

> 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

