

L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1^{er} numéro de *Pour la Science* est offert !



Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



Flashez ce QR code
avec votre mobile
ou votre tablette
pour télécharger
immédiatement
l'application.

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie
le mensuel *Pour la Science* à 5,49 € et son hors-série trimestriel
Dossier Pour la Science à 5,99 € en version numérique
optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif,
contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.



Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver
le magazine *Cerveau & Psycho* et son hors-série *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

Métaux étranges et théorie des cordes

Subir Sachdev

Certains états de la matière récemment identifiés ont pour origine des phénomènes quantiques que les théoriciens ont du mal à étudier avec les outils usuels. Un domaine inattendu vient à leur rescousse : la théorie des cordes.



CET AIMANT est mis en lévitation par un supraconducteur, dans lequel sa myriade d'électrons forme un vaste état quantique cohérent. Pour certains matériaux et certaines situations, il existe un lien mathématique entre l'état quantique des électrons et la description des trous noirs par la théorie des cordes.

L'ESSENTIEL

- Certains états particuliers de la matière, découverts récemment, sont dus au comportement quantique des électrons du matériau.
- Ces états de la matière émergent d'un tissu d'intrications entre les électrons, intrications dont la description théorique est difficile.
- Des outils de la théorie des cordes, mettant en œuvre des dimensions spatiales supplémentaires et une notion de dualité, permettent de traiter ces questions.

Il y a quelques années, je me suis rendu à une conférence sur la théorie des cordes.

Je n'aurais jamais pensé me trouver dans un tel endroit. Je travaille aussi en physique, mais dans un tout autre domaine, celui de la matière condensée. Les théoriciens des cordes cherchent à décrire l'Univers à des énergies bien supérieures à tout ce qui se rencontre en laboratoire. En revanche, mes collègues et moi étudions des matériaux que nous refroidissons à des températures proches du zéro absolu. Les spécialistes des cordes explorent la physique qui gouverne les trous noirs et les dimensions supplémentaires que l'espace-temps comporterait. Nous nous intéressons aux semi-conducteurs, aux supraconducteurs et à toutes les formes et phases exotiques que présentent parfois les matériaux.

Au collège et au lycée, les élèves font connaissance de trois phases de la matière : solide, liquide et gaz. La distinction entre ces états est assez intuitive, mais ce n'est qu'au début du XX^e siècle qu'a émergé une compréhension complète de ces phases. Les atomes sont disposés de façon régulière et rigide dans les solides cristallins, alors qu'ils sont mobiles dans les liquides et les gaz. Ces trois phases ne sont que le début d'une longue liste d'états possibles. Un cristal solide, par exemple, n'est pas juste un réseau bien agencé d'atomes, il abrite aussi un essaim d'électrons dont le comportement influe sur les propriétés du solide et définit de nouvelles phases de la matière.

Une multitude d'électrons intriqués

Je me suis intéressé à un état de la matière très particulier que les spécialistes n'avaient pas même anticipé. Pour comprendre le phénomène qui s'y déroule, il faut mentionner un article écrit en 1935 par Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Ces physiciens attiraient l'attention sur le fait que la théorie quantique implique une connexion « fantomatique » entre des particules, un phénomène nommé intrication. Sans que l'on sache comment, les propriétés des particules intriquées se coordonnent instantanément, quelle que soit la distance qui les sépare. Einstein et ses coauteurs s'intéressaient au cas d'une paire d'électrons. Les métaux et les supraconducteurs mettent en jeu un très grand nombre d'électrons, de l'ordre de 10^{23} pour un échantillon typique. Et, dans certaines

conditions, le phénomène d'intrication semble s'établir au sein de cette multitude d'électrons. L'étude de ces matériaux devient alors si complexe que les outils mathématiques que nous utilisons sont insuffisants. Comprendre ces matériaux est pourtant un enjeu important : ils ont des propriétés, de conductivité en particulier, intéressantes pour des applications.

Comment étudier les propriétés de ces matériaux ? C'est cette question qui m'a conduit à franchir le fossé culturel qui sépare le domaine de la matière condensée de la théorie des cordes. Les physiciens des cordes ont une réputation impressionnante : ils ont développé des outils mathématiques d'une grande puissance et d'une complexité extrême. Cette expertise pouvait-elle m'aider à expliquer les phénomènes observés dans les matériaux ? Je l'espérais et je suis donc allé à une conférence sur ce sujet.

Mes collègues et moi nous sommes rendu compte que la théorie des cordes permettait d'aborder ces problèmes sous un angle totalement inattendu. En cherchant à unifier la théorie des particules élémentaires et la théorie de la gravitation d'Einstein, les théoriciens des cordes ont envisagé l'existence de davantage de dimensions d'espace que les trois que nous percevons au quotidien. Ces dimensions supplémentaires seraient enroulées sur elles-mêmes, imperceptibles à nos sens.

Ces chercheurs ont aussi découvert le principe de « dualité ». Cette notion permet de relier des théories des cordes qui semblent différentes. Un phénomène peut s'interpréter dans une théorie ou dans une autre, et un catalogue d'outils permet de traduire les aspects d'une théorie pour les interpréter dans l'autre. Par exemple, en 1997, Juan Maldacena, alors à l'Université Harvard, a mis en évidence une dualité entre des théories fonctionnant là où les effets quantiques sont faibles mais la gravité forte, et des théories utilisées quand les effets quantiques sont importants, mais la gravité faible.

En effet, les dualités et les dimensions supplémentaires nous ont permis de mieux comprendre la matière et l'intrication entre 10^{23} électrons. Mais avant de voir comment ces concepts nous ont aidés, commençons par décrire certaines phases que nous avons comprises grâce à la mécanique quantique.

Dans ces états de la matière, les éléments essentiels sont les électrons. Ceux-ci sont fournis par les atomes qui, par exemple, forment un réseau cristallin dans un solide.

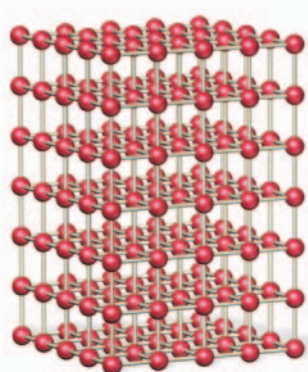
La physique quantique confère aux atomes et aux électrons de la matière de nouvelles voies pour s'organiser. Les phases classiques (solide, liquide, gaz) correspondent à des arrangements différents des atomes et des molécules en fonction de la température. Les phases quantiques font intervenir des arrangements où les propriétés quantiques des particules, par exemple leur spin, jouent un rôle prédominant.

Phases classiques Les solides ont une taille et une forme fixes. Dans les solides cristallins, les molécules sont disposées selon un réseau régulier et rigide. Dans les solides amorphes, les positions des molécules sont désordonnées, comme dans un liquide, mais restent inchangées, sur de longues périodes. Les liquides ont un volume fixe, mais de forme variable. Les molé-

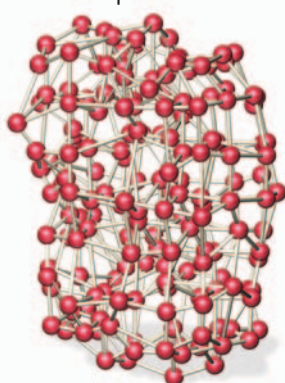
cules sont mobiles, mais liées. Les gaz ont un volume et une forme variables. Leurs molécules sont mobiles et ne sont pas, ou peu, liées. Au-delà d'une certaine pression et d'une certaine température qui définissent le « point critique », il devient impossible de distinguer le gaz du liquide (voir le diagramme de phase page ci-contre).

SOLIDE

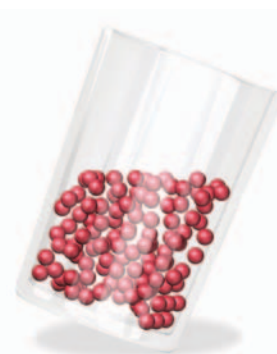
Cristallin



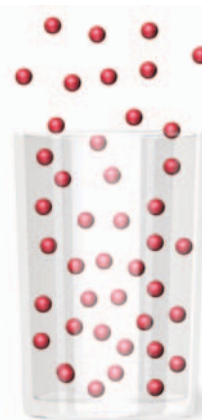
Amorphe



LIQUIDE



GAZ



Phases quantiques Les métaux conduisent bien l'électricité, car leurs atomes offrent aux électrons suffisamment de sites d'états quantiques à occuper. Les électrons se déplacent comme s'ils constituaient un gaz.

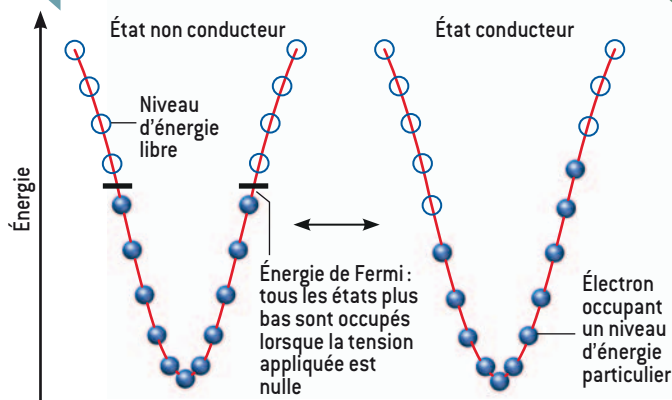
Les isolants ne conduisent pratiquement pas le courant. Les matériaux n'offrent pas aux électrons d'états libres ayant une énergie accessible. Les électrons restent piégés là où ils sont. Ils occupent tous les niveaux d'énergie disponibles.

Les supraconducteurs sont baignés d'un gaz de paires d'électrons. Les électrons s'apparient sous l'effet d'ondes de vibration (phonons) se propageant à travers le réseau d'atomes. Ces paires échappent aux restrictions quantiques qui s'appliquent aux élec-

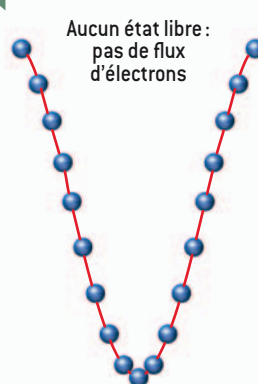
trons : elles peuvent se mettre dans un état quantique de la même énergie, ce qui leur permet de circuler sans résistance électrique.

Une onde de densité de spin (non représentée) est un matériau (parfois un isolant, parfois un supraconducteur) où les spins des électrons sont pour moitié dans l'état *haut* et pour moitié dans l'état *bas*. Dans certaines conditions, il se forme un métal étrange (voir le diagramme de phase page ci-contre), où chaque électron a autant de chances d'être dans un état de spin *haut* que *bas*, sans qu'il y ait de motifs plus vastes. Dans un métal étrange, tous les électrons sont intriqués et ne se comportent ni comme des particules individuelles ni même comme des paires, mais comme d'immenses ensembles de particules.

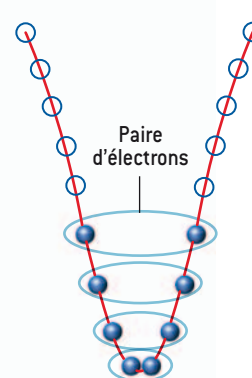
CONDUCTEUR (MÉTAL)

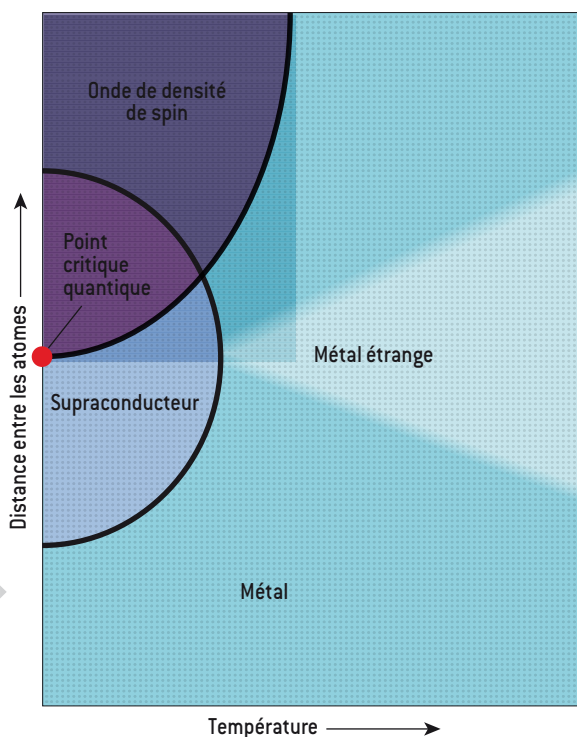
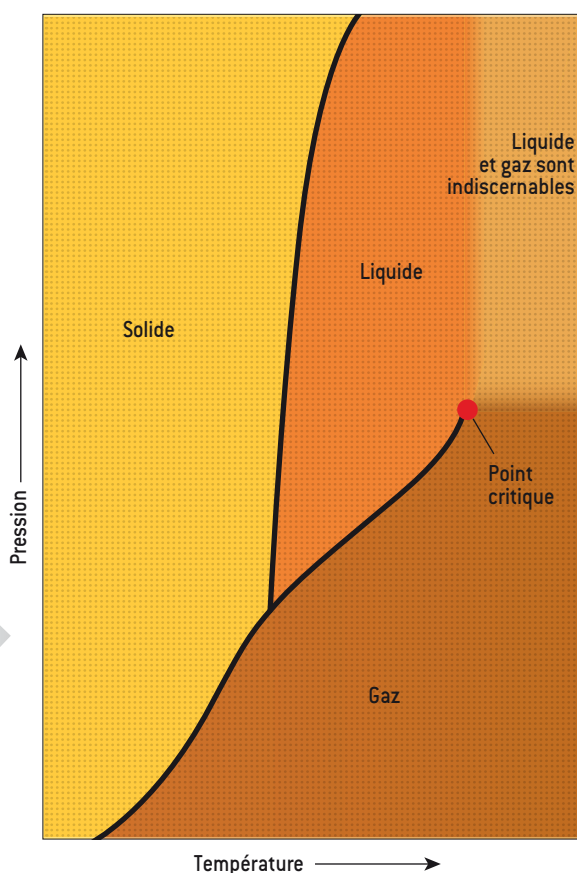


ISOLANT



SUPRACONDUCTEUR





Une partie des électrons errent dans tout le cristal et, quand nous relions le solide à une pile, un courant électrique s'établit. Dans à peu près tous les matériaux, le courant électrique suit la loi d'Ohm : son intensité est égale à la tension divisée par la résistance. Les isolants électriques tels que le téflon ont une résistance élevée ; les métaux conducteurs tels que le cuivre, une résistance faible. La résistance est associée à l'effet Joule, un phénomène de perte d'énergie par dissipation de chaleur. Les supraconducteurs ont une résistance quasi nulle, ce qui leur procure un grand intérêt et d'importantes applications industrielles. Ils ont été découverts en 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes qui étudiait le mercure refroidi au-dessous de -269°C . Aujourd'hui, nous connaissons des matériaux qui sont supraconducteurs aux températures (relativement) élevées de -138°C .

Les conducteurs, les isolants et les supraconducteurs correspondent à diverses phases de la matière. Dans chaque cas, l'essaim électronique revêt une forme différente. Ces deux dernières décennies, les physiciens ont découvert encore d'autres phases électroniques dans les solides. Un exemple, pourtant très intéressant, n'a même pas de nom : par défaut, les physiciens le nomment « le métal étrange ». Il est caractérisé par une résistance électrique qui varie de façon inhabituelle avec la température par rapport aux métaux ordinaires.

Des ondes dans la matière

Les différences entre ces phases résultent du comportement collectif des électrons et de leurs propriétés. Si le mouvement des atomes dans les solides, les liquides et les gaz peut être décrit par la mécanique classique, le comportement des électrons est purement quantique. Les principes clefs qui régissent l'état des électrons d'un solide sont des versions à plus grande échelle de ceux que suivent les électrons au sein d'un atome. Un électron lié à un noyau est décrit comme une onde. Il est caractérisé par plusieurs propriétés, telles que son énergie et son spin – un moment cinétique quantique. Le spin confère un moment magnétique à l'électron, qui se comporte comme un petit aimant ; il existe dans deux états de base possibles notés « haut » et « bas ».

La principale règle gouvernant les électrons des atomes – et toutes les particules de matière nommées fermions – est le principe d'exclusion de Pauli : deux électrons ne peuvent pas occuper le même état quantique. Dans un atome, les électrons occupent d'abord les états disponibles de plus basse énergie, puis remplissent les niveaux supérieurs, comme un verre se remplit d'eau de bas en haut.

Dans un morceau de métal contenant 10^{23} électrons, le raisonnement est le même. Les électrons les moins liés à leur atome d'origine occupent des états qui s'étendent dans le cristal entier. On peut se

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.

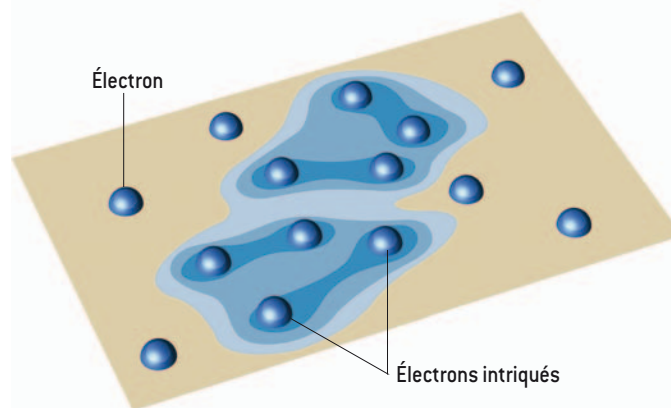
Supraconducteurs : des paires d'électrons

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

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 anti-

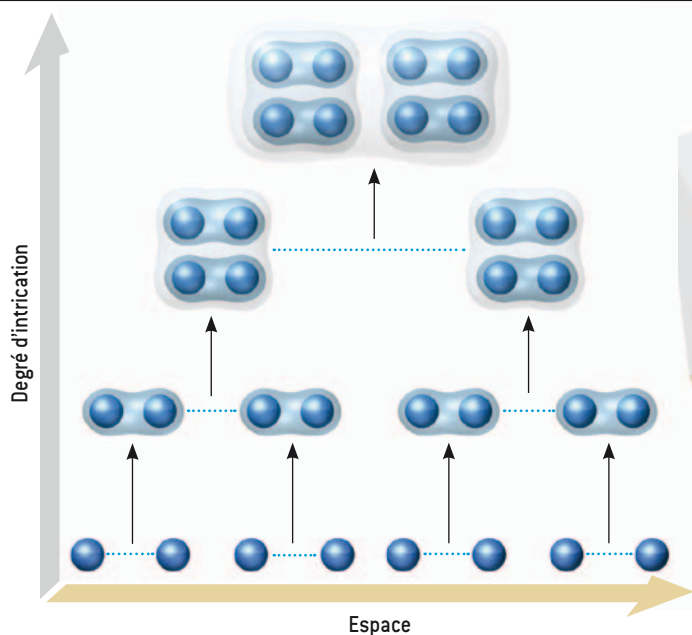
corrélés. Si un électron a un spin *haut*, l'autre a forcément un spin *bas*. Il n'est cependant pas possible de dire *a priori* quel électron est doté de quel spin.

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

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.

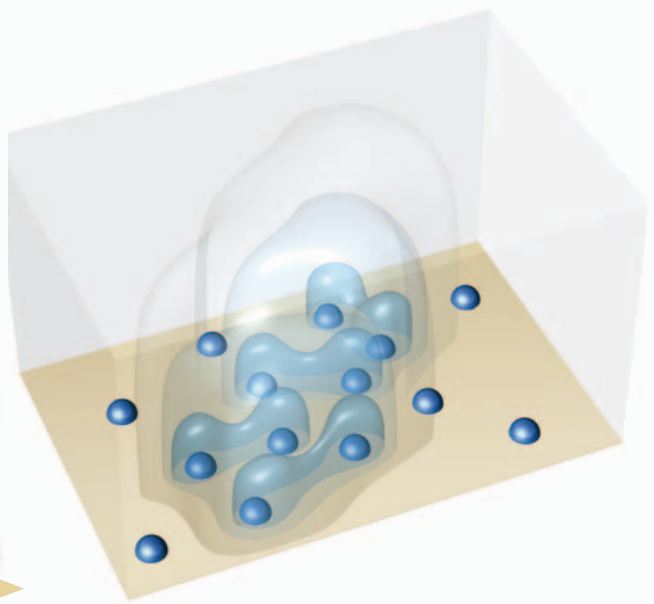
complète des électrons dans les solides, et que toutes les découvertes majeures étaient derrière eux. Cette assurance a volé en éclats avec la découverte des supraconducteurs à haute température.

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



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 Retsek

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

branes ont aussi suggéré que l'Univers pouvait contenir plus de dimensions que les trois d'espace et celle de temps que nous expérimentons au quotidien.

Ainsi, ce qui ressemble pour nous à une particule (un simple point) pourrait en fait être l'extrémité d'une corde attachée à une brane et traversant des dimensions spatiales supplémentaires. Nous pouvons nous représenter l'Univers soit comme constitué de particules ponctuelles se déplaçant dans un espace-temps quadri-dimensionnel et en interactions complexes, soit comme constitué de cordes évoluant dans un espace-temps à cinq dimensions et dont les extrémités sont fixées sur des branes. Ces deux perspectives sont des descriptions équivalentes, ou duales, de la même situation. Elles sont même complémentaires. Suivant le problème considéré, les particules ponctuelles exigent un traitement complexe, tandis que les cordes peuvent offrir une solution simple. À l'inverse, quand les particules permettent de faire des calculs, le point de vue des cordes est peu gérable.

Pour mes travaux sur les métaux étranges, je n'ai pas besoin d'intégrer l'ensemble du cadre de la théorie des cordes, ni même de savoir si la théorie décrit correctement la physique des particules aux plus petites échelles. En revanche, le concept de dualité me permet de remplacer un pro-

blème mathématiquement insoluble par un autre beaucoup plus simple.

Jusqu'à il y a quelques années, je participais presque uniquement à des rencontres de physiciens de la matière condensée. Aujourd'hui, il m'arrive de boire mon café entouré de théoriciens des cordes, en essayant de comprendre leur description abstraite et originale des cordes et des branes. J'applique ensuite ces idées à des questions terre à terre soulevées par les nouveaux matériaux. Et je crois que ces échanges se font dans les deux sens : notre intuition et notre expérience concrète des phases quantiques des électrons aident les théoriciens des cordes à décrire les trous noirs et autres objets exotiques.

Quand les électrons des cristaux ont un degré limité d'intrication, on peut encore se les représenter comme des particules (soit des électrons simples, soit des paires). Mais quand beaucoup d'électrons deviennent fortement intriqués, on ne peut plus conserver l'image de particules, et la théorie classique peine à prévoir ce qui se passe. Dans notre nouvelle approche, nous décrivons ces systèmes en termes de cordes qui se propagent dans une dimension supplémentaire d'espace.

Mon collègue Brian Swingle, de l'Université Harvard, a établi une analogie entre la dimension spatiale supplémentaire et le réseau d'intrication quantique

(voir l'encadré pages 40 et 41). Les électrons forment des paires intriquées, puis ces paires s'intriquent deux par deux, et ainsi de suite. Le degré d'intrication peut être mathématiquement considéré comme une distance selon une dimension spatiale supplémentaire. Deux particules peuvent être éloignées dans l'espace ordinaire, mais leur proximité dans la dimension supplémentaire reflète leur intrication.

Une dimension d'espace supplémentaire

L'avantage pratique du principe de dualité est que les théoriciens des cordes ont mis au point tout un arsenal de solutions mathématiques pour des problèmes allant de la dynamique des particules dans la fournaise du Big Bang aux oscillations des champs quantiques au bord des trous noirs. Les spécialistes des phases quantiques de la matière peuvent y chercher une solution possible à un problème particulier et la transposer (grâce à la mathématique de la dualité) de la situation des cordes à celle de l'intrication.

En général, nous nous intéressons à l'état de plus basse énergie au zéro absolu, mais nous pouvons facilement décrire la matière à des températures non nulles à l'aide d'une technique qui pourrait sembler draconienne : notre problème d'électrons

Un « boson » de Higgs dans un supraconducteur

Les liens entre la physique des hautes énergies et celle de la matière condensée sont nombreux et variés, ce qui enrichit mutuellement ces deux domaines. Ils ne se limitent pas à l'utilisation des concepts mathématiques de la théorie des cordes pour décrire les métaux étranges. Un autre exemple est constitué par des liens entre le modèle standard de la physique des particules et la physique des supraconducteurs.

Les physiciens du LHC (*Large Hadron Collider*), au CERN, ont annoncé récemment la découverte du boson de Higgs, clef de voûte du modèle standard de la physique des particules. Or, ce résultat intéresse beaucoup des physiciens de la matière qui étudient de près la détection et l'analyse de certains modes d'excitation dans la matière présentant des analogies avec le boson de Higgs.

L'une des premières évocations d'un tel mode d'excitation apparenté au boson de Higgs date de 1981. Peter Littlewood et Chandra Varma, deux théoriciens de la physique du solide aux Laboratoires Bell, aux États-Unis, ont interprété le mode d'excitation collectif des électrons qui apparaît dans l'état supraconducteur d'un cristal de sélénium de niobium de façon similaire à celui du boson de Higgs.

Les études sur ce mode d'excitation au sein du sélénium de niobium avaient débuté en 1980 avec les travaux de R. Sooryakumar et M. Klein, de l'Université de l'Illinois. Ils avaient observé ce mode d'excitation par spectroscopie Raman. En principe, ce mode est indétectable parce qu'il ne se couple pas directement à la lumière. Il était ici observable parce que la lumière d'un laser excitait une onde de déplacement des

atomes du solide, qui elle-même faisait varier le nombre d'électrons disponibles pour la supraconductivité.

Le mode d'excitation dans le cas du sélénium de niobium est mathématiquement analogue à celui introduit en 1964 par Peter Higgs en physique des particules avec le boson de Higgs. Le théoricien de la physique des hautes énergies s'était d'ailleurs inspiré de travaux de physique de la matière condensée pour élaborer sa théorie.

Des chercheurs de notre laboratoire (équipe SQUAP) sont récemment allés plus loin et ont apporté de nouvelles preuves de la nature de ce mode d'excitation du sélénium de niobium. Ils ont mis en évidence qu'un tel mode de Higgs était absent dans un composé supraconducteur très similaire au sélénium de niobium, mais où le mode particulier

de déplacement des atomes n'existe pas. Par ailleurs, en détruisant progressivement l'état supraconducteur (en chauffant le cristal de sélénium de niobium de $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-265\text{ }^{\circ}\text{C}$), ils ont montré qu'alors que le mode de Higgs disparaît peu à peu, l'onde de déplacement des atomes gagne en intensité, tout cela en respectant une loi de conservation prédite par la théorie. Ces nouvelles preuves de l'existence d'un mode d'excitation analogue au boson de Higgs dans un supraconducteur continuent de stimuler les physiciens. Il s'agit, par exemple, d'arriver à détecter de telles excitations dans d'autres supraconducteurs ou dans d'autres systèmes quantiques.

Marie-Aude MÉASSON
Laboratoire Matériaux
et phénomènes quantiques,
CNRS-Université Paris Diderot

intriqués à une température non nulle équivaut à l'étude d'un trou noir dans le cadre de la théorie des cordes. Le fait que des trous noirs soient impliqués montre à quel point ces dualités sont extraordinaires. Personne ne suggère que les phases quantiques de la matière contiennent véritablement des trous noirs ; le lien est plus subtil. Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, est connu pour avoir montré (entre autres choses) qu'à un trou noir est associée une certaine température. Celle-ci se traduit, dans la logique de la dualité, par le fait que le système correspondant de matière condensée est chaud, de sorte que l'onde de densité de spin ou le supraconducteur se transforme en un métal étrange.

Dialogue entre un trou noir et un superfluide

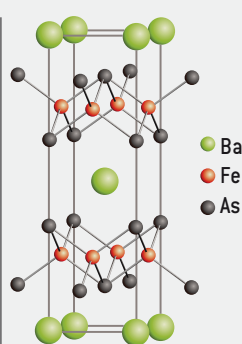
Ces méthodes ont permis de mieux expliquer les métaux étranges et d'autres états de la matière, mais elles ont été surtout utiles pour élucider la transition d'un superfluide à un isolant de Mott – type de matériau qui devrait être conducteur, mais dont les électrons sont bloqués dans des puits de potentiel qui les empêchent de conduire le courant. Un superfluide est analogue à un supraconducteur, si ce n'est qu'il est constitué d'atomes électriquement neutres et délocalisés dans le matériau. Et ce n'est pas la résistance électrique qui devient nulle, mais la viscosité du fluide. Ces dernières années, les expérimentateurs ont développé de nouvelles méthodes pour créer des superfluides artificiels. Ils mettent en place un réseau de lasers qui s'entrecroisent en formant une onde stationnaire périodique et versent dans ce dispositif de grandes quantités d'atomes extrêmement froids. Cela crée des puits de potentiel qui piègent plus ou moins les atomes. Si le potentiel est peu profond, les atomes se comportent comme un superfluide : ils se déplacent librement et sans résistance d'un site du réseau à un autre. Quand les chercheurs augmentent l'intensité du laser, donc la profondeur du potentiel périodique, les effets de corrélation sont augmentés et le superfluide se transforme brutalement en un isolant de Mott.

Au point de transition entre l'état superfluide et l'état isolant, les atomes circulent d'une façon très particulière. Par exemple, quand on supprime la pression externe qui fait se déplacer les atomes, ceux-ci s'immobilisent à une allure qui dépend de la température

Un exemple de métal étrange

À basse température, l'arséniure de baryum et de fer (BaFe_2As_2) change de propriétés en fonction de son dopage. Celui-ci consiste à remplacer une certaine fraction d'arsenic par du phosphore. Si le dopage est faible, le matériau forme un état qu'on nomme « onde de densité de spin ». Un électron du réseau cristallin se trouve entouré avec une plus grande probabilité d'électrons ayant un spin opposé. Dans cette phase, on observe une quasi-périodicité spatiale alternant des spins *haut* et *bas*.

Si la quantité de dopant augmente, la régularité de l'onde de densité de spin diminue. Elle disparaît pour la quantité critique de 30 pour cent d'arsenic



STRUCTURE de l'arséniure de baryum et de fer.

remplacé par du phosphore. Le spin de chaque électron a alors autant de chance d'être *haut* que *bas* sur chaque site du réseau cristallin. L'onde de densité de spin n'existe plus, mais le matériau devient supraconduc-

teur. Cependant, les physiciens pensent qu'il obéit à une théorie semblable à la théorie BCS, si ce n'est que la force attractive entre les paires d'électrons n'a pas pour origine les vibrations du réseau cristallin. Le mécanisme de formation des paires n'est pas encore compris.

La transition entre les phases est nommée point critique quantique. Si on maintient le dopage de 30 pour cent et que l'on augmente la température, une nouvelle phase apparaît, celle des métaux étranges dont la résistance électrique évolue différemment de celle des métaux ordinaires en fonction de la température. Un phénomène d'intrication massif entre ses électrons semble la décrire.

et de la constante de Planck, le paramètre fondamental de la théorie quantique, lequel n'intervient pas dans le comportement des autres phases. Nous avons expliqué ce comportement en imaginant que le fluide critique quantique était l'équivalent par dualité d'un trou noir dans la théorie des cordes.

La dualité a pourtant un inconvénient. Par nature, elle transforme ce qui est complexe en quelque chose de simple. Mais nous ne voulons pas toujours transformer le problème : nous voulons aussi comprendre la complexité en elle-même. La dualité est une boîte noire mathématique qui nous cache les détails des états intriqués ou la façon dont ces états apparaissent dans les matériaux réels. L'explication des mécanismes en jeu en est encore à ses débuts. Pour ceux d'entre nous qui ont l'habitude de réfléchir à la dynamique des électrons dans les cristaux, la théorie des cordes a apporté une nouvelle perspective à la dynamique des états quantiques complexes faisant intervenir l'intrication. Pour les théoriciens des cordes, l'intérêt que nous portions à leur approche a piqué leur curiosité pour les phases des matériaux quantiques, des phénomènes bien éloignés de la physique des commencements de l'Univers ou de ce qui se passe dans les accélérateurs de particules. L'étrange confluence de ces courants de pensée met en lumière d'une façon inattendue l'unité de la nature. ■

■ L'AUTEUR



Subir SACHDEV est professeur de physique à l'Université Harvard, aux États-Unis.

Il est l'auteur de l'ouvrage *Quantum Phase Transitions* [Cambridge University Press, 2011].

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Sachdev, *What can gauge-gravity duality teach us about condensed matter physics ?*, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 3, pp. 9-33, 2012.

C. V. Johnson et P. Steinberg, *What black holes teach about strongly coupled particles*, *Physics Today*, vol. 63(5), pp. 29-33, 2010.

I. R. Klebanov et J. M. Maldacena, *Solving quantum field theories via curved spacetimes*, *Physics Today*, vol. 62(1), pp. 28-33, 2009.

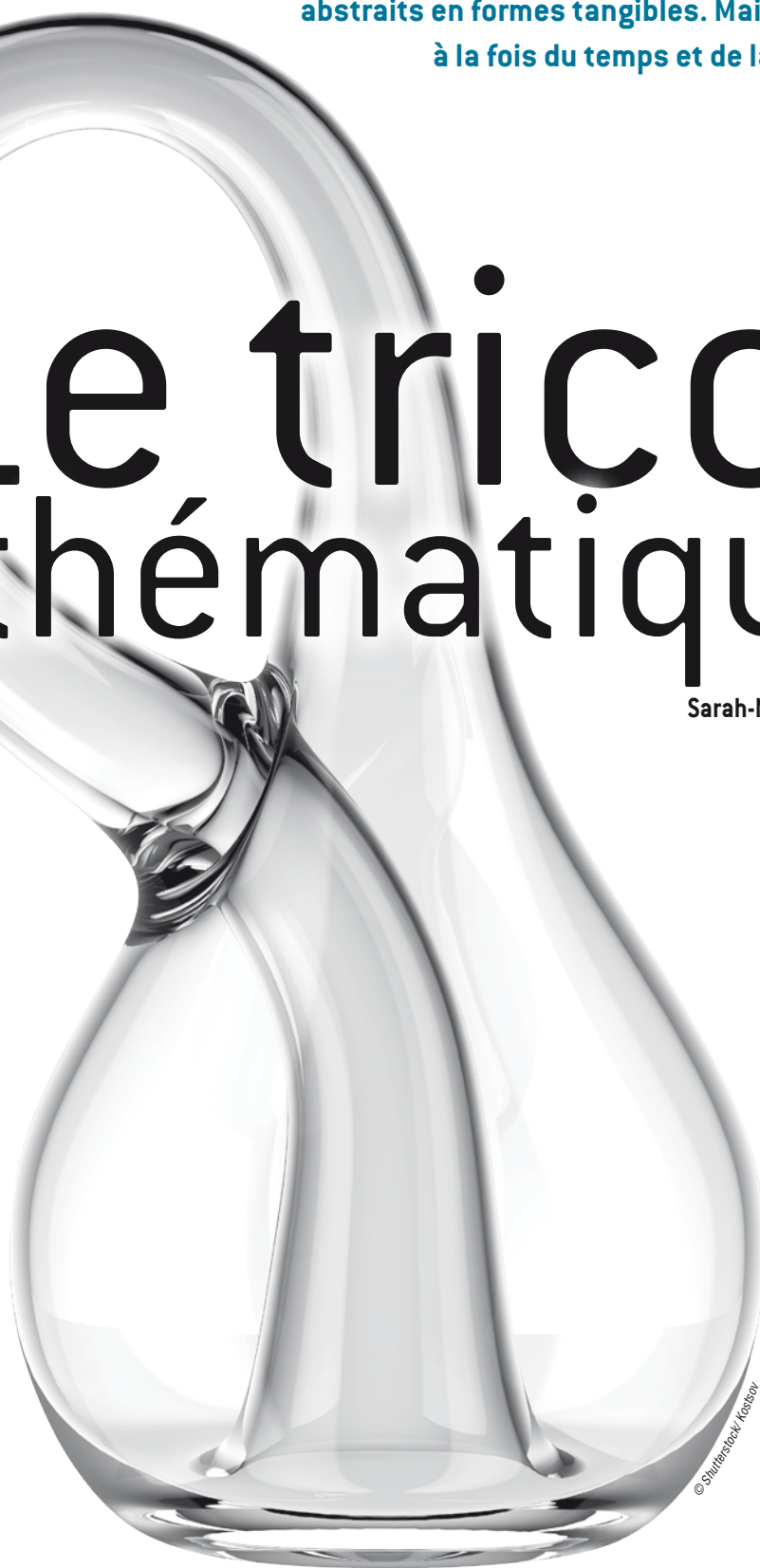
Le tricotage permet de traduire
des surfaces et des objets mathématiques
abstraits en formes tangibles. Mais cela exige
à la fois du temps et de la créativité.

Le tricot mathématique

Sarah-Marie Belcastro

L'ESSENTIEL

- Les premiers tricots représentant des objets mathématiques datent d'il y a au moins un siècle.
- La représentation d'objets mathématiques par des tricots soulève des difficultés qui ne sont pas juste matérielles ou techniques, surtout si l'on cherche à être fidèle aux mathématiques.
- L'auteur a notamment tricoté des bandes de Möbius, des bouteilles de Klein, des nœuds ou des graphes intégrés à une surface torique.



© Shutterstock / Kasey