les théories concurrentes.

La symétrie des paires

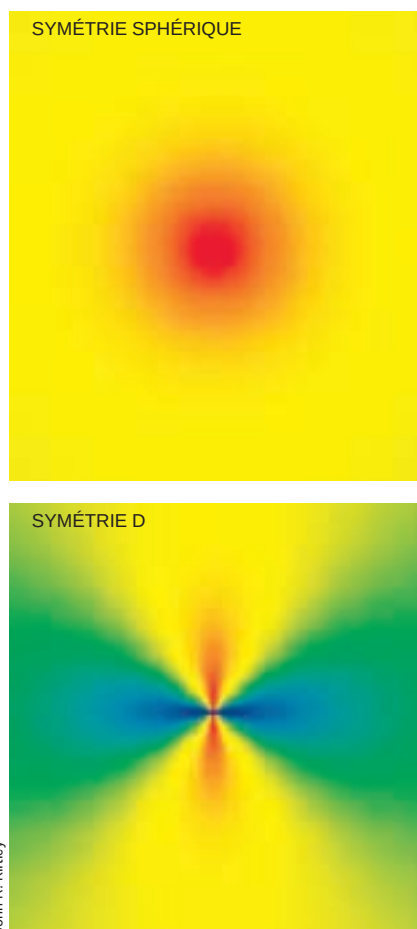
La symétrie dont il est question ici est celle de la « fonction d'onde », avec laquelle on décrit mathématiquement l'état supraconducteur. La fonction d'onde caractérise notamment les mouvements relatifs des deux porteurs d'une paire de Cooper. Elle indique la probabilité de présence d'un porteur en fonction de sa position par rapport à l'autre.

Dans les supraconducteurs classiques, la fonction d'onde des paires de Cooper est parfaitement symétrique : elle est sphérique. Autrement dit, la probabilité de trouver l'un des porteurs de la paire de Cooper décroît de la même façon exponentielle dans toutes les directions à mesure que l'on s'éloigne de l'autre porteur. La représentation graphique de la fonction d'onde, centrée sur l'un des porteurs de la paire, est une sphère (voir la figure 3).

Les fonctions d'onde de symétrie *d* sont moins symétriques que les fonctions d'onde sphériques : elles forment graphiquement quatre lobes dans un plan, comme les feuilles d'un trèfle à quatre feuilles. Chaque lobe représente les positions possibles de l'un des deux porteurs d'une paire de Cooper par rapport à l'autre.

Comment les physiciens étudient-ils la formation des paires de Cooper à l'aide de la symétrie de l'état supraconducteur ? Les différents mécanismes proposés ne conduisent pas à la même symétrie. Les théoriciens sont divisés en deux camps principaux. Les premiers modifient la théorie BCS et proposent des mécanismes pour lesquels la symétrie des états supraconducteurs est sphérique. Les seconds proposent des mécanismes complètement nouveaux, qui conduisent à des états de symétrie *d*.

Dans la deuxième catégorie, la théorie qui semble dominante parmi les physiciens est celle de l'onde de spin, principalement soutenue par Douglas Scalapino, de l'Université de Santa Barbara, et David Pines, de l'Université de l'Illinois. Le mécanisme en est le suivant : une charge en mouvement modifie l'orientation des spins (les moments cinétiques) des ions constitutifs du cristal supraconducteur ; elle laisse ainsi



3. LA SYMÉTRIE SPHÉRIQUE et la symétrie *d* sont les deux types de symétrie possibles de la fonction d'onde d'une paire de porteurs de charge qui transporte le courant dans un supraconducteur. La fonction d'onde représente la probabilité de présence d'un porteur par rapport à l'autre. Dans la symétrie sphérique, l'un des porteurs de charge d'une paire de Cooper est dans une sphère centrée sur son partenaire. Pour une fonction d'onde de symétrie *d*, le porteur est dans l'un des quatre lobes centrés sur l'autre porteur.

John R. Kirtley