Un **nouvel état** de la matière

Les isolants topologiques sont des matériaux d'un nouveau type, isolants à l'intérieur et conducteurs en surface. Ils seraient idéaux pour la spintronique et pour l'informatique quantique.

David CARPENTIER
est chercheur au CNRS, et travaille au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon

Laurent LÉVY
est professeur à l'université de Grenoble, et travaille à l'institut Néel.

L'ESSENTIEL

- Un isolant topologique est isolant à l'intérieur et conducteur en surface.
- La physique des électrons à la surface des isolants topologiques est une « physique relativiste ».
- Les électrons circulent à la surface dans une direction qui dépend de leur spin.
- Les premiers matériaux dotés de ces propriétés sont d'ores et déjà fabriqués.

Au cours des siècles, les mathématiciens ont découvert diverses structures géométriques, algébriques... que l'on croyait cantonnées dans le domaine des idées abstraites. Pourtant, au gré des progrès, on s'est rendu compte que nombre d'entre elles se manifestent dans les sciences physiques. Par exemple, l'espace de Minkowski, un espca pseudo-euclidien à quatre dimensions, est le fondement de la relativité générale, les groupes de symétrie s'appliquent aux facettes des cristaux viennent.

Certains objets familiers, tels les nœuds et les formes des surfaces ont été étudiés et classés par une branche des mathématiques, la topologie, qui s'intéresse aux propriétés générales de ces objets, indépendantes de leurs déformations. Un des travaux pionnier de ce domaine est celui du Suisse Leonhard Euler qui en 1736 démontra l'impossibilité d'un parcours passant une et une seule fois par les sept ponts de la ville de Königsberg. Sa résolution de ce problème est indépendante de la longueur et du détail des parcours envisagés, elle ne dépend que des contraintes imposées par le passage des ponts.

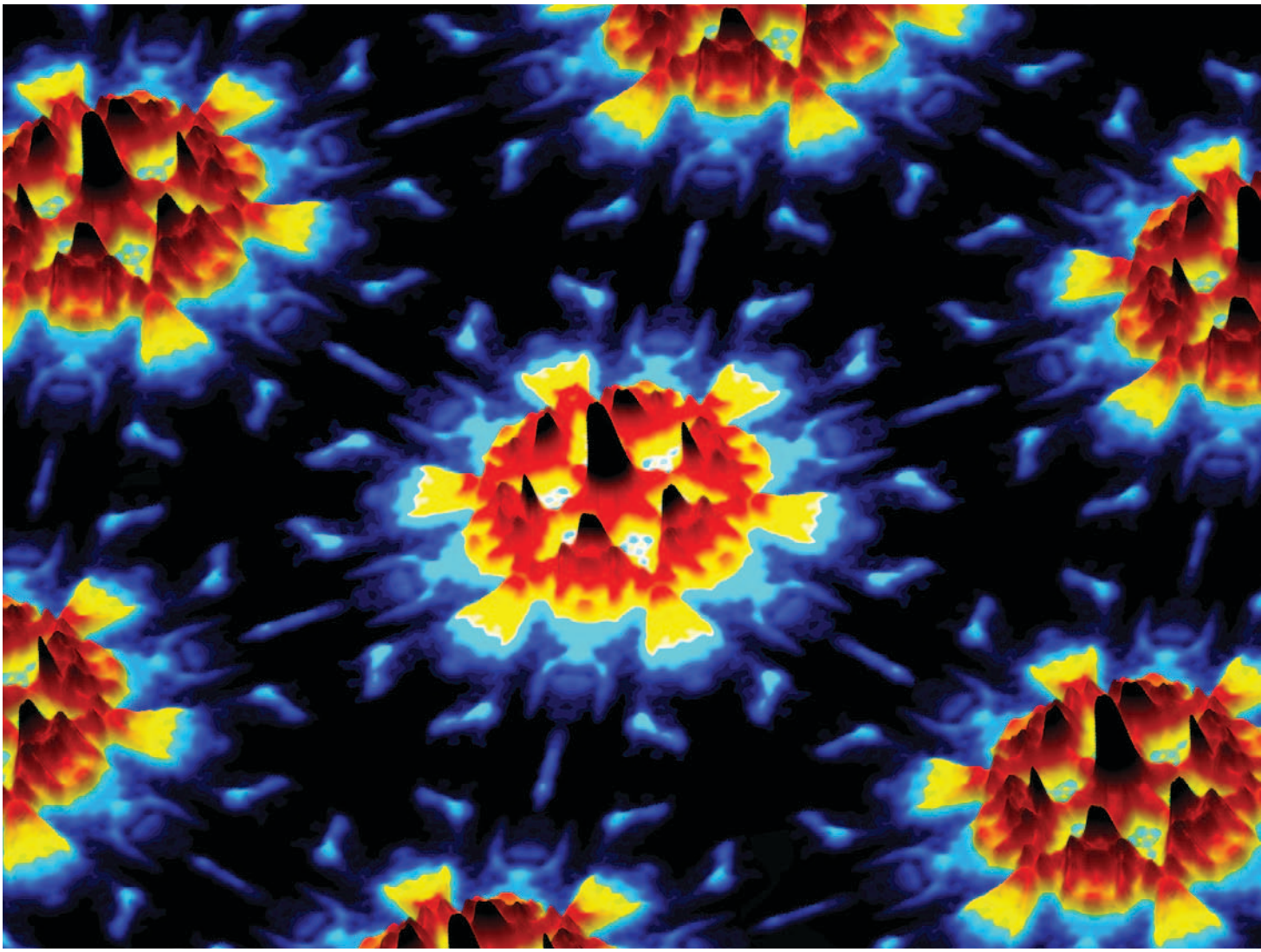
Il y a dix ans, on aurait eu du mal à croire que les propriétés isolantes ou conductrices de la matière relevaient des propriétés topologiques des surfaces fermées. Pourtant, en 2005, des travaux fondateurs ont montré que non seulement les solides avaient un ordre « topologique » caché, mais qu'une nouvelle classe de matériaux isolants dans leur masse étaient conducteurs à leurs surfaces. Ces « isolants topologiques » étaient pour la plupart des matériaux connus pour leurs propriétés thermoélectriques et même utilisés dans les caméras infrarouges. Des études expérimentales de ces isolants topologiques ont confirmé la nature métallique et singulière de leur surface. Ces surfaces métalliques ont des propriétés uniques qui les rendent particulièrement intéressantes pour développer une nouvelle électronique fondée sur le spin de l'électron. En outre, elles pourraient constituer les briques de base de l'informatique quantique.

Cette découverte remet en cause un ancien paradigme de la physique de la matière condensée, l'association entre ordre et symétrie. En effet, dans la classification moderne des différents états, la matière s'ordonne en changeant de symétrie. Ainsi, dans un liquide, les atomes sont répartis aléatoirement dans l'espace. En déplaçant dans l'espace l'ensemble de ces atomes d'une quantité arbitraire, nous obtenons toujours une configuration d'atomes correspondant à un liquide : il est invariant lors de cette translation.

En revanche, la situation change dans un solide où les atomes sont alors répartis d'une façon régulière en un cristal. Or ce cristal n'est invariant que par des translations particulières, celles qui permettent de passer d'un atome du cristal à un autre. Les translations qui laissent le solide invariant sont moins nombreuses que pour le liquide. Ainsi, en passant d'un état liquide à un état solide, la matière s'ordonne tandis que le nombre de ses symétries diminue. Cette idée générale a été utilisée pour classer l'ensemble des états possibles en considérant les symétries de la matière de plus en plus restreintes. C'est ce modèle qui a été mis à mal par la découverte des isolants topologiques, car l'ordre qui les caractérise ne peut pas être décrit comme une restriction de symétrie. Ces nouveaux matériaux ont ainsi ouvert un champ conceptuel nouveau, et offert une riche extension de la classification actuelle des états de la matière condensée.

Qu'est-ce qu'un isolant ?

Un isolant est un solide qui ne conduit pas le courant électrique. Plus précisément, quand une petite différence de potentiel est appliquée aux bornes d'un isolant, aucun courant électrique n'apparaît, à l'inverse d'un métal où ce courant est proportionnel



P. Roushan et A. Yazdani

CE MOTIF révèle comment les électrons se comportent à la surface d'un alliage à base de bismuth. Il montre notamment qu'ils ont un spin identique, ce qui est typique d'un isolant topologique.

au potentiel. D'où vient cette différence ? Après tout, qu'ils soient isolants ou conducteurs, les cristaux sont des arrangements périodiques d'atomes.

Pour répondre, décrivons le comportement des électrons de chaque atome constituant le cristal à l'intérieur du réseau cristallin. Aux petites échelles, on ne peut rendre compte du mouvement de ces particules chargées qu'à l'aide de la physique quantique. L'électron n'est plus alors considéré comme une charge ponctuelle, mais comme une onde sensible à tout ce qui se passe dans le solide, c'est-à-dire à l'arrangement précis de tous les ions à l'intérieur du cristal. La description de l'électron, qui est maintenant une « onde électronique », se fait à l'aide d'une fonction $\psi(r)$ d'une variable complexe r. Cette fonction dite d'onde a en tout point de l'espace une amplitude et une phase (respectivement la partie réelle et imaginaire de la variable complexe).

En physique classique la trajectoire d'un électron dépend de sa quantité de mouvement k. De façon analogue, la fonction d'onde $\psi_k(r)$ est également paramétrée par sa quantité de mouvement k. Alors que cette quantité de mouvement peut prendre n'importe quelle valeur lorsque l'électron se propage dans le vide, ce n'est plus le cas dans un cristal à cause de sa structure périodique. En effet, la fonction d'onde $\psi_k(r)$ doit refléter les symétries de ce réseau. Quand on déplace l'ensemble du réseau d'un vecteur R reliant deux de ses points, il est indiscernable du premier : la fonction d'onde $\psi_k(r)$ doit donc être identique à la fonction d'onde translatée $\psi_k(r+R)$. Cette contrainte impose à la quantité de mouvement k de l'électron d'être restreinte à une région finie (de l'ordre de $2\pi/a$ dans chaque direction, où a est la taille de la maille du réseau), nommée zone de Brillouin.

Une propriété importante de cette zone de Brillouin est que ses bords opposés doivent être identifiés, car ils décrivent la même fonction d'onde *(voir l'encadré page xx)*. Quand on replie cette zone de Brillouin de façon à superposer les bords opposés deux à deux, on obtient le tore de Brillouin.

Une autre conséquence de la présence d'un réseau cristallin réside dans les interférences de ces ondes électroniques qui décrivent les électrons. En optique, les ondes lumineuses interfèrent et donnent lieu à des franges d'interférences dès lors que plusieurs chemins sont possibles entre la source et le point d'observation. Les figures d'interférence dépendent de la longueur des chemins parcourus. Dans un solide, la géométrie du réseau cristallin impose ces longueurs pour les électrons, qui interfèrent de façon soit constructive soit destructive. La conséquence pratique de ces interférences est que pour chaque quantité de mouvement k, seul un nombre fini d'énergies $E_1(k)$, $E_2(k)$… deviennent possibles pour l'électron. L'ensemble des valeurs d'une énergie $E_1(k)$ pour toutes les quantités de mouvements k sur le tore de Brillouin définit une bande d'énergie. Selon la nature des cristaux, la répartition en énergie de ces bandes diffère. Pour certains, les bandes successives $E_1(k)$, $E_2(k)$… se chevauchent ou se touchent ; pour d'autres, elles sont séparées par un « gap » qui correspond à la différence d'énergie entre, par exemple, le maximum de la bande $E_1(k)$ et le minimum de la bande $E_2(k)$ *(voir l'encadré ci-contre)*.

Quand ces bandes d'énergies sont connues, on en déduit les propriétés du solide : pour chaque bande et pour chaque valeur de la quantité de mouvement k, on ne peut mettre qu'un électron. Afin de minimiser l'énergie des électrons, on les répartit sur les bandes d'énergies en commençant par celles de plus faibles énergies. Un solide isolant correspond alors à la situation où la bande $E_1(k)$ est entièrement remplie par des électrons et séparée par un gap de la bande suivante $E_2(k)$ qui reste inoccupée. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux bornes d'un tel solide, l'énergie électrostatique ne peut être transmise aux électrons tant qu'elle est inférieure au gap. Aucun courant ne peut alors apparaître, il s'agit bien d'un isolant. En revanche, lorsque les bandes se chevauchent ou se touchent, une différence de potentiel aussi petite soit-elle est transmise aux électrons et modifie leur répartition en énergie. Un courant devient possible : le cristal est métallique.

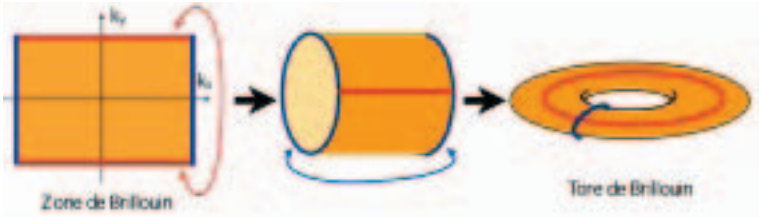
Un ordre topologique bien caché

Un isolant est donc un solide caractérisé par un gap en énergie entre ses bandes d'énergie remplies d'électrons et celles vides. Habituellement, une fois ce gap déterminé, on s'intéresse aux propriétés de symétrie des fonctions d'onde des bandes remplies. Nous verrons qu'un ordre insoupçonné peut s'y cacher. Cet ordre est associé à une propriété topologique *(voir la figure page ci-contre, en haut)* des bandes d'énergies remplies de l'isolant, bien définies par la présence du gap.

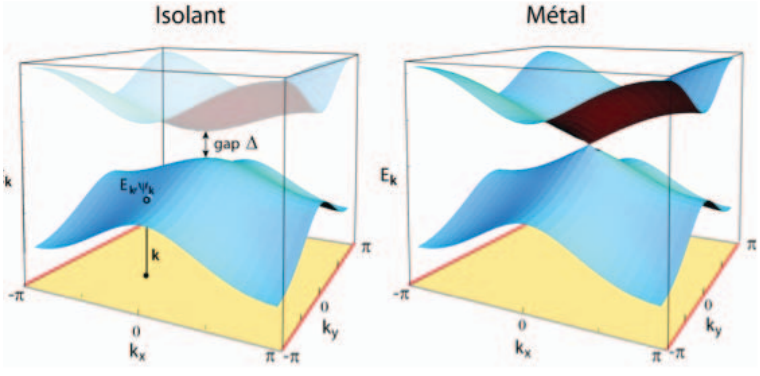
Pour simplifier, nous ne considérerons qu'une seule bande pleine, la bande $E_1(k)$. Chaque point de cette bande au-dessus du tore de Brillouin décrit un état électronique : il est donc associé à une fonction d'onde $\psi_k(r)$. L'objet mathématique qui nous intéresse est l'ensemble de ces fonctions d'onde, définies pour tous les points k du tore de Brillouin. Les propriétés topologiques sont des propriétés globales de l'objet, que l'on ne peut discerner en l'étudiant uneiquement de façon locale. Elles sont associées à l'évolution de cet objet lorsque l'on s'enroule autour de lui. Dans notre cas, celui de l'ensemble des fonctions d'onde en tout point du tore de Brillouin, nous allons suivre l'évolution de ces fonctions d'onde lorsque k évolue en traversant la zone de Brillouin : s'enroulent-elles simplement, ou d'une façon complexe ? En d'autres termes, de façon analogue à la topologie d'un ruban, la question est celle du devenir de la fonction d'onde après un

LES BANDES D'ENERGIE DANS LES SOLIDES

Afin de faciliter la représentation des bandes d'énergie, considérons un cristal bidimensionnel. Dans un solide, la présence du réseau cristallin des atomes contraint la quantité de mouvement k (ici défini par deux coordonnées k_x et k_y) des électrons à ne prendre des valeurs que dans une région finie : la zone de Brillouin *(a, en orange)*. Cette zone de Brillouin est en fait un tore, car ses côtés opposés, qui décrivent les mêmes états électroniques, doivent être associés (*b* et *c*). Ce tore est une surface fermée dont on peut faire le tour de deux façons différentes *(c, en rouge et en bleu)*.



Les états électroniques sont ensuite déterminés pour chaque valeur de cette quantité de mouvement : on obtient ainsi en chaque point k un ensemble discret d'énergies autorisées pour les électrons : $E_1(k)$, $E_2(k)$… Pour chaque énergie $E_i(k)$, l'état correspondant de l'électron est décrit par une fonction d'onde $\psi_{k,i}(r)$. Lorsque la quantité de mouvement k évolue dans la zone de Brillouin, chaque énergie $E_i(k)$ définit une bande d'énergie *(d et e, les surfaces bleues)*. Les électrons sont ensuite répartis sur ces bandes, par ordre croissant d'énergie : cette procédure définit les bandes remplies et les bandes vides. Les isolants *(d)* se différencient des métaux *(e)* par l'existence d'un gap d'énergie entre les bandes dont les états électroniques sont occupés par des électrons, et les bandes vides.



tour autour du tore de Brillouin : revient-on exactement à la fonction d'onde initiale ou à une autre légèrement différente ?

La phase des fonctions d'onde joue un rôle central dans cette propriété de topologie. Pour le préciser, prenons un point k_0 du tore et fixons la phase de la fonction d'onde $\psi_{k0}(r_0)$ en ce point. Lorsqu'on suit une boucle issue de ce point autour du tore, la phase des fonctions d'onde évolue continûment. Mais de retour au point k_0, la mécanique quantique impose de retrouver la même fonction d'onde… à une phase près.

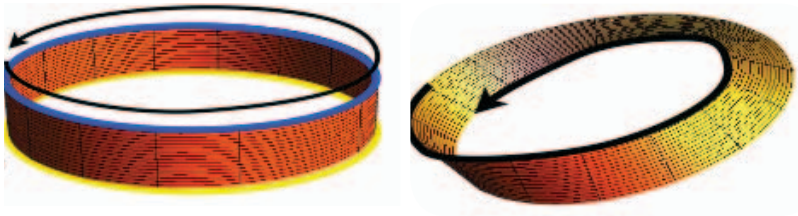
La variation de phase obtenue après un tour du tore ne dépend ni du point initial k_0, ni du chemin choisi pour faire le tour du tore : il s'agit d'une propriété topologique de l'ensemble des fonctions d'ondes. Cette variation de phase est nulle dans la plupart des isolants. Cependant, en 1981, des physiciens ont découvert un état pour lequel cette variation de phase est non nulle : l'effet Hall quantique *(voir l'encadré ci-dessous)*, qui est un état particulier d'un ensemble d'électrons confinés dans un plan et soumis à un très fort champ magnétique.

La compréhension de cet état a révélé l'importance de la topologie des bandes électroniques remplies en matière condensée. L'existence de cette propriété topologique a alors conduit les physiciens à définir un nouvel ordre, l'ordre topologique. Cet ordre n'est plus associé à une symétrie, mais caractérise un état de la matière dont l'ensemble de fonctions d'onde électroniques est doté d'une propriété topologique.

Pendant plus de deux décennies, cet ordre topologique est resté indissociable de l'effet Hall quantique : une propriété certes exotique et donc intéressante, mais restreinte à des conditions physiques très particulières. Cette image a volé en éclat avec le travail de Charles Kane et Eugene Mele, de l'Université de Pennsylvanie, à Philadelphie, aux États-Unis. En 2005, ces deux physiciens se sont rendus compte qu'un autre type d'ordre topologique existait dans des solides à l'état naturel, indépendamment de tout champ magnétique.

Le rôle du spin

Pour comprendre cet ordre, revenons aux électrons sur le tore de Brillouin. Nous avons négligé jusqu'à maintenant une propriété de ces électrons, leur spin. Il s'agit d'une propriété intrinsèque de l'électron, telles sa charge et sa masse. Ce spin est un analogue quantique d'un petit moment cinétique intrinsèque peut être représenté par un petit vecteur S pointant dans une direction arbitraire. Sont associés à ce vecteur S deux états pour l'électron : l'état ↑ et l'état ↓ pour les états de spin dirigés respectivement dans la direction de S ou en sens opposé. Cette caractéristique quantique des électrons indique qu'en chaque point k du tore de Brillouin, il n'y a pas un, mais deux états, et donc deux fonctions d'onde $\psi_{k\uparrow}(r)$ et $\psi_{k\downarrow}(r)$.



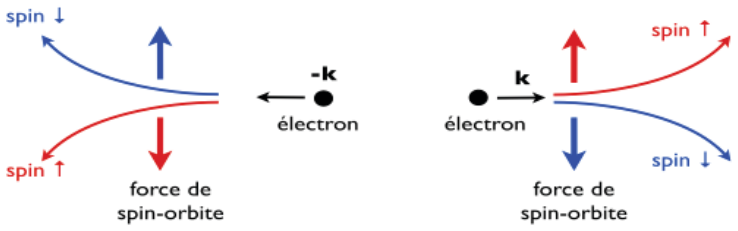
DES RUBANS FERMÉS illustrent une notion topologique proche du sujet de cet articles. On distingue deux formes : le ruban simple *(a)* et celui de Möbius *(b)*. Ils ne peuvent être différenciés localement, car autour de chaque point ils correspondent tous deux à des sections *(en rouge)*. En revanche, lorsque l'on fait le tour, on revient au point de départ dans le premier cas et en un point différent dans second. Cette propriété est topologique, car indépendante de la forme précise du ruban : il est impossible de déformer continûment le ruban simple en celui de Möbius.

La présence de ces deux états joue un rôle central dans le travail de C. Kane et E. Mele. En effet, ils ont examiné une interaction qui agit de façon différente selon l'état du spin : il s'agit de l'interaction d'origine relativiste, nommée spin-orbite, qui illustre comment le spin influe sur le mouvement de l'électron *(voir l'encadré page xx)*. C. Kane et G. Mele ont étudié les contraintes imposées par cette interaction sur la topologie des fonctions d'onde sur le tore de Brillouin. Pour ce faire, ils se sont intéressés à une des propriétés fondamentales de cette interaction : son invariance par la symétrie de renversement du temps.

En physique classique, une situation est invariante par renversement du temps quand elle est inchangée par renversement des vitesses ou, de façon équivalente, des quantités de mouvement k, (qui devient $-k$) sans modification des positions. Lors de cette transformation, les spins des électrons sont eux-mêmes renversés. Si nous notons $T\psi_{k\uparrow}$, la fonction d'onde obtenue par renversement du temps de $\psi_{k\uparrow}$, les arguments précédents nous indiquent qu'il

L'INTERACTION SPIN-ORBITE

L'interaction spin-orbite *(voir la figure ci-dessous)* traduit l'effet du spin d'un électron sur son mouvement. Elle est issue de la physique quantique relativiste, et concerne les particules dont les vitesses sont proches de celle de la lumière. Elle joue donc peu de rôle en matière condensée où la vitesse des électrons est souvent très inférieure à celle de la lumière. Cependant, dans certains matériaux qui contiennent des atomes lourds, elle ne peut plus être négligée. En effet, dans un modèle simple d'atome de Bohr où les électrons décrivent une orbite circulaire autour d'un noyau central, plus le noyau est chargé électriquement et possède un nombre atomique Z élevé, plus la force qui s'exerce sur les électrons environnants est importante, plus le rayon de l'orbite est court, et donc plus la vitesse de rotation des électrons est élevée. Ainsi, autour des noyaux lourds, les électrons sont suffisamment rapides pour que les effets relativistes, dont l'interaction spin-orbite, deviennent significatifs. Une analyse plus précise montre que cette amplitude varie comme la puissance quatrième du nombre atomique Z.



La force due à l'interaction spin-orbite agit de façon analogue à un champ magnétique B (approximativement égal à kE, k étant la quantité de mouvement de l'électron et E le champ électrique) lequel influe sur l'état de spin de l'électron : pour une direction donnée de la quantité de mouvement k, l'interaction dévie les électrons de spin ↑ en sens opposé de ceux de spin ↓. Par ailleurs, les électrons de spin ↑ et de quantité de mouvement k et −k sont soumis à deux forces de spin-orbite opposées.

s'agit de la fonction d'onde de l'électron de quantité de mouvement $-k$ et de spin ↓, c'est-à-dire $\psi_{-k\downarrow}$. Or $\psi_{-k\downarrow}$ est également une fonction d'onde associée aux mêmes quantité de mouvement $-k$ et spin ↓. Cependant, la mécanique quantique nous apprend que $T\psi_{k\uparrow}$ et $\psi_{-k\downarrow}$ ne sont pas nécessairement identiques, mais peuvent différer d'une phase. Est-elle importante ? En d'autres termes, peut-on toujours la choisir nulle ? À nouveau, la réponse dépend des propriétés d'ensemble, dites topologiques, de cette phase : peut-on la modifier continûment sur le tore de Brillouin pour la rendre nulle ? Pour le savoir, C. Kane et E. Mele ont étudié les propriétés d'enroulement de cette phase autour du tore et ont découvert que cet enroulement décrivait une nouvelle propriété topologique, distincte de celle de l'effet Hall quantique. Cette propriété caractérise un nouvel ordre non conventionnel et donc un nouvel état de la matière : les isolants topologiques.

Le premier état d'isolant topologique prédit était à deux dimensions d'espace : il décrit une propriété d'électrons confinés dans un plan, de sorte que leur mouvement dans la troisième direction puisse être négligé, et soumis à une très forte interaction spin-orbite. Par analogie avec l'effet Hall quantique, et pour insister sur l'importance du spin des électrons, ce nouvel état a été nommé effet Hall quantique de spin.

Cependant, trois groupes de théoriciens ont simultanément montré en 2006 que cet effet Hall quantique de spin admet une généralisation naturelle pour décrire un nouvel état de matériaux tridimensionnels. En d'autres termes, des états de la matière dotés d'un ordre topologique analogue à celui de l'effet Hall quantique de spin pouvait exister dans des cristaux dans leur état naturel. Ce fut l'ouverture de la chasse aux matériaux topologiques !

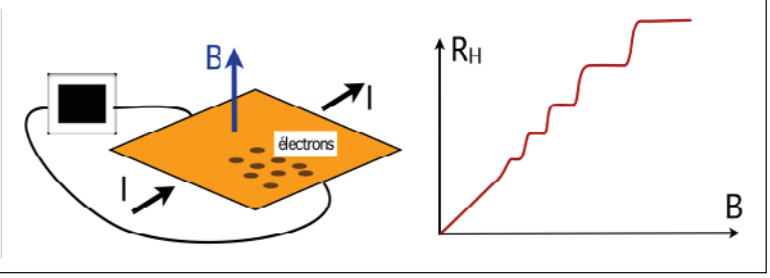
Avant de décrire les pistes suivies, attardons-nous sur cette propriété topologique : l'ordre associé, ou ordre topologique, est d'un genre nouveau puisqu'il ne peut se déduire de propriétés locales des fonctions d'onde. Cette découverte obligea à revoir la classification des phases de la matière. De plus, cet ordre topoligue traduit une propriété robuste des états associés : de même qu'un ruban standard ne peut être déformé en un ruban de Möbius, on ne peut déformer l'ensemble de fonctions d'onde d'un isolant topologique en celles d'un isolant standard. Cette robustesse topologique traduit donc une insensibilité des isolants topologiques à diverses perturbations, c'est-à-dire aux déformations continues des fonctions d'ondes électroniques de leurs bandes remplies.

Topologie et états de surface

Aussi séduisante et exotique soit-elle, la découverte des isolants topologiques n'aurait pas eu l'impact qu'elle a eue si une propriété remarquable de ces nouveaux états n'avait été identifiée : l'existence d'états métalliques à leur surface. Pour comprendre le lien entre ces états de surface et l'ordre topologique, prenons un morceau de matériau dans un état d'isolant topologique. Cet échantillon est entouré d'un isolant standard, tel l'air, dépourvu de propriété topologique. Comment décrire l'interface des deux isolants ? On doit trouver une façon de modifier continûment les énergies et les fonctions d'onde de l'isolant topologique en celles de l'isolant standard. Les deux matériaux étant isolants, ils ont chacun un gap entre leurs bandes d'énergie remplies et celles vides. Une idée naturelle est de déformer continûment les bandes remplies de l'isolant topologique en bandes remplies de l'isolant standard, et de même pour les bandes vides. Mais c'est impossible, car les fonctions d'onde des bandes remplies de l'isolant topologique ont un ordre topologique robuste, insensible aux déformations continues. Cette première stratégie n'est donc pas la bonne : on doit donc déformer à l'interface une bande remplie de l'isolant topologique en une bande vide de l'isolant standard. Toutefois, nous annulons le gap d'énergie au point de croisement des deux bandes. La surface de l'échantillon est nécessairement caractérisée par une absence de gap d'énergie *(voir la figure ci-contre)*. Or un isolant est un état avec gap d'énergie : la surface de l'échantillon n'est donc plus isolante, c'est un métal. Ce raisonnement montre qu'à sa surface, un isolant topologique se transforme en un métal !

L'EFFET HALL QUANTIQUE

L'effet Hall classique correspond à l'apparition dans un solide d'une différence de potentiel V_H dans une direction orthogonale à celle du courant I. Le rapport entre ces deux quantités définit la résistance de Hall $R_H=V_H/I$. Considérons un ensemble d'électrons piégés à une interface plane entre deux matériaux et soumis à un champ magnétique B orthogonal à ce plan *(a)*. Dans ce système, apparaît une résistance de Hall proportionnelle au champ appliqué. En 1980, le physicien allemand Klaus von Klitzing a mis en évidence l'apparition de plateaux dans la courbe R_H en fonction de B *(b)* à basse température : c'est l'effet Hall quantique. Il traduit l'apparition de bandes d'énergies discrètes pour les électrons bidimensionnels soumis à un champ magnétique. Ces bandes sont séparées par des gap en énergie. La situation est donc analogue à celle d'un isolant, avec une séparation nette entre bandes remplies d'électrons et les bandes vides. David Thouless, de l'Université de Washington, à Seattle, et ses collaborateurs ont montré en 1982 que ces bandes d'énergies remplies ont un ordre topologique, lié à des propriétés d'enroulement de la phase des électrons. Il s'agit du premier état de physique du solide caractérisé par un ordre topologique.

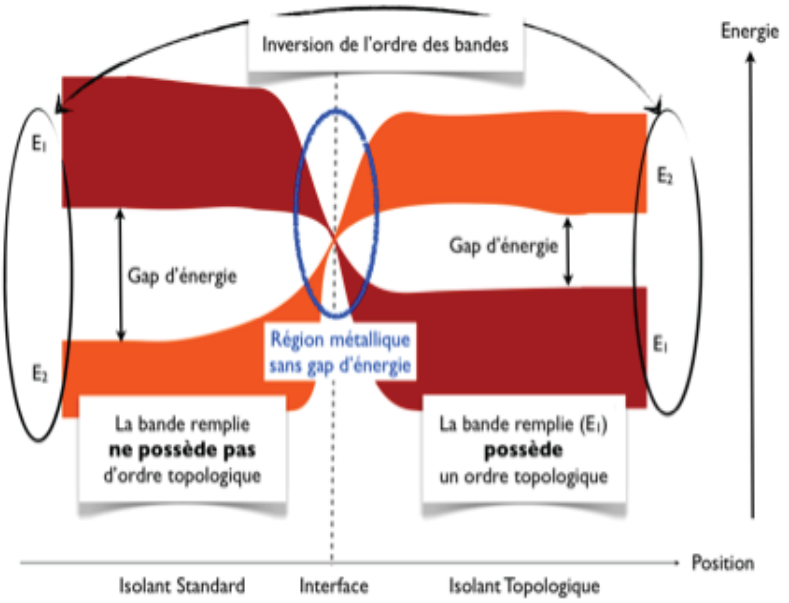


Les travaux théoriques ont révélé de plus que les métaux ainsi obtenus ne correspondent à aucun autre connu. Ainsi, l'interaction spin-orbite à l'origine de l'ordre topologique dans le volume a un effet radical à cette interface : sur les deux états de spins associés à chaque quantité de mouvement k un seul subsiste ! Dans chaque direction de propagation ne reste plus qu'un seul état de spin. Les bords de l'effet Hall quantique de spin, qui sont unidimensionnels, correspondent donc à des électrons de spin ↑ se propageant par exemple dans le sens horaire, et des électrons de spin ↓ dans le sens contraire. Les électrons de surface des isolants topologiques en dimension trois sont analogues : chaque paire de quantités de mouvement (k et $-k$) est associée à deux états de spins opposés. Pour ces électrons de surface, la direction du spin est corrélée à la direction de la quantité de mouvement.

Une seconde propriété remarquable de ces états de surface est que leur dynamique est régie par les mêmes lois que celle de particules se propageant à la vitesse de la lumière. Ainsi, la physique des électrons à la surface des isolants topologiques est une « physique relativiste » ! Cette situation n'est pas unique : le graphène découvert en 2004 est également un matériau dont les électrons se comportent comme des particules relativistes (voir *Le graphène, un nouvel eldorado ?*, par A. Geim, page xx). La différence majeure résulte du couplage du spin et de la quantité de mouvement à la surface d'un isolant topologique, chaque électron n'ayant qu'une seule valeur de spin possible, ce qui n'est pas le cas dans le graphène. Cette propriété unique ouvre des perspectives notamment pour développer une électronique inédite, nous y reviendrons.

Matériaux topologiques

Une propriété de l'ordre topologique de C. Kane et E. Mele, identifiée par le groupe de Shoucheng Zhang, de l'Université de Stanford, est vite apparue cruciale dans la quête des matériaux ayant cet ordre. Nous avons vu qu'à l'interface d'un isolant topologique et d'un autre standard, une bande d'énergie remplie de l'un se prolonge en une bande vide de l'autre. Nous pouvons inverser cet argument. En s'intéressant à deux matériaux similaires qui diffèrent uniquement par l'échange d'une bande remplie et d'une bande vide nous saurons que l'un est un isolant topologique. Une telle situation où deux bandes d'énergie sont « inversées » par rapport à l'ordre naturel n'est pas inhabituelle en physique des matériaux, où on parle d'une inversion de bandes. Chercher les isolants topologiques a donc consisté à traquer les solides isolants constitués d'éléments lourds, afin d'y trouver un fort spin orbite, et dotés d'une inversion de bandes.



À L'INTERFACE d'un isolant standard *(à gauche)* et d'un isolant topologique *(à droite)*, deux bandes, l'une remplie *(en rouge)* et l'autre vide *(en orange)*, se croisent et conduisent à l'annulation du gap en énergie *(au centre)*. La surface de l'isolant topologique est ainsi métallique.

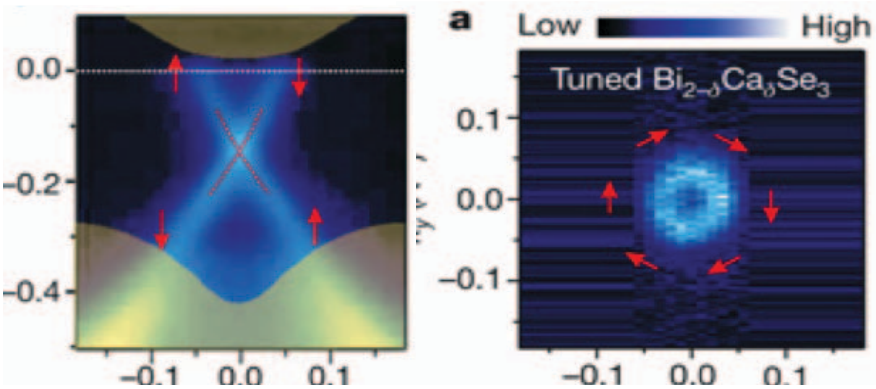
Sur une proposition de S. Zhang et de ses collaborateurs, un alliage prometteur fût identifié, le tellurure de mercure (HgTe). Ce matériau est utilisé couramment pour ses propriétés optoélectroniques infrarouges. Or, il a la propriété cruciale recherchée, à savoir une inversion de bandes résultant d'une interaction spin-orbite importante due au Mercure.

Afin d'obtenir l'état d'effet Hall quantique de spin, les physiciens de Stanford ont imaginé d'insérer une fine couche de tellurure de mercure, d'une dizaine de nanomètres d'épaisseur, dans un matériau hôte, le tellurure de cadmium (CdTe). L'année suivante, le groupe de Laurens Molenkamp, de l'Université de Würzburg, en Allemagne, a cherché les signatures expérimentales de l'effet Hall quantique de spin dans les couches de tellurure de mercure.

Comment détecter et mesurer cet ordre topologique ? Nous avons vu qu'un isolant topologique est nécessairement doté d'états métalliques robustes à sa surface : ils constituent une signature unique de cet ordre topologique et ont donc été recherchés par le groupe de L. Molenkamp pour détecter cette phase d'effet Hall quantique de spin. Pour un isolant, aucun transport électronique n'est possible, alors que pour un isolant topologique le transport se produit à travers les états de surface. Leur nature particulière se traduit par des propriétés de conduction uniques qui ont bien été observées, confirmant la découverte expérimentale de cette phase. Plus récemment, l'effet Hall quantique de spin a été détecté dans un autre alliage de semi-conducteurs aux propriétés similaires à celles du tellurure de mercure, l'arséniure d'indium (InAs) inséré dans de l'antimoniure de gallium (GaSb).

Des isolants topologiques 3D

À partir de 2006, la recherche d'éventuels matériaux massifs dotés d'un ordre topologique s'est



LA DÉPENDANCE de l'énergie des électrons en fonction de leur quantité de mouvement *k*, a été mesurée dans le matériau Bi_2Se_3 dopé en calcium. On distingue le gap entre la bande remplie et la bande vide, ainsi que les énergies des électrons de surface *(en bleu)*. Sur une coupe de cette structure de bande *(b)*, à énergie constante, le spin des électrons *(en rouge)* tourne autour de la surface d'énergie constante. Ces expériences confirment l'existence d'électrons « relativistes » à la surface de Bi_2Se_3, prédits par la théorie des isolants topologiques.

rapidement orientée vers les semi-conducteurs à base de bismuth, tels $Bi_{1-x}Sb_x$, Bi_2Se_3 et Bi_2Te_3. En effet, certains alliages à base de bismuth sont isolants et ont bien une inversion de bande due à l'interaction spin-orbite. Nous avons vu que dans le cas de ces isolants topologiques tridimensionnels, les états de surface sont des électrons « relativistes » dont l'état de spin et la quantité de mouvement sont liés. Découvrir un état d'isolant topologique consiste donc à détecter ces électrons relativistes à la surface d'un échantillon.

Une méthode pertinente est la photoémission résolue en angle : elle consiste à extraire des électrons du matériau en le bombardant avec des photons d'énergie et de direction incidente bien déterminées. En analysant les électrons émis, ont peut distinguer les états de surface de ceux de volume, et déterminer la dépendance de leur énergie en fonction de leur quantité de mouvement. Si de plus le spin de ces électrons peut être identifié, une caractérisation précise des états de surface du matériau devient possible. Zahid Hasan, de l'Université de Princeton, aux Etats-Unis, et son équipe ont été les premiers à détecter ces électrons « relativistes » à la surface d'échantillons de Bi_2Se_3 et Bi_2Te_3 découvrant ainsi les premiers isolants topologiques tridimensionnels *(voir la figure ci-dessus)*.

Cette découverte n'a pas marqué la fin des études expérimentales sur ces isolants topologiques, bien au contraire. Les efforts sont toujours en cours, pour améliorer la qualité des matériaux utilisés, pour explorer de nouvelles classes de matériaux candidats à cet ordre topologique, mais aussi pour développer de nouvelles sondes expérimentales.

Cette quête d'isolants topologiques est un préambule à de possibles applications, en particulier une électronique non conventionnelle fonée sur les propriétés des états de surface des isolants topologiques. En effet, le couplage du spin et de la quantité de mouvement des électrons de surface implique que tous les électrons se propageant dans une direction ont un spin déterminé. Cette propriété fait de ces états de surface des candidats de choix pour développer les briques d'une future électronique de spin, nommée spintronique, actuellement développée.

L'idée est de contrôler le spin à l'aide de la direction de propagation des électrons, c'est-à-dire avec un courant, afin de s'affranchir des limites technologiques de l'électronique actuelle. Le couplage du spin et du courant est naturel pour les états de surface des isolants topologiques. Nous avons vu que sur les bords de l'effet Hall quantique de spin, deux courants circulaient dans des sens opposés, chacun portant un spin donné. On peut ensuite séparer ces deux courants dits polarisés en spin pour « écrire » un bit binaire dans une mémoire magnétique. L'intérêt de cette approche est le contrôle des courants polarisés en spin sans le recours au moindre matériau magnétique, ce qui dispense des difficultés technologiques associées. Étant des semi-conducteurs, c'est-à-dire des isolants à petit gap, ces matériaux ont en outre des avantages pratiques : ils sont plus facilement intégrables aux méthodes actuelles de l'électronique à base de silicium.

Information quantique et fermions de Majorana

Depuis leur formulation en 1937 par le physicien italien Ettore Majorana, les particules qui portent son nom, on parle de « fermions de Majorana », fascinent les physiciens sans pour l'instant avoir été découvertes. Ces particules ont comme particularité d'être leurs propres antiparticules. Certains neutrinos pourraient être de bons candidats, mais la question n'a pas encore été tranchée. Les fermions de Majorana n'ont pas de charge, pas de spin et interagissent très faiblement avec leur environnement. Cette dernière caractéristique est justement celle recherchée pour l'élaboration de bits d'un nouveau genre, ceux du calcul quantique. Pour que ce calcul puisse avoir lieu, ces « bits quantiques » ne doivent changer d'état que lorsqu'on le leur impose, sans être perturbés par leur environnement. Pour les mettre ua point, on doit donc trouver des objets interagissant très faiblement avec leur environnement, tels que ces fermions de Majorana.

Or, C. Kane et son collègue Liang Fu ont montré en 2008 que lorsqu'un isolant topologique est mis en contact avec un supraconducteur, de nouveaux états de bord apparaissent non plus uniquement à la surface de l'isolant topologique, mais aussi entre le supraconducteur et l'isolant topologique. Ce sont justement des fermions de Majorana. D'assez nombreuses propositions ont été faites pour les mettre en évidence. Quelques expériences ont obtenu des indices indirects de leur existence. Mais il s'agit là d'un domaine encore en pleine effervescence... ■

articles

- **C. KANE et J. MOORE,** ***Topological insulators*****, in** ***Physics World*****, vol.24, pp. 32-36, 2011.**
- **P. ROUSHAN** ***et al.*****,** ***Topological surface states protected from backscattering by chiral spin texture*****, in** ***Nature*****, vol. 460, pp. 1106-1109, 2009.**
- **D. HSIEH** ***et al.*****,** ***A tunable topological insulator in the spin helical Dirac transport regime*****, in** ***Nature*****, vol. 460, pp. 1101-1105, 2009.**
- **C. KANE,** ***Topological insulator : an insulator with a twist*****, in** ***Nature*****, vol. 4, pp. 348-349, 2008.**
- **L. FU et C. KANE,** ***Superconducting proximity effect and Majorana fermions at the surface of a topological insulator*****, in** ***Phys. Rev. Lett.*****, vol. 100, 096407, 2008.**
- **C. KANE et E. MELE,** ***Quantum spin Hall effect in graphene*****, in** ***Phys. Rev. Lett.*****, vol. 95, 226801, 2005.**