

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

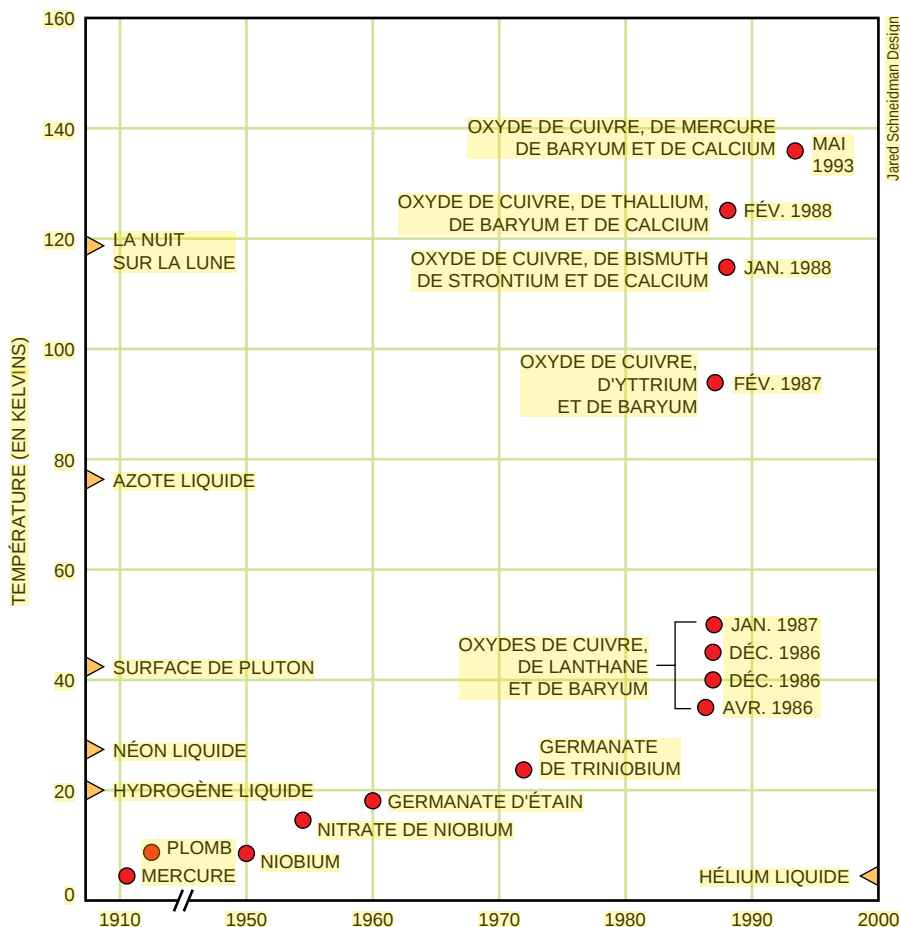
L'effet Josephson ne se produit que si les paires de Cooper sont déphasées de part et d'autre de la jonction (le terme de phase fait ici référence à une caractéristique de la fonction d'onde. Elle indique approximativement dans quelle partie d'un cycle elle se trouve). Avec des supraconducteurs à symétrie 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'écarte la possibilité d'une supraconduction à température ambiante, mais on n'a pas encore réalisé des matériaux ayant cette propriété.

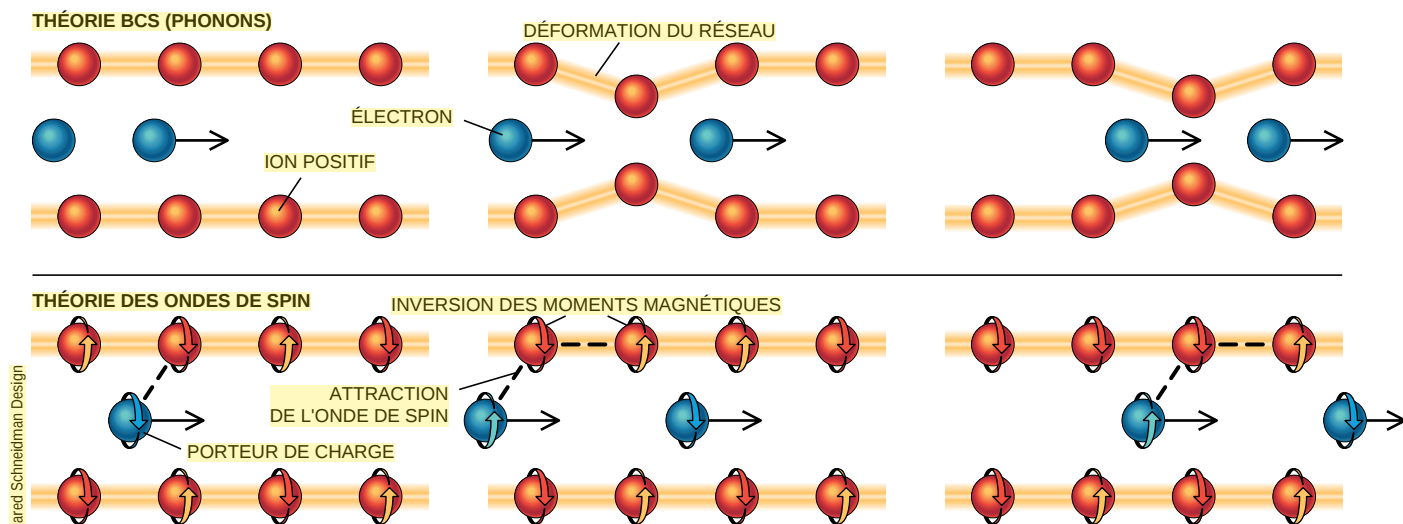
magnétique qui le traversait avait la valeur d'un demi-quantum : la marque d'une symétrie d (nous aurions obtenu un nombre entier de quanta avec une symétrie sphérique).

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.

Le développement de l'embryon

CHRISTIANE NÜSSLEIN-VOLHARD

Des différences de concentration de quelques molécules clés commandent l'organisation de l'embryon.

Les ours s'accouplent en hiver, puis la femelle se retire dans une grotte pour donner naissance, après plusieurs mois de gestation, à trois ou quatre petits. À leur naissance, ce ne sont que des boules informes de chair, dont seules les griffes sont déjà formées. Ils prennent forme sous les coups de langue de leur mère.

Cette théorie, rapportée par Plin l'Ancien, visait à expliquer l'un des plus grands mystères de la vie : comment un œuf, cellule unique quasi homogène, donne-t-il un animal constitué de dizaines de types de cellules différentes, toutes correctement placées ? Comment la complexité croît-elle au cours du développement ? Une autre théorie s'imposa aux XVIII^e et XIX^e siècles : un œuf n'est pas dépourvu de structure, mais contient une mosaïque invisible de «déterminants» qui, en se déployant, forme l'organisme final. Aujourd'hui, on comprend mal une telle idée : si un œuf avait contenu la structure complexe d'un animal adulte sous forme invisible, il aurait également dû renfermer les structures de toutes les générations successives, car les femelles, une fois adultes, auraient produit des œufs qui auraient contenu des êtres miniatures, et ainsi de suite. Même Johann Wolfgang Goethe, qui se piquait de science, soutenait cette hypothèse de préformation, à défaut d'une autre explication.

Il y a environ 100 ans, les embryologistes commencèrent à comprendre que le développement n'est pas totalement déterminé dès la formation de l'œuf.

Ils découvrirent que certaines manipulations expérimentales modifient notablement le développement et que l'hypothèse de la préformation n'explique pas ces modifications : quand on sépare en deux cellules un œuf d'oursin au stade de deux cellules, chacune engendre un animal complet ; pourtant, sans intervention, les deux cellules fusionnées n'auraient formé qu'un seul animal. Quand une telle scission se produit naturellement sur un embryon humain, deux vrais jumeaux voient le jour.

L'hypothèse des gradients s'établit alors progressivement : Theodor Boveri, à l'Université de Wurtzbourg, le «père» de la théorie chromosomique de l'hérédité, imagina que la concentration en «quelque chose» variait d'une extrémité de l'œuf à l'autre ; les cellules d'un organe qui se développe auraient réagi aux variations de concentration d'une substance particulière, un morphogène. Les cellules réagi-

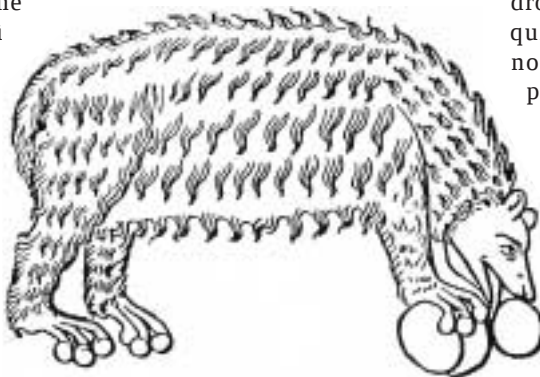
raient différemment à des concentrations différentes du morphogène.

Les embryologistes n'admirent pas immédiatement que les cellules reconnaissent leur position dans l'embryon d'après la concentration des morphogènes. On opposait notamment une question importante à cette hypothèse : comment un gradient morphogénique pouvait-il s'établir et se maintenir pendant une période suffisamment longue du développement ? Dans un tissu, constitué de nombreuses cellules, les membranes cellulaires pourraient créer un gradient de concentration en s'opposant à la diffusion des grosses molécules, mais, dans l'œuf, cellule unique, la diffusion moléculaire ferait rapidement disparaître tout gradient. De surcroît, la nature biochimique des morphogènes et leur mécanisme d'action restaient mystérieux.

Les biologistes ont longtemps cherché comment ce gradient pouvait se former. Puis plusieurs équipes ont établi que de tout jeunes embryons de drosophile contenaient des gradients qui déterminaient la croissance. De nombreux mécanismes du développement sont mieux connus chez la drosophile que chez les animaux plus proches de l'homme. Les exemples présentés plus loin montrent qu'un heureux concours de qualités font de la drosophile un modèle quasi idéal pour les recherches en embryologie, en génétique et en biologie moléculaire.

Dès le début du XX^e siècle, la drosophile est devenue l'animal d'élection des généticiens : on la manipule facilement et elle

Avec l'autorisation de Christian Nüsslein-Volhard



1. LE DÉVELOPPEMENT ANIMAL était un mystère pour les naturalistes de l'Antiquité. Sur ce dessin du XVI^e siècle, c'est à coups de langue qu'un ours façonne ses petits, que l'on croyait informes à la naissance.