

Depuis les années 1970, la société est entrée dans une «ère de l'information» où les technologies jouent un rôle crucial pour diffuser et traiter de grandes quantités de données (du texte, des images, des vidéos, du son, etc.). Ainsi, alors qu'en 1986 les capacités d'échange d'information par les réseaux de télécommunication à travers la planète étaient de 2,2 exabits par an (1 exabit correspond à 10^{18} bits), elles sont passées à 520 exabits par an en 2007 et elles continuent de croître à grande vitesse.

Cependant, les techniques actuelles de transport et de traitement de l'information se rapprochent de leurs limites. Comment alors répondre à la demande toujours croissante? Une piste repose sur les systèmes optiques, mais des obstacles limitent encore leurs performances. Un domaine de recherche récent, la photonique topologique, pourrait résoudre certaines de ces difficultés. Il s'inspire d'outils mathématiques pour développer de nouvelles approches et des innovations prometteuses.

Les techniques actuelles de transport de l'information s'appuient sur deux inventions du XIX^e siècle: la radio, inventée par l'Italien Guglielmo Marconi en 1894, et le télégraphe, breveté par l'Américain Samuel Morse en 1840.

La première repose sur la maîtrise des ondes électromagnétiques et a permis de transporter des informations de la façon la plus rapide qui soit: à la vitesse de la lumière. On a alors utilisé des ondes hertziennes, émises et détectées *via* des antennes où circulent des courants électriques alternatifs. Grâce à différents progrès techniques, ces antennes ont été miniaturisées: avec une taille de l'ordre du centimètre, elles émettent à des fréquences plus élevées, dans le domaine du gigahertz. Elles équipent aujourd'hui nos téléphones portables et les bornes wifi. Si le débit de transfert d'informations atteint 100 mégabits par seconde, la distance de propagation de ces ondes est limitée à quelques centaines de mètres.

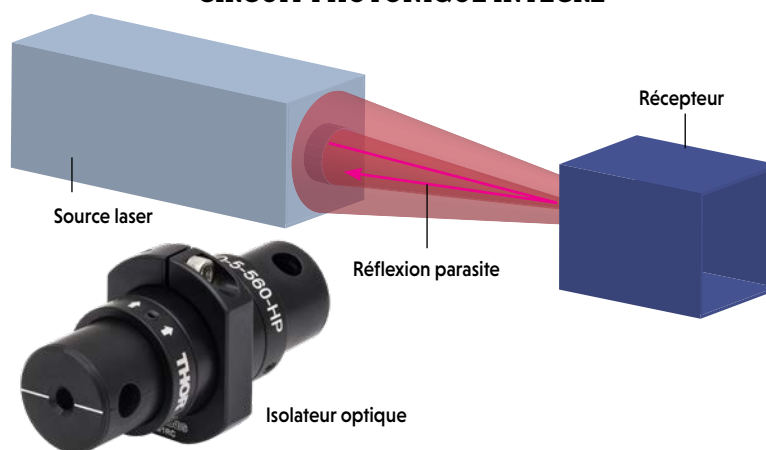
LA RÉVOLUTION DU LASER

Le télégraphe est fondé sur le transport d'un signal électrique par des câbles conducteurs tels que ceux utilisés aujourd'hui par le réseau téléphonique. Au cours des décennies 1960 et 1970, plusieurs découvertes dans le domaine de la photonique ont révolutionné cette technique en la transposant à la lumière. Un laser crée un intense faisceau de lumière dont les modulations portent l'information, lumière que guident et acheminent des fibres optiques, à des longueurs d'onde dites télécoms (environ 1,5 micromètre), sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Ces fibres peuvent être mises en parallèle, et

chacune a un débit pouvant atteindre 100 gigabits par seconde, au moins 1000 fois supérieur au transport par ondes dans l'air et au transport électrique par câble.

Si le transport de l'information est un enjeu majeur, son traitement en est un autre tout aussi important. La méthode la plus efficace pour manipuler les données, codées sous forme binaire, repose sur l'utilisation de transistors électriques. Ces dispositifs sont des sortes d'interrupteurs dont la conductivité est commandée par une tension électrique. En réalisant un circuit composé d'un grand nombre de ces

CIRCUIT PHOTONIQUE INTÉGRÉ



interrupteurs, on obtient un processeur logique: un ordinateur. La capacité de calcul, et donc de traitement de l'information, est donnée par le nombre de transistors que l'on peut intégrer à un processeur et la fréquence de cadencage, c'est-à-dire la vitesse à laquelle le système est capable de manipuler des données. Les premiers ordinateurs fabriqués avant la Seconde Guerre mondiale utilisaient des interrupteurs mécaniques. Puis des composants purement électriques, des tubes à vide, ont été utilisés. Comme ces interrupteurs n'étaient pas petits, il était impossible d'en rassembler plus de quelques dizaines de milliers.

La véritable révolution est venue avec l'utilisation de transistors constitués de matériaux dits semi-conducteurs qui ont permis une miniaturisation extrême (jusqu'à 10 nanomètres). Des milliards de ces transistors sont aujourd'hui intégrés sur un seul processeur. On peut faire fonctionner en parallèle des milliers de ces processeurs, comme c'est le cas dans les cartes graphiques. La fréquence de cadencage atteint quelques gigahertz (quelques milliards de bits par seconde), mais cette limite ne sera pas dépassée: les perspectives de progrès dans le cadre de la technologie actuelle sont faibles, alors que les besoins en calculs du monde moderne augmentent de façon exponentielle.

Des approches et des concepts nouveaux sont à l'étude, par exemple l'informatique

Dans un circuit photonique standard, un laser sert de source de lumière qui est transmise à un récepteur ou à une fibre optique. Mais à chaque interface, une partie de la lumière est réfléchie et retourne dans la cavité laser dont elle perturbe le fonctionnement. On peut insérer un isolateur optique à la sortie du laser pour bloquer la lumière parasite. Mais sa taille centimétrique est un obstacle pour la conception de microcircuits photoniques.

quantique. Mais cette approche repose sur des principes de la physique quantique (la superposition des états et l'intrication) qu'il est très difficile d'intégrer dans un dispositif macroscopique. Quelques premiers prototypes ont vu le jour ces dernières années, mais ils ne manipulent qu'un nombre limité de bits quantiques (ou qubits).

DES OBSTACLES SUR LA ROUTE DE LA PHOTONIQUE INTÉGRÉE

Une autre approche, moins radicale, consiste à développer une photonique intégrée où l'information serait transportée et au moins partiellement traitée de façon photonique. On remplacerait alors les électrons des semi-conducteurs par les photons de la lumière. Il serait alors possible d'atteindre des fréquences de cadencage nettement plus élevées, proches du térahertz (1000 gigahertz). La contrepartie est que ces systèmes sont actuellement plus gros et plus gourmands en énergie que ceux constitués de semi-conducteurs. Avant de réaliser un supercalculateur photonique intégré, de nombreux obstacles sont à franchir, l'un des plus importants étant lié à ce qu'on nomme le « caractère réciproque du transport de la lumière ». Cependant, grâce à des idées issues de la topologie, une branche des mathématiques, il est en passe d'être résolu.



Avec la photonique intégrée, les ordinateurs traiteront 1000 fois plus de données par seconde



Lorsqu'une particule se propage dans l'espace libre, toutes les directions de propagation sont équivalentes. Si un photon se propage dans une fibre optique dans un sens et y rencontre un défaut ou une interface avec un capteur, il pourra être rétrodiffusé et se propager dans le sens opposé. Le caractère réciproque du transport de la lumière correspond à cette absence de direction privilégiée de propagation. C'est un problème pour les systèmes photoniques : par exemple, lorsque la lumière produite par un laser est injectée dans une fibre optique, le changement d'indice optique fait qu'une partie de la lumière est réfléchi et retourne dans le laser

dont elle perturbe le fonctionnement (*voir la figure page ci-contre*).

Pour obtenir un transport non réciproque, une solution est d'ajouter une force externe qui impose une direction de mouvement aux particules. Pour les électrons, porteurs d'une charge électrique, on utilise un champ électrique qui oriente leur flux. Rien d'aussi simple n'est envisageable pour les photons, qui sont des particules neutres. Une solution consiste à placer un « isolateur optique » entre le laser et la fibre, composant de taille centimétrique.

De façon générale, ces réflexions parasites, la réciprocity du transport photonique et l'absence d'isolateurs optiques miniaturisés et intégrables sont rédhibitoires pour la réalisation de circuits photoniques intégrés comportant de nombreux composants logiques. Pour les physiciens, le défi est donc de concevoir des systèmes présentant de façon intrinsèque un transport non réciproque de la lumière.

Des phénomènes physiques présentant un tel comportement sont connus depuis longtemps. C'est le cas de la superfluidité, découverte en 1937 par le physicien soviétique Piotr Kapitsa, à savoir la perte de viscosité d'un fluide à très basse température. Les propriétés de ce fluide sont déterminées par des processus quantiques, où l'énergie des interactions des particules est plus élevée que l'énergie cinétique du superfluide en mouvement. Le fluide présente alors un comportement collectif de toutes ses particules, qui inhibe les processus de diffusion à l'origine du désordre dans le milieu. Or, dans un fluide classique, ce désordre dissipe l'énergie du mouvement des particules et est à l'origine de la viscosité du fluide. Ces perturbations étant absentes dans le superfluide, la viscosité est alors nulle. Les molécules du superfluide s'écoulent dans une seule direction, le transport est non réciproque.

LE DÉFI DU TRANSPORT NON RÉCIPROQUE

En principe, il est possible de créer un superfluide de lumière dont le flux est insensible au désordre. Pour ce faire, il faut engendrer une interaction photon-photon assez importante et avoir une forte densité de ces particules. Les lois qui régissent le comportement des particules élémentaires indiquent qu'un photon n'interagit pas directement avec un autre photon. Il est néanmoins possible de satisfaire cette condition en considérant des « excitons-polaritons ».

Il s'agit de quasiparticules, c'est-à-dire des entités abstraites qui décrivent des comportements collectifs de particules et qui ont des propriétés analogues à celles de particules réelles. Parmi les quasiparticules les plus connues, les phonons rendent compte des vibrations dans un matériau, et les trous traduisent des lacunes >

> 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