

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.

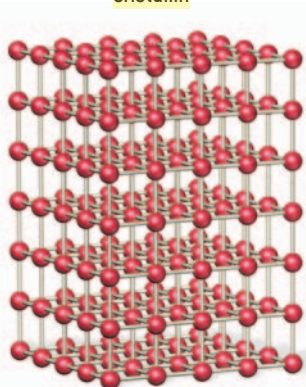
La physique quantique confère aux atomes et aux électrons de la matière de nouvelles voies pour s'organiser. Les phases classiques (solide, liquide, gaz) correspondent à des arrangements différents des atomes et des molécules en fonction de la température. Les phases quantiques font intervenir des arrangements 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-

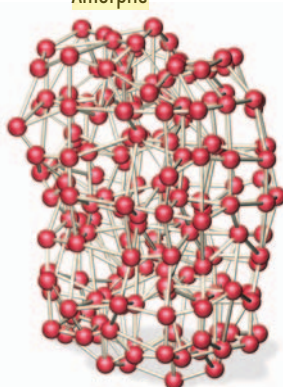
cules sont mobiles, mais liées. Les gaz ont un volume et une forme variables. Leurs molécules sont mobiles et ne sont pas, ou peu, liées. Au-delà d'une certaine pression et d'une certaine température qui définissent le « point critique », il devient impossible de distinguer le gaz du liquide (voir le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

SOLIDE

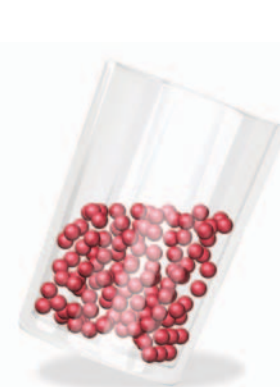
Cristallin



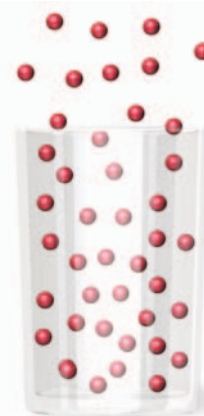
Amorphe



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.

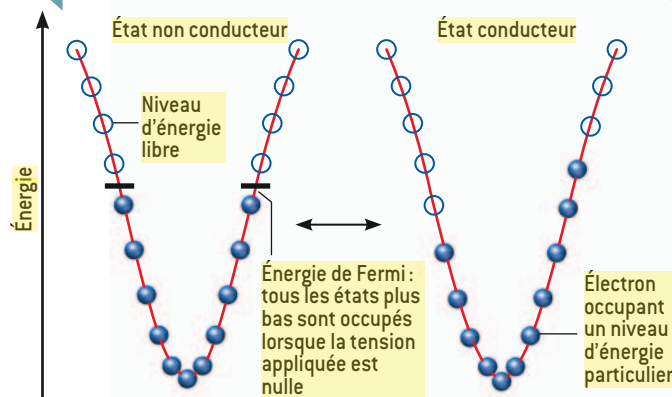
Les isolants ne conduisent pratiquement pas le courant. Les matériaux n'offrent pas aux électrons d'états libres ayant une énergie accessible. Les électrons restent piégés là où ils sont. Ils occupent tous les niveaux d'énergie disponibles.

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-

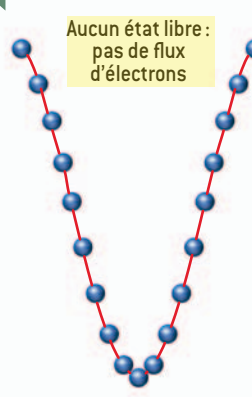
trons : elles peuvent se mettre dans un état quantique de la même énergie, ce qui leur permet de circuler sans résistance électrique.

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.

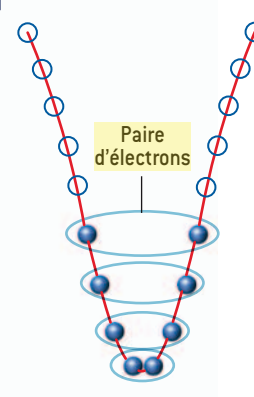
CONDUCTEUR (MÉTAL)

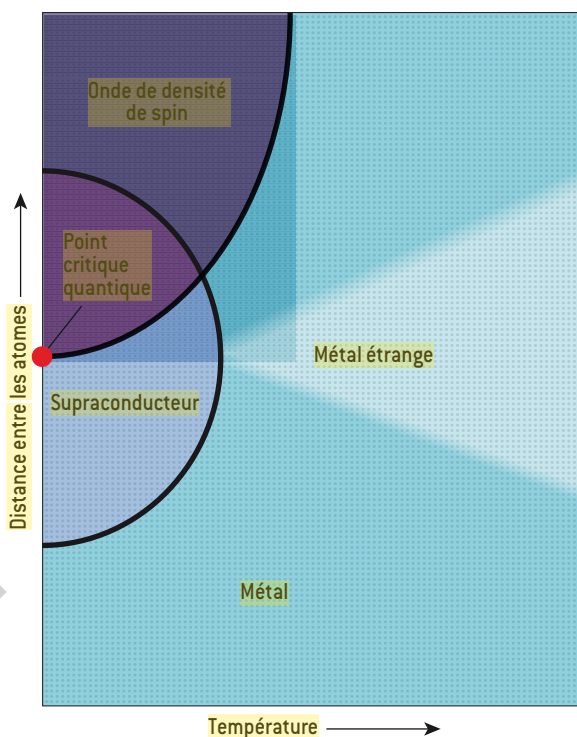
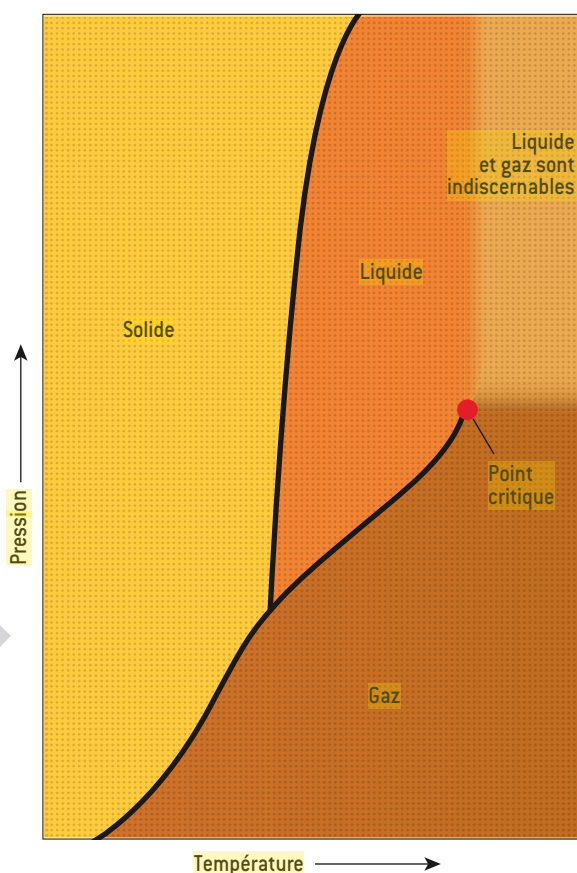


ISOLANT



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