

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

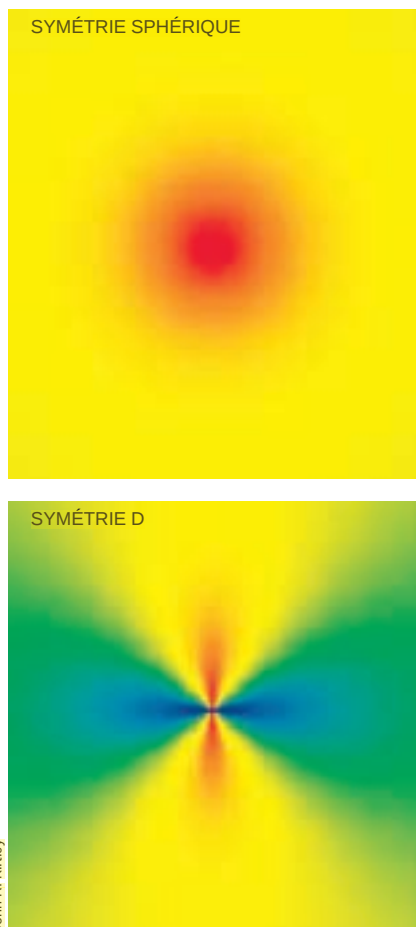
La symétrie dont il est question ici est celle de la « fonction d'onde », avec laquelle on décrit mathématiquement l'état supraconducteur. La fonction d'onde caractérise notamment les mouvements relatifs des deux porteurs d'une paire de Cooper. Elle indique la probabilité de présence d'un porteur en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

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.

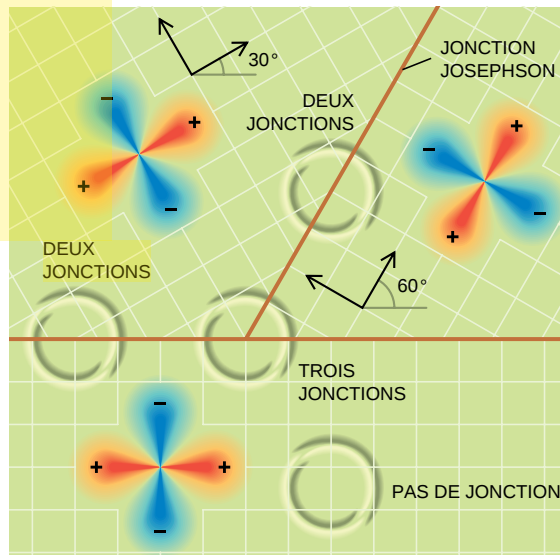
La connaissance de la symétrie de l'état supraconducteur des cuprates ne permettra pas, seule, de trancher entre toutes les théories (contrairement à l'espoir de nombreux physiciens) : différents mécanismes conduisent à la même symétrie. En revanche, elle en éliminera : la théorie d'onde de spin devrait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

Des directions privilégiées

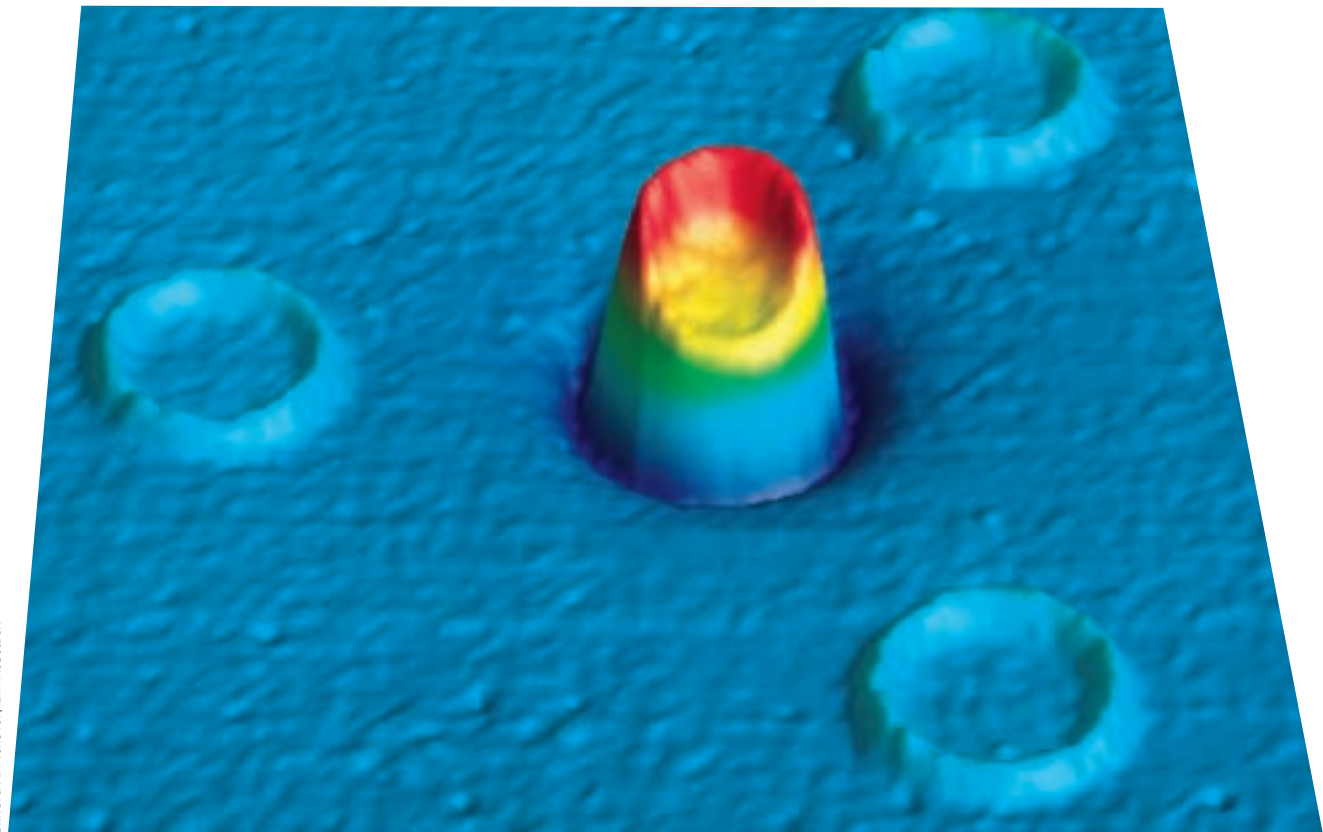
Si la fonction d'onde est de symétrie d , les paires de Cooper sont plus faiblement liées dans certaines directions

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 .



Jared Schneidman Design



Clifford A. Pickover, IBM Research