

PLAGE DE SEVEN MILE, DONGARA, AUSTRALIE

Au large de la plage de Seven Mile, dans le canal de Geelvink, un plateau continental grouille de vie, avec des espèces typiques de l'océan Indien. On distingue de nombreux coraux et coquillages minuscules. Les éléments les plus originaux sont des «squelettes» d'éponges triaxiales, qui ressemblent à des glaçons, ainsi que des coquillages bivalves et des gastéropodes globulaires et discoïdes immatures.



Walter N. Mack

× 21,5

TAKETOMI SHIMA, ÎLES DE RYUKYU, JAPON

Quelques îles méridionales du Japon ont un sable étoilé, formé de tests de foraminifères, les enveloppes complexes avec de nombreux petits compartiments que fabriquent ces animaux unicellulaires. On classe ces animaux d'après la forme de leur test. L'échantillon montré ici contient essentiellement *Baculogypsina sphaerulata*. On voit aussi une coquille ronde d'*Amphistegina madagascariensis* (en haut à droite) et une coquille de gastéropode en forme de spirale.



× 15

Walter N. Mack



Dan Wagner

TAKETOMI SHIMA
Îles de Ryuku, Japon

Walter MACK a été professeur à l'Université du Michigan. Il collectionne des sables du monde entier. Elizabeth LEISTIKOW travaille pour la Société FSH/Mayo Health Systems.

Raymond SIEVER, *Sand*, Scientific American Library, Freeman, 1988.

Sur *Internet*, un musée japonais du sable est à l'adresse : <http://www.yo.rim.or.jp/~smiwa/museum/e-museum.html>.

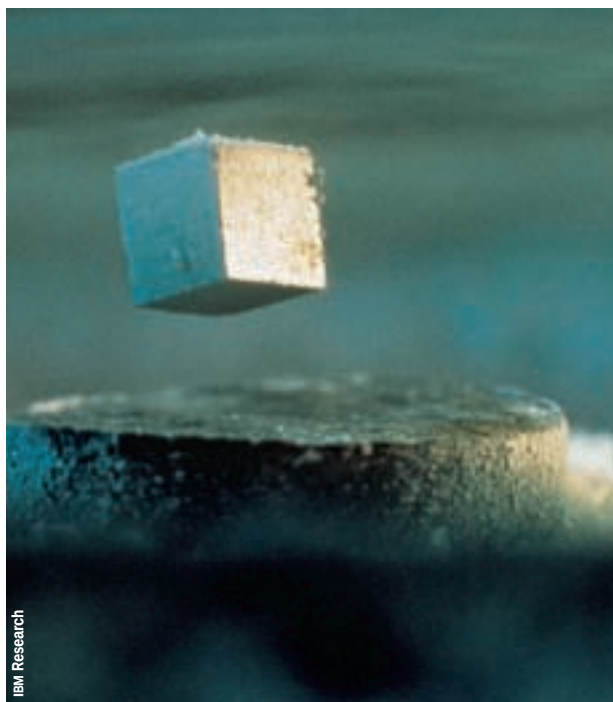
La supraconduction à haute température

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 Bednorz 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. Bednorz 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

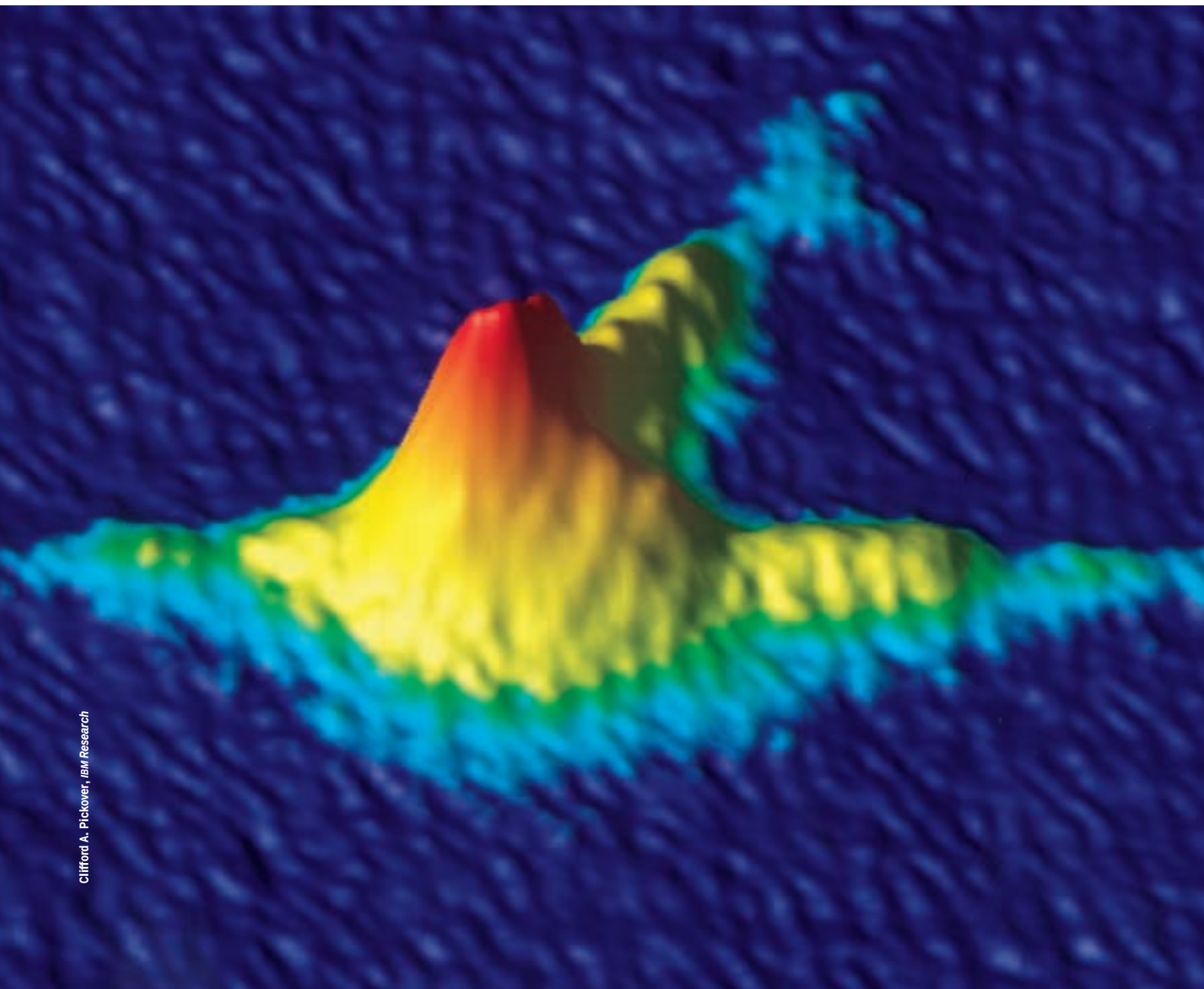
D'autre part, les ions positifs qui constituent le métal (les atomes, neutres, deviennent des ions positifs après avoir libéré les électrons de conduction) servent d'intermédiaires dans l'appariement. Lorsqu'il se déplace, un électron modifie légèrement la position des ions situés sur son parcours. Ces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

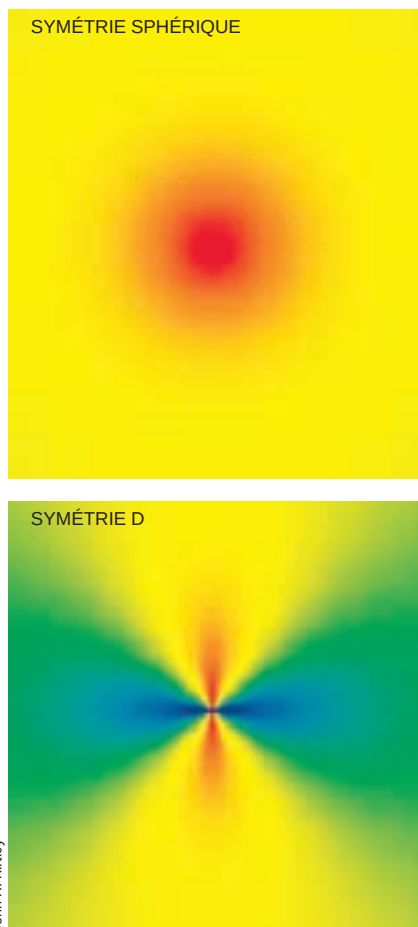
La symétrie dont il est question ici est celle de la «fonction d'onde», avec laquelle on décrit mathématiquement l'état supraconducteur. La fonction d'onde caractérise notamment les mouvements relatifs des deux porteurs d'une paire de Cooper. Elle indique la probabilité de présence d'un porteur en fonction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

dans son sillage une perturbation magnétique, l'onde de spin. Cette perturbation attire le second porteur de la paire de Cooper. Comme elle a une courte durée de vie, l'onde de spin est aussi nommée fluctuation de spin.

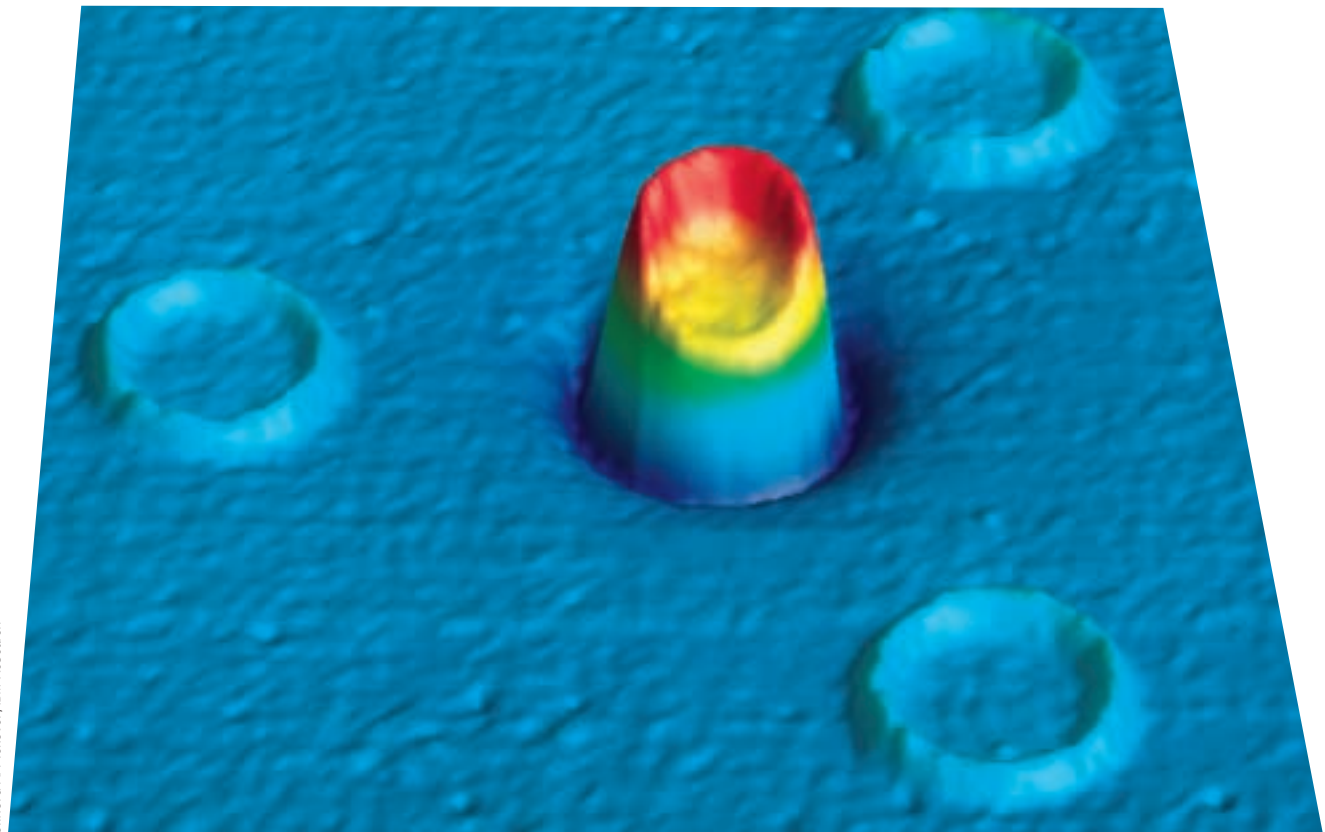
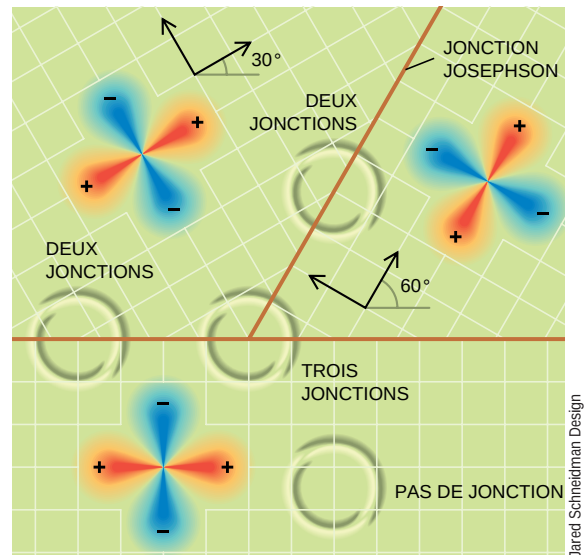
La connaissance de la symétrie de l'état supraconducteur des cuprates ne permettra pas, seule, de trancher entre toutes les théories (contrairement à l'espoir de nombreux physiciens) : différents mécanismes conduisent à la même symétrie. En revanche, elle en éliminera : la théorie d'onde de spin devrait être abandonnée si l'on démontrait que l'état supraconducteur n'est pas de symétrie d .

Des directions privilégiées

Si la fonction d'onde est de symétrie d , les paires de Cooper sont plus faiblement liées dans certaines directions

du réseau cristallin du supraconducteur. Des porteurs isolés se déplacent alors en suivant ces directions. Les expérimentateurs ont recherché ces porteurs isolés de plusieurs façons : étude de la pénétration d'un champ magnétique dans le supraconducteur, mesure de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de ce dernier. Ces expériences, qui indiquent généralement la présence de porteurs isolés à des températures bien inférieures à la température critique (où tous les porteurs devraient être appariés), n'ont toutefois pas convaincu les physiciens, car les mesures indirectes sont souvent compatibles avec d'autres types de symétrie, par exemple des symétries sphériques modifiées.

4. UNE EXPÉRIENCE SUR UN ANNEAU SUPRACONDUCTEUR déposé sur trois cristaux adjacents indique que la fonction d'onde des porteurs de charge des oxydes de cuivre (qui décrit leur position relative) serait de symétrie d (à droite). Trois cristaux de supraconducteur à base d'yttrium sont tournés les uns par rapport aux autres et séparés par des barrières isolantes. On y grave quatre anneaux, de sorte que l'un d'entre eux traverse trois jonctions et les autres deux ou zéro. Si les fonctions d'onde des porteurs de charge avaient une symétrie d , on devrait observer un demi-quantum de flux magnétique dans l'anneau aux trois jonctions et rien dans ceux ayant un nombre pair de jonctions. La détection du demi-quantum de flux (ci-dessous) conforte l'hypothèse de la symétrie d .



Ces expériences ont montré une variation angulaire de la force de couplage, mais elles restaient insuffisantes, car le signe de la fonction d'onde des états de symétrie d change lorsque l'on passe d'un lobe à l'autre, en tournant dans leur plan. Les deux lobes situés sur le même axe ont le même signe, opposé à celui des deux lobes situés sur l'axe perpendiculaire. Comme les expériences réalisées ne détectaient pas ces différences de signe, elles ne prouvaient pas irréfutablement que la symétrie était de type d .

Comment déterminer le signe des lobes? Nous avons utilisé la capacité d'un anneau supraconducteur à pié-

ger les champs magnétiques dans le disque qu'il circonscrit. Dans le cas des supraconducteurs classiques, caractérisés par des fonctions d'onde à symétrie sphérique, le flux magnétique ainsi piégé (l'intensité du champ multiplié par l'aire du disque inscrit) est quantifié: c'est un multiple d'une constante nommée quantum de flux magnétique (un quantum de flux est égal au rapport entre la constante de Planck et deux fois la charge de l'électron). Les anneaux contiennent un nombre entier de quanta de flux.

Selon des calculs d'énergie et de flux magnétique, des anneaux supraconducteurs où la symétrie des paires

de Cooper serait de type d peuvent, dans certaines conditions, piéger des nombres demi-entiers de quanta de flux. La présence ou l'absence de demi-quanta de flux permet de déterminer si les lobes changent de signe.

Dieter Wohlleben, à Cologne, est le premier à avoir détecté des signes d'aimantation particulière de nouveaux supraconducteurs. Puis notre équipe a obtenu les premières images de ces demi-quanta de flux par observation directe. Pour cela, nous avons fabriqué des anneaux de cuprate coupés par des barrières isolantes assez minces pour que les paires de Cooper les traversent par effet tunnel. Ce phénomène est

Une expérience ne fait pas un modèle

Il faut souligner l'astuce et l'élégance des expériences de John Kirtley et de Chang Tsuei, effectuées sur plusieurs supraconducteurs (ils en ont examiné quatre relevant de trois types de structures; on compte aujourd'hui environ 25 structures cristallines et 50 composés différents). Ces expériences sondent à la fois le signe et l'orientation des lobes de la fonction d'onde de l'état supraconducteur: leurs résultats prouveraient que la symétrie est d et que la fonction d'onde est représentée par un «trèfle à quatre feuilles» dont les lobes sont orientés selon les axes cristallographiques du composé. Quelle est la force démonstrative de ces observations?

Une première objection est d'ordre expérimental. Les résultats d'expériences réalisées par d'autres équipes sur le même composé à base d'yttrium sont aussi en faveur d'une symétrie d . Toutefois les expériences du groupe de Robert Dynes, à San Diego, confirmées par Jérôme Lesueur, à Orsay, montrent qu'un courant Josephson passe entre ce matériau et un métal supraconducteur classique, le plomb, décrit par une fonction d'onde de symétrie sphérique. Comme la mécanique quantique interdit formellement le passage de paires de Cooper d'un état à symétrie sphérique vers un état à symétrie d , la fonction d'onde de l'état supraconducteur dans ce cuprate contiendrait donc une composante sphérique non négligeable. C'est d'ailleurs ce qu'ont montré théoriquement Marie-Thérèse Béal-Monod, d'Orsay, et Kasumi Maki, de Los Angeles.

Toujours sur le plan expérimental, les propriétés d'une jonction Josephson varient selon qu'un isolant ou un métal sépare les deux cristaux supraconducteurs. J. Kirtley et C. Tsuei considèrent que, dans leur expérience, toutes les jonctions contiennent un isolant et que le réseau cristallin n'est pas déformé localement. Ils n'ont toutefois pas de certitude expérimentale de ces faits. D'autres expériences, qu'ils qualifient d'insuffisantes parce qu'elles ne permettent pas de déterminer le signe de la fonction d'onde, sont plus fiables. Ainsi celles qui mesurent la pénétration du champ électromagnétique (comme nous le faisons à

l'École normale supérieure) n'utilisent pas de jonctions tunnel et sont beaucoup moins sensibles aux effets de surface. Dans le composé à l'yttrium, les expériences du groupe de Vancouver, au Canada, confirmées par les nôtres, sont d'ailleurs en faveur d'une symétrie d .

Une autre objection est d'ordre théorique. Tous les cuprates supraconducteurs possèdent des plans formés d'atomes de cuivre et d'oxygène: un, deux ou trois plans rapprochés, selon les structures. Deux groupes de plans sont séparés par des blocs "réservoirs", qui alimentent les plans en porteurs de charge. Ces porteurs sont majoritairement des trous, mais dans un composé à base de néodyme, de cérium et de cuivre, les porteurs sont des électrons. Ce composé, qui n'a qu'un plan cuivre-oxygène par maille élémentaire (semblable en cela au matériau découvert par G. Berndnorz et A. Müller (baryum, lanthane, cuivre) ou au système au thallium, baryum, cuivre examiné par J. Kirtley et C. Tsuei), semble présenter une symétrie s . Si les trous et les électrons sont bien équivalents, comme les physiciens l'admettent communément, alors la présence d'un seul plan cuivre-oxygène par maille élémentaire ne suffit pas pour définir la nature de la supraconduction. Cela affaiblirait la théorie de l'onde de spin en tant que théorie microscopique générale de la supraconduction à haute température critique.

Rappelons enfin que la symétrie d n'est pas la signature incontestable d'un appariement par les fluctuations magnétiques. D'autres modèles ont été proposés, en particulier celui de Roland Combescot, à l'École normale supérieure, qui a le mérite de réconcilier un grand nombre d'observations expérimentales apparemment incompatibles. Il est donc exact, ainsi que le rappellent les auteurs à la fin de leur article, qu'il faut encore des études sur les nombreux cuprates. Nous ajouterons aussi la nécessité de croiser les différentes approches expérimentales avant d'infirmer des hypothèses ou de conforter un mécanisme.

Nicolas BONTEMPS, École normale supérieure, Laboratoire de physique de la matière condensée

connu sous le nom d'effet Josephson, d'après Brian Josephson, qui a prévu son existence en 1962.

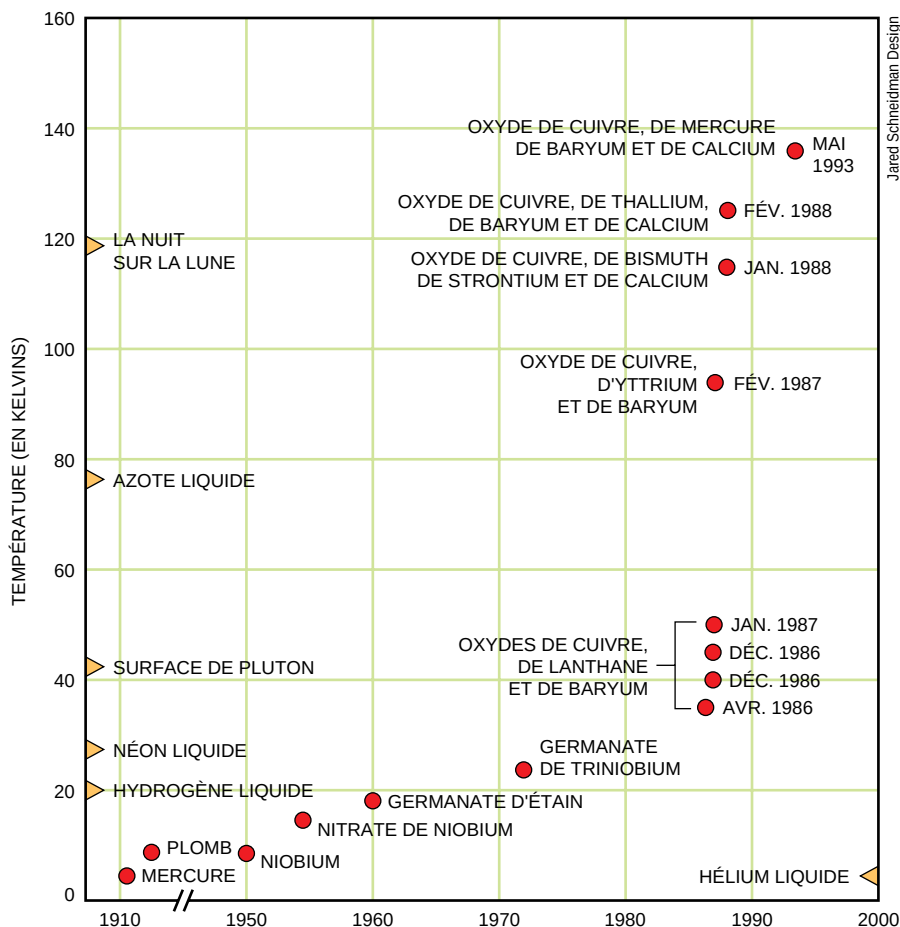
L'effet Josephson ne se produit que si les paires de Cooper sont déphasées de part et d'autre de la jonction (le terme de phase fait ici référence à une caractéristique de la fonction d'onde. Elle indique approximativement dans quelle partie d'un cycle elle se trouve). Avec des supraconducteurs à symétrie d , on peut fabriquer des anneaux, coupés par un nombre impair de jonctions Josephson, dans lequel les paires de Cooper reviennent, après un tour, en opposition de phase. Ce changement de phase correspond à un changement de signe de la fonction d'onde.

Lorsque l'on refroidit l'anneau, ce changement de signe engendre spontanément un courant électrique tel que l'anneau contienne exactement un demi-quantum de flux (à cause du changement de signe de la fonction d'onde, l'intégrale le long de l'anneau qui permet de calculer le flux ne s'annule pas). Quand on refroidit l'anneau dans un champ magnétique, le flux magnétique qui le traverse est un multiple du demi-quantum de flux.

Trois jonctions dans un anneau

Pour fabriquer un anneau coupé par un nombre impair de jonctions Josephson, nous l'avons fait croître, en couche mince, sur un substrat formé de trois cristaux tournés de 30 degrés les uns par rapport aux autres ; ainsi l'anneau traversait-il les trois interfaces qui constituaient des jonctions Josephson (voir la figure 4). Si les paires de Cooper étaient dans un état de symétrie d , un tour dans l'anneau devait changer le signe de leur fonction d'onde (nous ne savons pas exactement combien de fois la fonction d'onde change de signe, mais nous sommes certains que c'est un nombre impair de fois). Au contraire, si la fonction d'onde des paires de Cooper était de symétrie sphérique, elle devait avoir le même signe partout, et les jonctions Josephson ne devaient pas modifier le signe : il devait être conservé après un tour.

Nous avons alors refroidi cet anneau supraconducteur «tricristallin» (d'une largeur d'environ 50 micromètres) à une température inférieure à sa température critique. Le flux



5. L'AUGMENTATION RAPIDE des températures critiques des supraconducteurs est due à la découverte de la supraconductivité des oxydes de cuivre. Aucune des théories proposées pour expliquer la supraconduction à haute température n'écarter la possibilité d'une supraconduction à température ambiante, mais on n'a pas encore réalisé des matériaux ayant cette propriété.

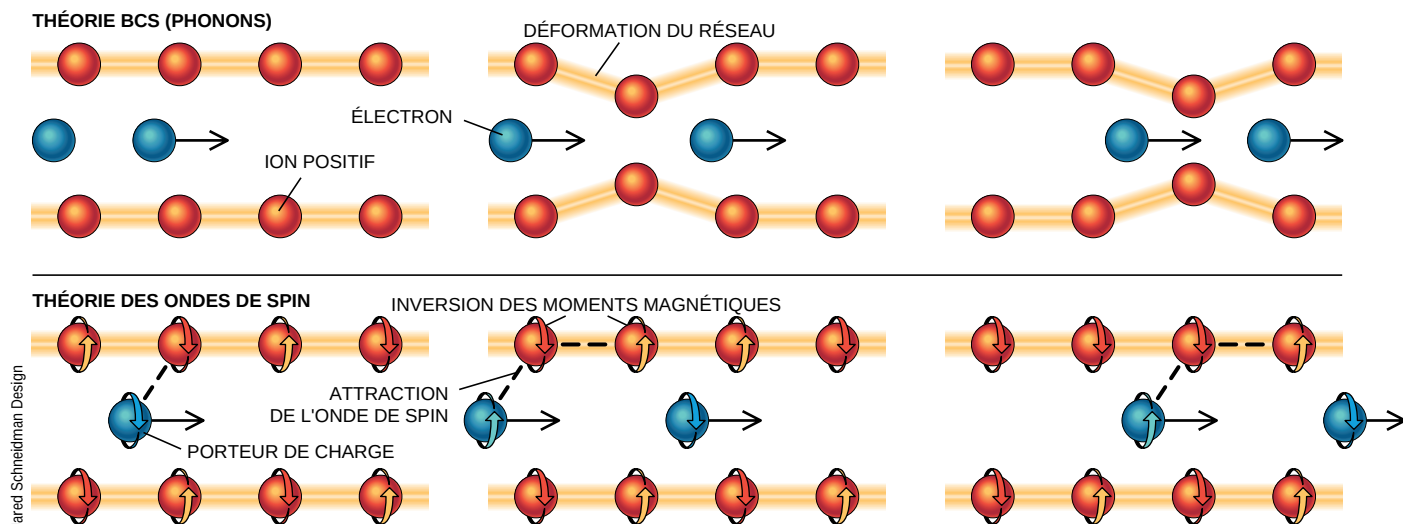
magnétique qui le traversait avait la valeur d'un demi-quantum : la marque d'une symétrie d (nous aurions obtenu un nombre entier de quanta avec une symétrie sphérique).

Nous avons visualisé le champ magnétique piégé par l'anneau à l'aide d'un dispositif supraconducteur de mesure par interférence, ou SQUID, le détecteur de champ magnétique le plus sensible que l'on connaisse aujourd'hui. Un étalonnage minutieux du signal de sortie du SQUID, par plusieurs méthodes, a permis de mesurer sans ambiguïté la présence d'exactly un demi-quantum de flux dans des anneaux tricristallins. Des anneaux témoins, qui traversaient un nombre pair de jonctions Josephson, ne contenaient pas de flux quand ils étaient refroidis dans les mêmes conditions (car le signe change un nombre pair de fois et retrouve sa valeur initiale après un tour).

Nous avons aussi fait varier les conditions expérimentales afin de

montrer que les résultats obtenus provenaient de la symétrie de la fonction d'onde des paires de Cooper et non de phénomènes physiques parasites. De légères modifications dans l'orientation relative des trois cristaux sur lesquels sont fabriqués les anneaux ont fait apparaître et disparaître, selon les cas, le demi-quantum de flux spontané. En appliquant un faible champ magnétique, nous avons en outre observé que les anneaux témoins piégeaient des flux magnétiques multiples entiers du quantum du flux, prouvant ainsi qu'ils étaient en bon état. Des expériences menées sur des films et sur des contours fermés sans formes particulières ont aussi piégé spontanément un demi-quantum de flux, montrant que le phénomène a son origine dans la symétrie intrinsèque de la fonction d'onde du supraconducteur, pas dans la forme annulaire de l'échantillon.

Nous avons répété ces expériences avec d'autres cuprates, de structure



6. DEUX THÉORIES DE LA SUPRACONDUCTION sont présentées ici. Elles se fondent toutes deux sur l'appariement des porteurs de charge. Selon la théorie BCS, qui explique la supraconduction à basse température, un électron produit des phonons (il déforme le réseau cristallin, constitué par les ions positifs), qui attirent à leur tour un

second électron (*en haut*). Dans le modèle d'onde de spin que les physiciens ont élaboré pour expliquer la supraconduction à haute température, un porteur de charge perturbe le moment magnétique d'un ion, ce qui inverse le moment magnétique d'un voisin et provoque la venue d'un second porteur de charge de moment magnétique opposé (*en bas*).

plus complexe que le cuprate d'yttrium (l'oxyde de cuivre, de calcium, de strontium et de bismuth), aussi complexe (l'oxyde de cuivre, de baryum et de gadolinium) et plus simple (l'oxyde de cuivre, de baryum et de thallium). Les résultats ont tous été identiques. Nos expériences, tout comme celles d'autres équipes, sont toutes en faveur de la symétrie *d*.

Nous sommes aujourd'hui presque certains que les fonctions d'onde de l'état supraconducteur de différents cuprates a une symétrie *d*. La symétrie sphérique, observée dans des expériences, proviendrait de la capacité de certains cuprates, dans des conditions particulières, à révéler les deux types de symétrie. Ces résultats mettent en défaut le modèle classique BCS dans les supraconducteurs à haute température et confortent la théorie de l'onde de spin. Toutefois, si l'on admet une interaction fortement répulsive entre les porteurs (qui favorise une symétrie d'appariement à changement de signe), la plupart des autres mécanismes proposés (excitons, polarons, etc.) conduisent aux mêmes résultats.

Les expériences menées sur la symétrie permettent néanmoins de réduire la liste des mécanismes d'appariements possibles. Il est en outre important d'y soumettre d'autres cuprates. L'oxyde de cuivre, de cérium et de néodyme, dopé avec un excès d'électrons, semble posséder des états à symétrie sphérique. La confirmation de ce résultat gênerait les partisans

de la théorie de l'onde de spin, car beaucoup de physiciens pensent que le même mécanisme est responsable de la supraconductivité de tous les cuprates. Elle prouverait aussi que la complexité de ces matériaux est sous-évaluée. Une étude systématique de la symétrie en fonction de la composition permettrait sans doute d'évincer des théories.

Les industriels seront intéressés de savoir que la majorité des mécanismes proposés ne s'opposent pas à l'existence de supraconducteurs à température ambiante. Des calculs succincts, effectués avec le modèle d'onde de spin, prévoient que la température critique puisse dépasser 20 °C, voire atteindre plusieurs centaines de degrés.

Même si ces valeurs extrêmes sont fantaisistes, la possibilité de supraconduction à température ambiante est un progrès énorme par rapport à la théorie BCS dans sa forme la plus simple, qui fixe la limite vers 40 kelvins (−233 °C). L'identification du mécanisme aiderait ceux qui fabriquent de nouveaux supraconducteurs.

Il reste sans aucun doute beaucoup de travail avant de déterminer sans ambiguïté le mécanisme d'appariement. La technique d'observation des quanta de flux magnétique à travers des anneaux est un outil puissant qui aidera peut-être les chercheurs à comprendre pourquoi ces matériaux qui leur résistent tant résistent si peu à l'électricité.

John KIRTLEY et Chang TSUEI sont physiciens au Centre de recherches Thomas J. Watson de la Société IBM, à Yorktown Heights.

Michel LAGUÈS, *Les films supraconducteurs*, in *Pour la Science*, décembre 1993.

John CLARKE, *La détection des champs magnétiques*, in *Pour la Science*, octobre 1994.

D.J. SCALAPINO, *The Case for dx₂y₂ Pairing in the Cuprate Superconductors*, in *Physics Reports*, vol. 250, n° 6, pp. 329-365, janvier 1995.

Tim FOLGER, *Call Them Irresistible*, in *Discover*, vol. 16, n° 9, pp. 83-91, septembre 1995.

Paul CHU, *Les supraconducteurs dans l'industrie*, in *Pour la Science*, novembre 1995.

J.R. KIRTLEY, M.B. KETCHEN, C.C. TSUEI, J.Z. SUN, W.J. GALLAGHER, Lock-See YU-JAHNES, A. GUPTA, K.G. STAWIASZ et S.J. WIND, *Design and Applications of a Scanning SQUID Microscope*, in *IBM Journal of Research and Development*, vol. 39, n° 6, pp. 655-668, novembre 1995.

Barbara LEVI, *Experiments Probe the Wavefunction of Electron Pairs in High-T_c Superconductors*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 1, pp. 19-22, janvier 1996.

Ivars PETERSON, *Electron Pairs and Waves: Tackling the Puzzle of High-Temperature Superconductivity*, in *Science News*, vol. 149, n° 10, pp. 156-157, 9 mars 1996.

