

Une supraconductivité magnétique ?

Cent ans après leur découverte, les mécanismes à l'origine de la supraconductivité restent en partie mystérieux. Les physiciens explorent de nouvelles pistes pour les expliquer et fabriquer des matériaux supraconducteurs plus performants.



PAR **Julien Bobroff**,
chercheur au laboratoire
de physique des solides,
université Paris-Sud et CNRS
à Orsay.

Laisser passer le courant électrique sans opposer la moindre résistance, sans perdre la moindre énergie, tel est le précieux atout des matériaux dits « supraconducteurs ». Mais cette propriété ne se manifeste qu'à des températures très basses : les supraconducteurs les plus chauds connus à ce jour ne le deviennent qu'au-dessous de -135°C . Voilà cent ans que le phénomène a été découvert, 13 prix Nobel ont récompensé des travaux liés à ce sujet, des milliers d'articles scientifiques ont été publiés et pourtant il n'a pas révélé tous ses secrets. Si aujourd'hui on comprend comment les métaux classiques acquièrent cette propriété quand ils sont refroidis jusqu'à parfois quelques degrés du zéro absolu, l'explication fon-

damentale concernant les supraconducteurs les plus chauds, dits de « haute température », échappe encore aux physiciens. Que se passe-t-il au sein de ces matériaux ?

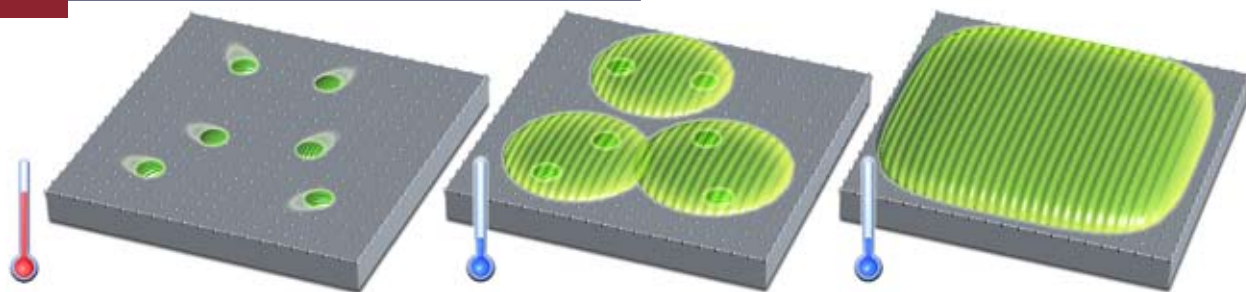
Résistance nulle. Depuis trois ans et la découverte d'un nouveau type de supraconducteurs, les pnictures, une hypothèse suscite un vif intérêt : alors que dans les métaux supraconducteurs classiques le magnétisme n'intervient pas, dans ces pnictures, il pourrait jouer un rôle clé. Cette piste magnétique est le dernier épisode d'une histoire qui a connu bien des rebondissements.

Revenons au tout premier épisode. Il se passe le 8 avril 1911 dans le laboratoire de Heike Kamerlingh Onnes, à l'université de Leyde aux Pays-Bas.

À l'époque, ce laboratoire est le seul à maîtriser la liquéfaction de l'hélium, le liquide le plus froid qui existe. Grâce à cela, ce jour-là, Kamerlingh Onnes et ses collègues mesurent pour la toute première fois la résistance électrique d'un métal, le mercure, à seulement quelques degrés du zéro absolu. Ils découvrent alors que cette résistance est nulle : c'est la première manifestation de la supraconductivité [1]. Et c'est celle qui conduira aux applications que l'on connaît aujourd'hui (lire « Des applications par étapes », p. 58).

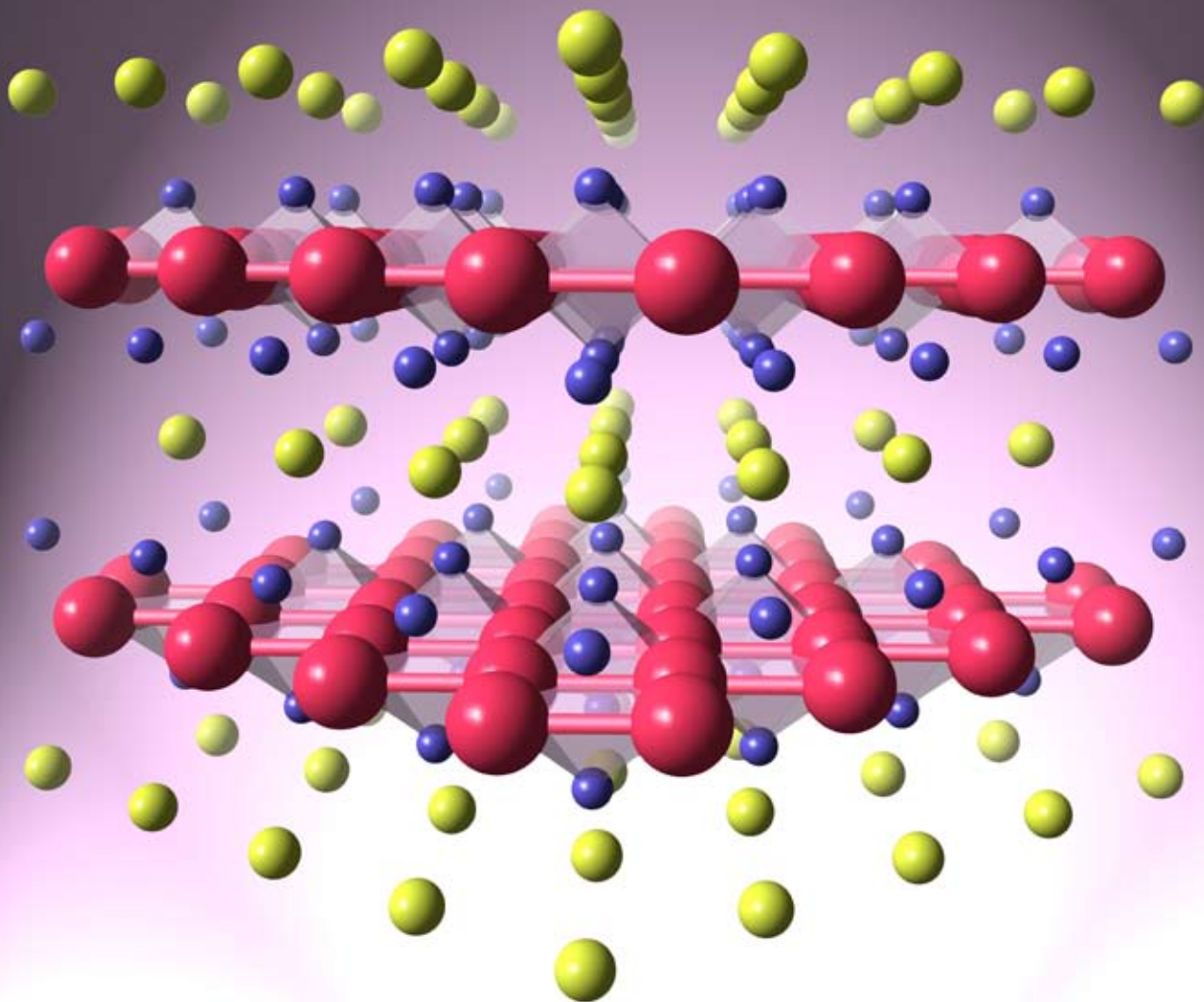
Dès 1933, le physicien allemand Walther Meissner observe une deuxième propriété tout aussi spectaculaire des supraconducteurs. Il constate que les champs magnétiques de faible intensité ne les pénètrent pas. Ainsi, quand on

Fig.1 Formation de la supraconductivité



À TEMPÉRATURE AMBIANTE, les électrons libres (en vert) sont freinés par les imperfections du réseau d'atomes qui forme le matériau. Ce dernier n'est pas supraconducteur. Dès que la température passe sous

une valeur dite critique, les électrons s'associent en paires (au centre), qui se rassemblent en une onde quantique, désormais insensible aux imperfections (à droite). Le matériau devient supraconducteur.



Ces couches d'atomes de fer (en rouge) et d'arsenic (en bleu), qui alternent avec des couches contenant des atomes de baryum (en jaune), forment la structure en feuillet des pnictures, les derniers-nés des supraconducteurs.

approche un aimant d'un supraconducteur, l'aimant est repoussé et lévite au-dessus du supraconducteur. Depuis, les physiciens ont montré que cette supraconductivité à deux facettes n'était pas l'apanage du mercure. Si on les refroidit suffisamment, plus de la moitié des éléments de base de la classification périodique deviennent supraconducteur, tout comme de nombreux autres matériaux plus complexes, à l'instar des alliages ou des oxydes.

Comment le froid modifie-t-il à ce point les propriétés de la matière ? Dans un métal ordinaire, les électrons d'un courant sont gouvernés par les lois de la physique quantique. Celles-ci les décrivent non pas comme des billes électriquement chargées, mais comme des ondes qui se déplacent au sein du réseau d'atomes [fig. 1]. Ces ondes sont freinées par les imperfections du matériau et perdent de l'énergie : c'est le phénomène de résistance électrique.

Une première explication de ce qui se passe dans les supraconducteurs a été donnée par le physicien allemand Fritz London dans les années 1930. Selon sa théorie, dans ces matériaux, les élec-

trons n'ont plus ce comportement individuel mais adoptent un comportement collectif : à très basse température, les ondes individuelles se superposent pour former une onde quantique collective, que l'on appelle aussi condensat [2]. Cette onde collective n'a plus le même comportement que les électrons qui la composent, un peu comme le mouvement d'un banc de poissons en mer. Quand elle se déplace, elle n'est plus sensible aux imperfections du réseau d'atomes ni à leurs vibrations. Il n'y a donc plus de résistance électrique.

Selon la théorie, cette onde collective est aussi très sensible à l'effet d'un champ magnétique extérieur. Quand on approche un aimant, les électrons qui la composent forment des boucles de courant électrique à la surface du supraconducteur, qui induisent à leur tour des champs magnétiques. Ces champs compensent exactement le champ extérieur et provoquent >>>

L'essentiel

> **LES SUPRACONDUCTEURS** conduisent le courant sans résistance à des températures proches du zéro absolu.

> **LA DÉCOUVERTE** des cuprates et des pnictures, supraconducteurs fonctionnant à plus haute température, remet en question la compréhension du phénomène.

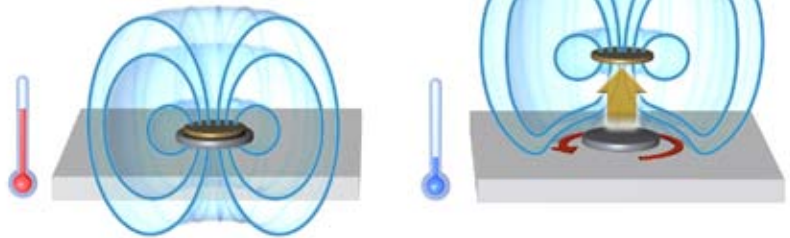
> **UNE NOUVELLE HYPOTHÈSE** suppose que cette supraconductivité naîtrait grâce au magnétisme.

Une supra-conductivité magnétique ?

>>> ainsi l'effet Meissner, c'est-à-dire la lévitation [fig. 2].

Pendant, ce scénario rencontre un obstacle : dans le monde quantique, seuls les bosons, une classe de particules élémentaires dont font partie par exemple les photons, peuvent occuper simultanément un même état quantique et former ainsi une onde collective. Or les électrons ne sont pas des bosons, mais des fermions, l'autre classe de particules élémentaires. Comment peuvent-ils donc former un condensat ? Pendant plus de quarante ans, les plus grands physiciens, de Albert Einstein à Lev Landau, ont buté sur cette question. Jusqu'à ce que trois Américains, John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer, proposent une solution en 1957 [3]. Leur théorie dite BCS (leurs initiales) montre comment deux électrons peuvent s'apparier : quand un électron, chargé négativement, se déplace au sein du réseau d'atomes chargés positivement, il les attire sur son passage. Les atomes déplacés attirent à leur tour un deuxième électron, qui forme avec le premier une paire dite de Cooper. Cette

Fig.2 L'effet Meissner



À GAUCHE, LE CHAMP MAGNÉTIQUE de l'aimant marron (lignes bleues) pénètre la rondelle de matériau gris. Quand celui-ci devient supraconducteur (à droite), des boucles de courant électrique se forment à sa surface (flèche rouge). Elles induisent des champs magnétiques qui compensent le champ extérieur, alors dévié. Résultat, l'aimant s'élève.

paire est justement un boson capable de créer une onde collective. L'explication semble donc trouvée. Néanmoins, selon la théorie BCS, au-dessus de -250°C , les atomes vibrent trop pour permettre aux électrons de s'apparier. La supraconductivité paraît alors condamnée au domaine de l'hélium liquide, à quelques dizaines de degrés au plus du zéro absolu, et beaucoup pensent alors son histoire achevée.

Feuillets d'atomes. Mais en 1986, deux physiciens d'IBM à Zurich, Johannes Georg Bednorz et Alexander Karl Müller, relancent le domaine. Ils viennent d'identifier une nouvelle famille de supraconducteurs à des températures bien plus élevées que les limites théoriques [4].

Certains d'entre eux le sont jusqu'à -135°C , soit près de 100°C de plus que les records précédents. Ce sont des oxydes à base de cuivre, des cuprates. Leur structure correspond à une superposition de feuillets d'atomes. Chaque feuillet est formé par un maillage carré d'atomes de cuivre et d'oxygène. Pour comprendre comment les électrons réussissent à s'apparier au sein de ces matériaux, les physiciens se sont intéressés à leur comportement au sein de cette structure. Contrairement aux métaux habituels, comme l'or ou le cuivre, dans lesquels les électrons ont une plus grande liberté de mouvement, à l'intérieur des cuprates, les électrons se déplacent le long des arêtes des carrés. Mais comme deux charges négatives se repoussent, ils

Des applications par étapes

AUJOURD'HUI

- Des bobines de fils supraconducteurs permettent de créer des champs magnétiques très élevés, car elles ne résistent pas au courant et donc ne s'échauffent pas à son passage. Elles sont utilisées notamment dans les IRM dans les hôpitaux. Des câbles électriques supraconducteurs sont également testés pour transporter plus de courant que les câbles métalliques.

- Des cavités supraconductrices peuvent faire circuler du courant alternatif très intense, destiné à produire des champs électromagnétiques. Ces derniers guident et accélèrent les particules dans des accélérateurs, comme le LHC au CERN.
- Des détecteurs supraconducteurs sont très sensibles aux champs magnétiques. On les utilise en physique, en géologie, et même en médecine

pour l'étude de l'activité cérébrale.

- Des filtres supraconducteurs en électronique sont plus efficaces grâce à leur résistance nulle. Ces filtres équipent déjà de nombreux relais de téléphonie mobile.

EN DÉVELOPPEMENT

Les physiciens cherchent actuellement à développer à grande échelle les supraconducteurs pour stocker de l'énergie, ou

pour s'en servir comme fusibles géants.

À VENIR

En imaginant des supraconducteurs fonctionnant à température ambiante, une déferlante d'objets du quotidien pourraient en tirer profit. On pourrait par exemple imaginer des bijoux qui lévitent ou un sac à dos qui ne frotte plus.

www.supradesign.fr

doivent s'éviter. Le parcours de chaque électron dépend donc de celui des autres, on dit qu'ils sont « fortement corrélés ». Quelle est alors la colle qui permet à ces électrons corrélés de former des paires de Cooper ? Vingt-cinq ans après la découverte des cuprates, il n'existe toujours pas de théorie convaincante pour l'expliquer. Pour autant, les recherches sur les cuprates n'ont pas conduit les physiciens dans une impasse, au contraire. Cet échec apparent et la difficulté de traiter ces électrons corrélés ont forcé les physiciens à imaginer et à développer de nouvelles méthodes théoriques et expérimentales, qui ont profondément renouvelé la physique de la matière condensée.

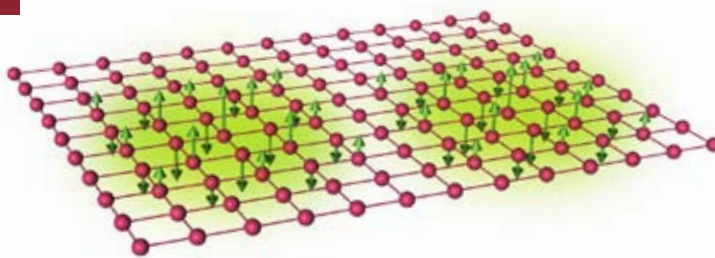
L'étude de ces matériaux à fortes corrélations a ouvert un nouveau domaine très fécond, car elles sont à la base de nombreux phénomènes électriques, thermiques et magnétiques assez étranges découverts depuis.

Colle magnétique. C'est dans ce contexte d'avancées, mais aussi de frustrations, qu'il faut replacer le dernier rebondissement en date. En 2008, alors qu'on croyait la supraconductivité à « haute température » limitée aux feuillets de cuivre et d'oxygène des cuprates, un groupe japonais du Tokyo Institute of Technology découvre un nouveau type de matériau supraconducteur, les « pnictures », formés de plans d'atomes de fer et d'arsenic [5]. Avec une température critique* de -210°C , ils sont certes moins performants que les cuprates, mais leur intérêt réside surtout dans le fait qu'ils offrent un nouvel éclairage sur l'origine de la supraconductivité à haute température. Depuis trois ans, ils sont donc intensément étudiés.

Les pnictures ressemblent beaucoup aux cuprates. Ils ont une même structure en couches. Et dans leur cas les physiciens croient avoir identifié ce qui les rend supraconducteurs. La colle élémentaire qui relierait les électrons par paires serait ici de nature magnétique.

***LA TEMPÉRATURE CRITIQUE** est la température au-dessous de laquelle le matériau devient supraconducteur.

Fig.3 Hypothèse magnétique



AU SEIN D'UN PNICTURE, sur ce feuillet d'atomes de fer, les aimants quantiques des électrons, ou spins, sont orientés dans un sens ou dans l'autre (flèches vertes). Lorsqu'une zone est riche en électrons voisins de spins opposés, elle est dite antiferromagnétique (nuage vert). Ces zones seraient à l'origine de la supraconductivité dans les pnictures.

Tout électron possède une propriété quantique que l'on appelle le spin, une sorte de petit aimant. Si tous ces spins s'alignent dans le même sens, le matériau devient comme un gros aimant. En laboratoire, on peut ajouter des électrons au sein des matériaux supraconducteurs. Ce faisant, on constate que les pnictures comme les cuprates finissent par perdre cette propriété pour devenir antiferromagnétiques, une forme d'organisation de la matière dans laquelle les spins des électrons s'organisent tête-bêche, l'un à l'endroit, l'autre à l'envers. Ces spins organisés détruisent en effet la supraconductivité, car ils agissent comme de petits aimants qu'on aurait insérés au sein même du supraconducteur. Or, comme le montre l'effet Meissner, aimants et supraconducteurs s'excluent.

Mais paradoxalement, même quand ils sont supraconducteurs, ces pnictures et ces cuprates gardent une trace d'antiferromagnétisme. Ils possèdent de petits îlots antiferromagnétiques, qui se font et se défont à différents endroits au fil du temps, un phénomène nommé « fluctuation de spin ». Cette fois, le supraconducteur s'accommode de cette situation. Cette forme de magnétisme plus fluctuante et moins organisée pourrait même expliquer d'où vient la supraconductivité. En effet, lorsque deux électrons ont des spins opposés, ils peuvent alors former une paire de Cooper [fig. 3]. En outre, de récents travaux ont montré à la fois dans les cuprates et les pnictures l'ap-

parition d'un même signal magnétique appelé « résonance », justement quand le composé devient supraconducteur. Certains chercheurs y voient la signature d'une colle magnétique à l'origine des paires de Cooper pour ces deux familles de supraconducteurs. Ces fluctuations de spin seraient-elles à l'origine de la supraconductivité à haute température ? De nombreuses questions restent ouvertes et rien n'est tranché : ce magnétisme fluctuant est délicat à mesurer, et d'autres modèles tout aussi convaincants existent, en particulier pour les cuprates.

Mais si les recherches futures confirment que la colle est bien magnétique, alors plus rien n'interdit d'imaginer un supraconducteur à température ambiante, ce magnétisme fluctuant pouvant survivre à nos températures. Restera à le découvrir. ■

[1] H. Kamerlingh Onnes, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.*, 122b, 1911.

[2] F. London, *Superfluids*, ed. Wiley & Sons, 1950.

[3] J. Bardeen, L. Cooper, et R. Schrieffer, *Phys. Rev.*, 108, 1175, 1957.

[4] J. G. Bednorz et K. A. Müller, *Z. Physik B*, 64, 189, 1986.

[5] H. Hosono et al., *Nature*, 453, 376, 2008.

Pour en savoir plus

> J. Matricon et G. Waysand, *La Guerre du froid*, Seuil, 1999.

> D. Van Delft, « The Discovery of Superconductivity », *Physics Today*, 12/2010, p. 38.

> S. Blundell, *La Supraconductivité, cent ans après*, à paraître chez Belin, 2011.

> www.supraconductivite.fr

Un site de référence sur la supraconductivité.