

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

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

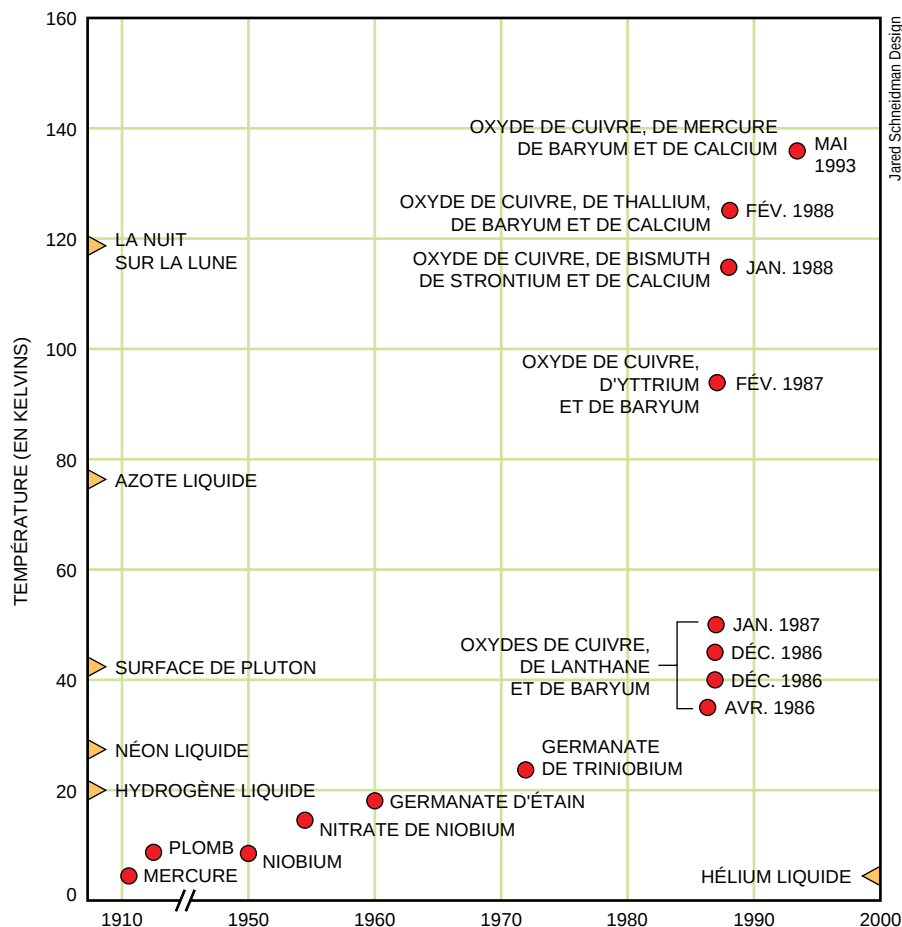
L'effet Josephson ne se produit que si les paires de Cooper sont déphasées de part et d'autre de la jonction (le terme de phase fait ici référence à une caractéristique de la fonction d'onde. Elle indique approximativement dans quelle partie d'un cycle elle se trouve). Avec des supraconducteurs à symétrie 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