

représenter ces états comme des ondes sinusoïdales, dont la longueur d'onde est reliée à l'énergie des électrons. Les électrons occupent les états de plus basse énergie possible compte tenu du principe d'exclusion. Ensemble, ils remplissent en général tous les états jusqu'à une énergie inférieure à un certain seuil, l'«énergie de Fermi» (voir l'encadré pages 38 et 39).

L'application au métal d'une tension électrique confère à certains électrons suffisamment d'énergie pour passer d'un état occupé à un état vacant dont l'énergie est supérieure au niveau de Fermi. Ces électrons peuvent alors circuler librement. Dans un isolant, la densité des électrons est telle que tous les états accessibles sont déjà occupés, l'accès aux états libres nécessitant trop d'énergie; même en appliquant une tension, un électron n'a nulle part où aller, et aucun courant ne circule.

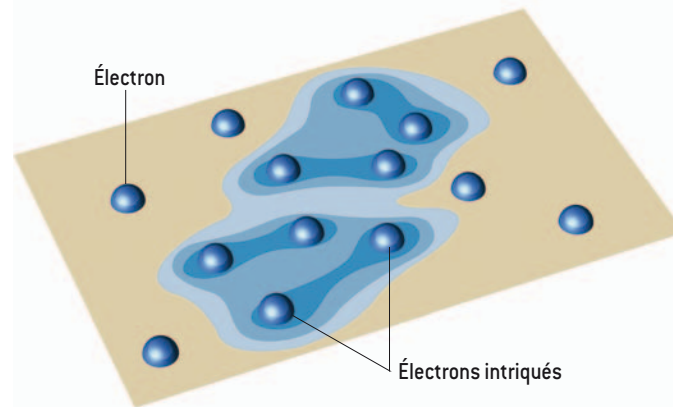
Supraconducteurs : des paires d'électrons

Dans les supraconducteurs, les choses se compliquent. Les électrons ne peuvent pas être décrits de façon individuelle. Ils se lient par paires, comme le décrit la théorie de la supraconductivité développée en 1957 par les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et John Robert Schrieffer (BCS). Au premier abord, ce système de couples peut sembler étrange : deux électrons devraient se repousser, car ils ont la même charge électrique. En fait, les vibrations du réseau cristallin créent indirectement une force attractive entre les électrons, qui l'emporte sur leur répulsion naturelle. Chaque paire se comporte non pas comme un fermion, mais comme un boson, type de particule quantique qui n'obéit pas au principe d'exclusion de Pauli. Les paires d'électrons peuvent toutes se condenser dans le même état avec l'énergie la plus faible possible, un phénomène nommé condensation de Bose-Einstein. Dans l'analogie du verre d'eau, cela reviendrait à verser de l'eau qui, au lieu de remplir le verre, va former au fond une mince couche capable d'absorber toute l'eau sans s'épaissir.

Si l'on applique une tension à un tel matériau, les électrons passent dans un état d'énergie supérieure, ce qui produit un courant : rien ne gêne la circulation des électrons appariés. Ainsi, un supra-

UN ÉCHEVEAU D'INTRICATION

Pour des raisons que les physiciens n'ont pas encore élucidées, les phases quantiques de la matière présentent, de façon implicite, une dimension spatiale qui se révèle au moment des transitions de phase ou dans certains états de la matière. Cette dimension se manifeste dans la description mathématique de cette relation particulière entre particules qu'est l'intrication.



Intrication des électrons

L'intrication signifie que plusieurs particules quantiques agissent de concert comme un tout indissociable. Les physiciens étudient plus souvent l'intrication de deux particules, voire de quelques-unes, mais dans les matériaux qui subissent une transition d'une phase quantique à une autre, un très grand nombre d'électrons sont intriqués.

conducteur transmet un courant avec une résistance nulle.

Ces succès de la physique quantique pour expliquer le comportement des métaux, des isolants, des supraconducteurs et d'autres matériaux tels que les semi-conducteurs (à l'origine de l'électronique moderne) ont conduit de nombreux physiciens du début des années 1980 à conclure qu'ils s'approchaient d'une compréhension

NOUS CRAIGNIONS QU'UNE THÉORIE des phases quantiques de la matière nous échappe à jamais... jusqu'à ce que nous prenions conscience des possibilités offertes par la théorie des cordes.

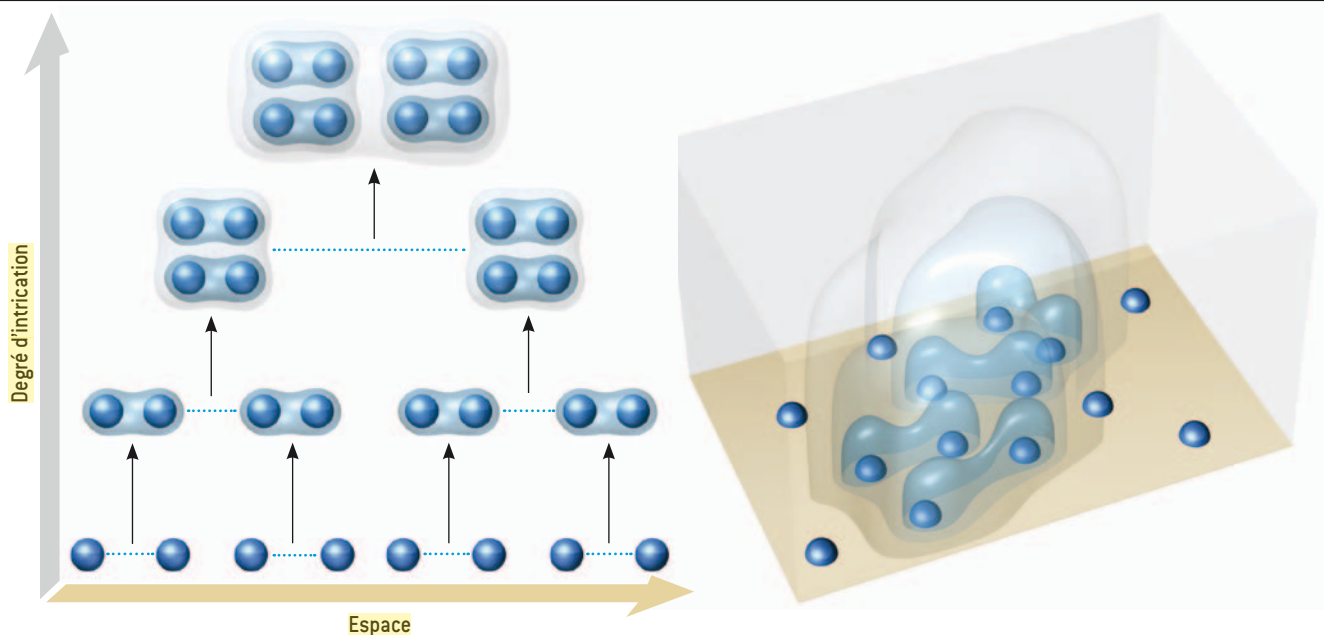
complète des électrons dans les solides, et que toutes les découvertes majeures étaient derrière eux. Cette assurance a volé en éclats avec la découverte des supraconducteurs à haute température.

La théorie BCS n'explique pas comment ces matériaux deviennent supraconducteurs. Plus étonnant, il est possible d'observer une transition de phase à zéro kelvin, entre l'état supraconducteur et un état nommé «onde

de densité de spin» (voir l'encadré page 43). En se plaçant au point de transition de phase – en dopant le matériau ou en exerçant sur lui une pression pour changer la distance entre les atomes –, le point critique quantique, on peut obtenir un nouvel état si l'on augmente la température : le métal étrange.

Le principe physique permettant de décrire le point critique quantique, les supraconducteurs et les métaux étranges associés est précisément la caractéristique de la mécanique quantique qui dérangeait tant Einstein, Podolsky et Rosen : l'intrication. Pour comprendre ce phénomène, considérons une paire d'électrons intriqués, dont les spins sont anticorrélés. Si un électron a un spin *haut*, l'autre a forcément un spin *bas*. Il n'est cependant pas possible de dire *a priori* quel électron est doté de quel spin.

À première vue, cela pourrait sembler banal. L'anticorrélation se rencontre souvent : si vous avez une paire de chaussures et que vous en mettez une près de la porte d'entrée et l'autre près de la porte de derrière, alors, quand vous trouvez une chaussure gauche



Hiérarchie de l'intrication

Le processus d'intrication se comporte mathématiquement comme une distance spatiale. De la même façon qu'un déplacement dans l'espace suppose de passer par des points intermédiaires, l'intrication de myriades de particules commence par l'intrication de deux particules, qui se combinent à deux autres, et les quatre obtenues avec quatre autres, et ainsi de suite.

Dimension spatiale supplémentaire

Ainsi, le degré d'intrication joue le rôle d'une dimension spatiale implicite, en plus des trois dimensions spatiales où évoluent les électrons. En utilisant cette ressemblance mathématique, les théoriciens qui étudient les phases quantiques de la matière peuvent exploiter les méthodes et les outils de la théorie des cordes, où interviennent des dimensions spatiales supplémentaires.

George Retsack

à un endroit, il n'y a pas de doute : l'autre est une chaussure droite. Mais la situation quantique présente une différence essentielle. Une chaussure est soit droite, soit gauche, même si vous n'avez pas vérifié de quel côté il s'agit ; en revanche, le spin de chaque électron n'est pas dans un état déterminé avant la mesure : il est en quelque sorte à la fois dans l'état *haut* et dans l'état *bas*. L'état n'est fixé que lors de la mesure.

L'intrication, phénomène non local

Le mystère est de savoir comment les électrons restent anticorrélés. Quand un électron « choisit » son spin, l'autre aussi. Comment font-ils pour choisir des sens opposés ? Il semble que l'information sur l'état quantique d'un électron soit instantanément connue de l'autre, quel que soit son éloignement. Dans un cadre classique, l'information ne peut transiter entre deux électrons à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. Dans le cas de l'intrication quantique, le phénomène est dit non local et ne dépend pas de la distance entre les particules. En

réalité, aucun des deux électrons n'a d'état quantique propre ; seule la paire en a un.

Intuitive ou non, la non-localité a été vérifiée expérimentalement à de nombreuses reprises. Einstein et ses coauteurs avaient clairement mis le doigt sur l'aspect le plus inattendu et le plus contraire à l'intuition de la mécanique quantique. Et depuis une dizaine d'années, les physiciens commencent à comprendre qu'elle est en jeu dans les propriétés bizarres des métaux étranges.

Près du point critique quantique, les électrons ne se comportent plus indépendamment ou même par paires, mais deviennent intriqués en masse. Le raisonnement que nous avons appliqué à deux électrons s'étend maintenant à 10^{23} particules. Deux électrons voisins sont intriqués l'un avec l'autre ; cette paire, à son tour, est intriquée avec les paires voisines, et ainsi de suite, créant un énorme réseau d'interconnexions (voir l'encadré ci-dessus).

Ce phénomène se produit dans divers matériaux. Comment l'étudier ? Le réseau d'interconnexions est si complexe qu'une description directe est hors de portée. Mes collègues et moi craignons qu'une théorie

des phases quantiques de la matière nous échappe à jamais... jusqu'à ce que nous prenions conscience des possibilités offertes par la théorie des cordes.

A priori, la théorie des cordes n'a rien à voir avec les états intriqués d'essaims électroniques. Elle concerne des cordes microscopiques qui vibrent comme des cordes de guitare miniatures, les différents modes de vibration correspondant aux différentes particules élémentaires. Ces cordes sont si petites que leur manifestation ne devient évidente qu'à des énergies extrêmement élevées, rencontrées dans les instants suivant le Big Bang ou à proximité des trous noirs.

Au milieu des années 1990, Joseph Polchinski, de l'Institut Kavli de physique théorique de Californie, à Santa Barbara, a remarqué que la théorie des cordes prévoyait plus que des cordes. Elle implique l'existence de « branes » : des surfaces sur lesquelles les cordes se fixent. Ces branes représentent un domaine nouveau et très vaste de la physique, au-delà des particules de haute énergie pour lesquelles la théorie a été initialement conçue. Les cordes et les