

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 .

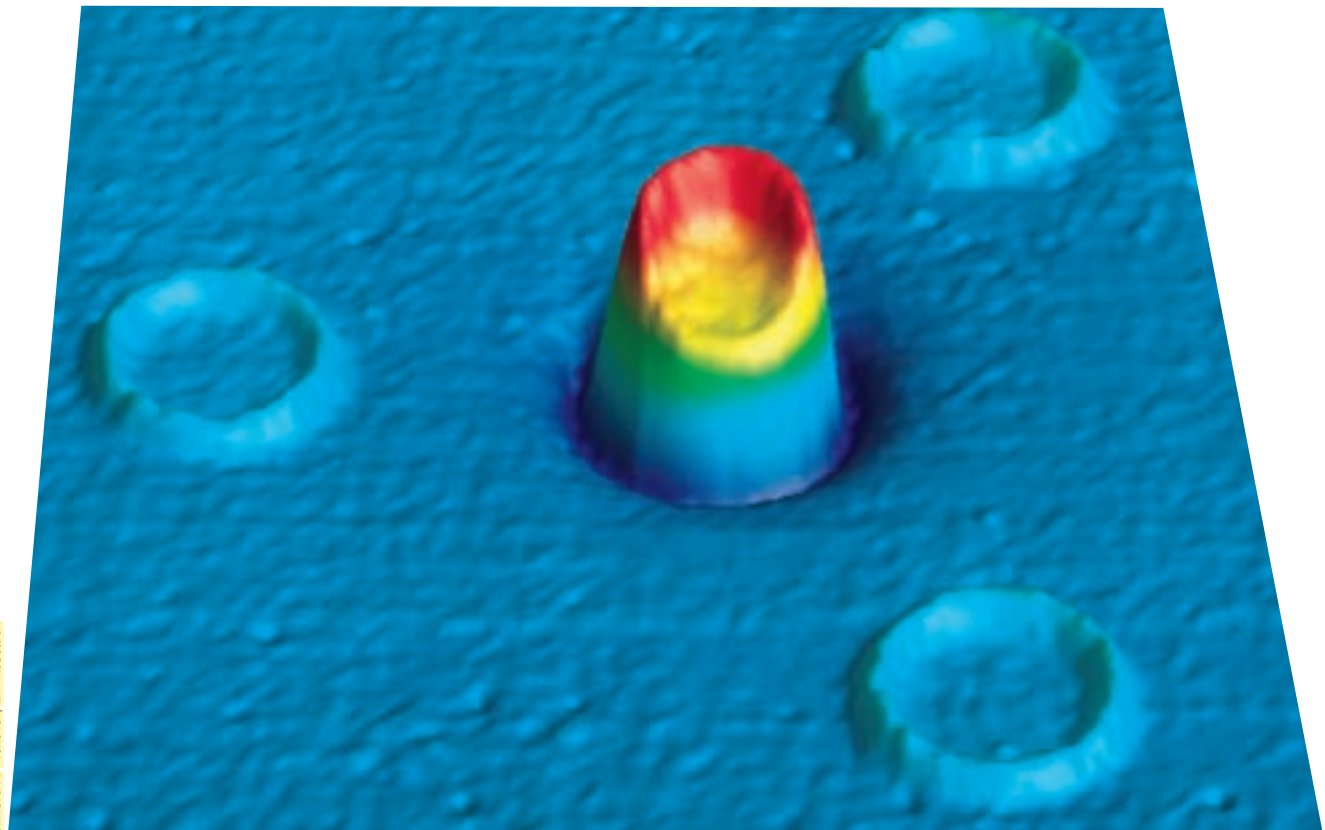
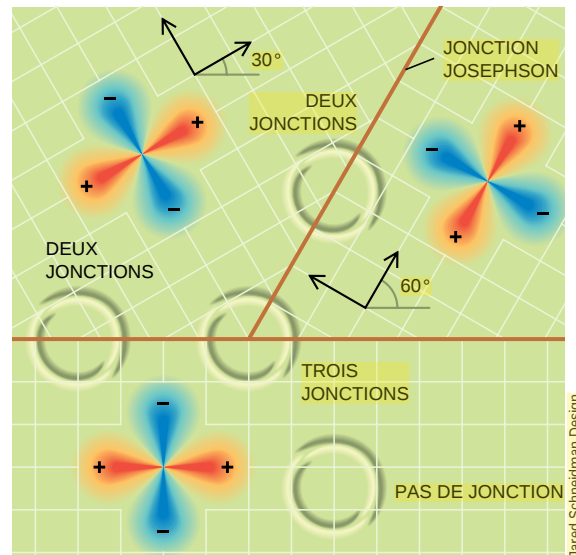
Des directions privilégiées

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 .

D'autres équipes ont alors cherché comment la force de cohésion des paires de Cooper varie selon les directions. Plusieurs sortes d'expériences ont été menées : mesure de l'énergie des porteurs arrachés du matériau par un rayonnement ultraviolet de fréquence élevée, mesure du décalage en fréquence de la lumière lors de sa traversée du matériau, étude du passage des électrons, par effet tunnel, à travers de minces couches isolantes, de divers matériaux vers des cuprates de différentes compositions.



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'infirmes des hypothèses ou de conforter un mécanisme.

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