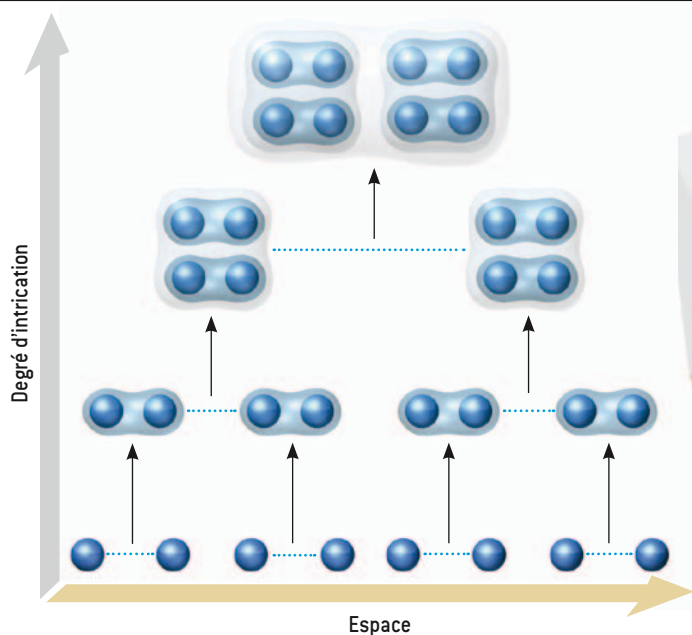
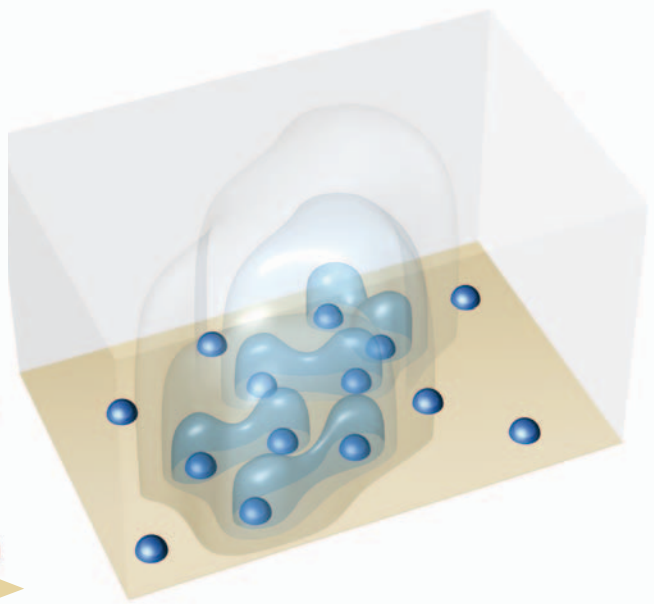




Hiérarchie de l'intrication

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'un 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