

> formées par des électrons absents dans certains matériaux (métaux ou semi-conducteurs). Un électron (de charge négative) et un trou (de charge positive) fortement liés constituent un exciton. Le système formé par un exciton interagissant fortement avec un photon est nommé exciton-polariton. Et des excitons-polaritons peuvent interagir les uns avec les autres *via* leur partie électronique.

En 2010, l'équipe d'Alberto Bramati, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, a réussi à produire un superfluide d'excitons-polaritons à basse température. Puis, en 2017, Daniele Sanvitto, du laboratoire CNR Nanotec, à Lecce, en Italie, et ses collègues ont obtenu ce comportement à température ambiante. L'inconvénient de ces superfluides de lumière est qu'ils nécessitent beaucoup d'énergie pour créer un fluide de haute densité, ce qui rend leur utilisation pratique peu envisageable et pertinente.

LA TOPOLOGIE AU SECOURS DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

Pour les physiciens, les travaux sur les superfluides ont aussi été l'occasion de s'initier aux concepts de la topologie et de généraliser leur utilisation dans l'étude de la matière condensée. La topologie est la branche des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques globales d'un objet que l'on peut déformer à volonté (sans le déchirer ou en recoller des parties). Dans ce genre de transformations, les distances ou les angles ne sont pas préservés. En revanche, d'autres quantités sont conservées, comme le nombre de trous à travers une surface. Ainsi, un tore peut être transformé en tasse et le trou du premier devient l'anse de la seconde. Avec des déformations continues, il est impossible de faire disparaître le trou ou d'en créer un deuxième.

Les physiciens et les mathématiciens ont noté une analogie fondamentale entre les propriétés topologiques et le fait que les caractéristiques d'un superfluide, comme sa viscosité nulle, résultent d'un comportement global et non défini localement (comme le serait l'angle obtenu à l'intersection de deux droites). Il est ainsi possible de définir des invariants topologiques dans des systèmes physiques. Les outils de la topologie ont dès lors été utilisés pour mieux comprendre la matière.

Par exemple, on observe expérimentalement des vortex (des tourbillons de matière) au sein des superfluides, phénomène qui avait été prévu en 1947 par Lars Onsager, chercheur d'origine norvégienne. Ces excitations ont un moment cinétique quantifié, c'est-à-dire que la vitesse de rotation du fluide autour de l'axe du vortex ne peut prendre que certaines valeurs. On retrouve cette idée en topologie avec le nombre d'enroulements (qui définit combien de fois une courbe enlace un objet). Et si l'on regarde la fonction d'onde du superfluide, c'est-à-dire l'objet

mathématique qui décrit le comportement quantique du superfluide, on constate qu'elle s'annule au centre du vortex. Conséquence: une fois qu'un vortex est créé, il ne peut pas être éliminé par une déformation continue de la fonction d'onde, de la même façon que le trou de la tasse. On parle alors de défauts topologiques.

Ces observations sont plus que des analogies: il est possible d'utiliser les outils de la topologie pour décrire efficacement des superfluides, mais aussi des supraconducteurs (matériaux où le courant électrique circule sans résistance). Ces dernières décennies, la topologie a aussi été fondamentale pour l'étude et la compréhension des «isolants topologiques». Ces nouveaux matériaux se comportent comme des isolants électriques dans leur volume, mais comme des conducteurs sur leurs bords et la circulation des électrons n'y est possible que selon une unique direction.

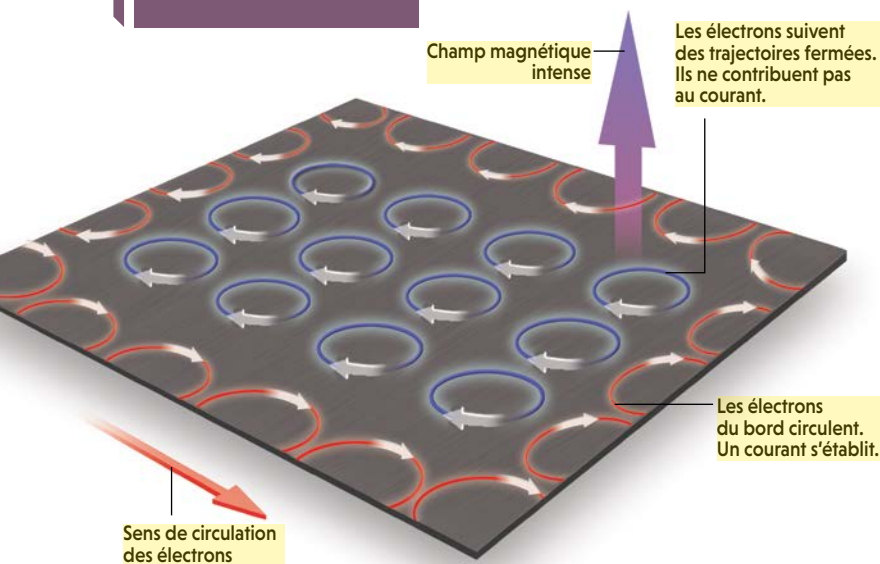
Les isolants topologiques présentent aussi des «vortex», mais d'un type particulier. Ces vortex ne sont pas des tourbillons de matière comme précédemment. Ils sont associés à la fonction d'onde d'une particule de l'isolant dans l'espace réciproque des impulsions, un espace abstrait plus approprié pour décrire des ondes que l'espace tridimensionnel ordinaire. Dans l'espace réciproque des impulsions, un objet, ici la fonction d'onde, n'est pas représenté en fonction des coordonnées d'espace et de temps, mais en fonction de son énergie et de son impulsion ou vecteur d'onde (qui indique la direction de propagation de l'onde et est inversement proportionnel à sa longueur d'onde). Les vortex des isolants topologiques sont caractérisés par un invariant topologique quantifié, le «nombre de Chern», assez similaire au nombre d'enroulements des vortex d'un superfluide.

Historiquement, Klaus von Klitzing, alors au Laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, a identifié les premiers isolants topologiques en 1980, en mettant en évidence l'effet Hall quantique. Il a été récompensé par le prix Nobel en 1985 pour cette découverte. L'effet est

Grâce à la protection topologique, le courant circule malgré la présence d'impuretés

L'EFFET HALL QUANTIQUE

En 1879, le physicien américain Edwin Hall a découvert la version classique de l'effet qui porte son nom. Il a appliqué un champ électrique au matériau conducteur afin de faire circuler ses électrons, tandis que le dispositif était placé dans un champ magnétique perpendiculaire. Ce dernier exerce sur les électrons une force dite de Lorentz, qui les dévie



dans la direction orthogonale aux deux champs. Cela donne naissance à un courant et une tension électrique transverse, dont la résistance associée, dite de Hall, est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

En 1980, Klaus von Klitzing, au Laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, a repris cette expérience dans des conditions particulières : le matériau, très mince et donc quasi bidimensionnel, est refroidi à une température proche du zéro absolu et soumis à un champ magnétique intense. Il a remarqué que la résistance de Hall est quantifiée : elle augmente par paliers quand on augmente l'intensité du champ magnétique. En effet, lorsque le champ magnétique est assez intense, la trajectoire des électrons se courbe assez pour se refermer. Ils sont donc localisés et ne participent pas à la conduction électrique. Ces états électroniques sont appelés « niveaux de Landau » et leur énergie est quantifiée. En revanche, les électrons du bord forment des demi-orbitales et peuvent se déplacer dans une unique direction de propagation définie par l'orientation du champ magnétique.

L'aspect remarquable de cette découverte est que la conductivité de ces états de bord est rigoureusement quantifiée et proportionnelle à un nombre (un invariant topologique), qui dépend de l'état des électrons au sein du matériau bidimensionnel et non sur le bord. Les propriétés de ce courant ont donc un caractère global. Il est alors topologiquement protégé : une impureté n'empêche pas sa circulation.

observé en partant d'un matériau semi-conducteur très plat et considéré bidimensionnel, soumis à un champ magnétique orthogonal qui impose une trajectoire courbée aux électrons. À l'intérieur du matériau 2D, les électrons sont piégés dans des trajectoires circulaires et ne contribuent pas à l'établissement d'un courant : le matériau est isolant. En revanche, sur les bords, le champ magnétique amène les électrons à suivre le bord selon un sens imposé par l'orientation du champ magnétique : le matériau est conducteur (voir l'encadré ci-dessus).

ISOLANT EN VOLUME, CONDUCTEUR EN SURFACE

On a d'abord cru que ce phénomène d'isolant en volume, mais conducteur sur les bords, était intimement associé à cette configuration particulière des trajectoires fermées pour les électrons de l'effet Hall quantique. Mais en 1988, le chercheur britannique Duncan Haldane, Prix Nobel de physique en 2016, a démontré que ce phénomène était beaucoup plus général.

Mais pourquoi tel matériau est-il conducteur, isolant ou isolant topologique ? Pour le comprendre, il faut évoquer la théorie des bandes. Dans un atome isolé, les électrons, vus comme des ondes, n'accèdent qu'à des énergies particulières, discrètes, déterminées par la

physique quantique. Dans un matériau doté d'un réseau cristallin, ces ondes interfèrent et les énergies accessibles aux électrons s'étendent à des intervalles continus, ou bandes, séparées par des domaines de valeurs d'énergie interdites aux électrons, domaines nommés bandes interdites ou « gaps ». Selon le remplissage des bandes par les électrons et la disposition des bandes, le matériau est conducteur, isolant ou semi-conducteur (voir l'encadré page 66).

À partir des années 1980, les physiciens ont constaté que le spectre d'énergie des bandes était insuffisant pour décrire tous les aspects de la conductivité, et notamment le cas des isolants topologiques. Ils ont compris que la structure des fonctions d'ondes associées aux électrons avait aussi son importance.

L'aspect topologique émerge quand on considère une grandeur, la courbure de Berry, associée à la fonction d'onde qui décrit un électron dans une bande. Le Britannique Michael Berry a introduit cette notion en 1984 pour décrire certains phénomènes quantiques. Elle est mathématiquement analogue à un champ magnétique. Or, quand on intègre la courbure de Berry sur l'ensemble des électrons dans une bande complète, on obtient une quantité que le mathématicien sino-américain Shiing-Shen Chern avait étudiée dans les ➤