

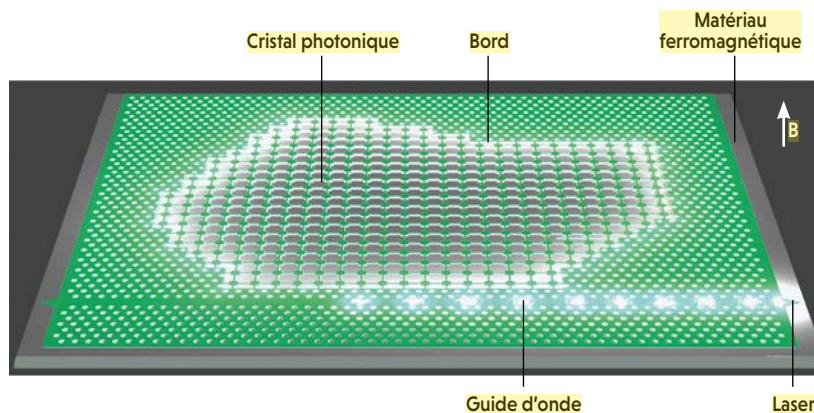
lumière-matière, les excitons-polaritons, dont nous avons déjà évoqué l'intérêt pour constituer un superfluide de lumière. Ici, en raison de leur partie électronique, ces quasi-particules ont une activité magnétique pour des ondes se propageant à des fréquences optiques.

Ainsi, en 2015, notre équipe a montré théoriquement qu'en plaçant ces excitons-polaritons dans un réseau périodique approprié, il était possible d'obtenir un analogue polaritonique de l'effet Hall quantique anormal. L'observation expérimentale de cet effet vient d'être rapportée par le groupe de Sven Höfling, de l'université de Würzburg, en Allemagne. Nous avons aussi montré qu'il était possible d'utiliser cet effet pour réaliser des micro-isolateurs photoniques fonctionnant à des longueurs d'onde optiques, ce qui est un prérequis indispensable à leur utilisation pratique. En garantissant un transport non réciproque, ces micro-isolateurs, placés en série après une diode laser, empêchent la lumière de revenir dans la diode et d'en perturber le fonctionnement. Nous sommes donc en passe de résoudre le problème de la photonique intégrée et de la question du transport non réciproque.

UN LASER INTÉGRÉ

La richesse du domaine nous permet d'aller plus loin encore, avec le développement des lasers topologiques. Notre équipe a proposé cette idée en 2016 : l'effet laser se développerait directement dans un état topologiquement protégé, ce qui permet d'intégrer dans le même composant le laser et l'isolateur. Dès 2017, le groupe de Jacqueline Bloch, au C2N (le Centre de nanosciences et de nanotechnologies, à Palaiseau, près de Paris), a concrétisé cette idée dans des réseaux à une dimension. La même année, Boubacar Kanté, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont fait état d'un laser topologique bidimensionnel, fondé sur l'effet Hall quantique anormal (voir l'image ci-dessus).

Cette démonstration résulte d'un tour de force technique, à savoir obtenir un effet magnétique pour des modes photoniques aux fréquences « télécoms » proches de l'optique. En effet, les semi-conducteurs ont normalement une faible réponse magnétique dans ce domaine de longueurs d'onde. L'équipe de Boubacar Kanté a combiné son réseau bidimensionnel avec un matériau ferromagnétique qui amplifie l'effet d'un champ magnétique appliqué, en permettant aux électrons du semi-conducteur de ressentir une intensité de champ d'une quinzaine de teslas. Ce champ magnétique a permis la formation d'un gap topologique, et l'existence d'un état de bord unidirectionnel autour du cristal photonique. Ce dispositif s'est aussi comporté comme une cavité où l'effet laser s'est développé. Une partie de la lumière était ensuite



En 2017, Boubacar Kanté et son équipe ont mis au point un laser topologique. Sur un matériau ferromagnétique qui amplifie un champ magnétique B , les chercheurs ont gravé un cristal photonique dans un matériau semi-conducteur au bord duquel se développe un mode photonique unidirectionnel. Ce système forme une cavité où l'émission stimulée du laser se développe. Un guide d'onde placé à proximité permet d'extraire la lumière.

extraite en couplant le dispositif à un guide d'onde. Grâce au caractère unidirectionnel du mode topologique du dispositif, une onde rétro-diffusée dans le guide d'onde ne pénètre pas dans la cavité laser. Le dispositif se comporte donc comme un laser suivi d'un isolateur, les deux intégrés dans la même structure.

En 2018, Mordechai Segev, du Technion, en Israël, et ses collègues ont développé un autre type de laser topologique, cette fois fondé sur un analogue de l'effet Hall quantique de spin et l'utilisation d'un réseau de résonateurs couplés similaire à celui considéré par Mohammad Hafezi (voir l'image page 65). Il n'y a cette fois pas besoin de champ magnétique externe, mais il n'y a pas non plus d'unidirectionnalité (puisque l'on a seulement des pseudo-spins et non des spins comme pour les électrons). L'amplification laser se développe dans les deux composantes de spins se propageant chacune dans une direction opposée.

Récemment, notre équipe a proposé de combiner la notion de superfluide et de topologie des bandes d'énergie pour obtenir un nouvel analogue de l'effet Hall quantique de spin. Dans ce cas, le rôle du spin est assuré par le sens de l'enroulement des vortex du superfluide de lumière. Cette quantité étant elle-même topologiquement protégée, la conservation du spin est garantie et le caractère non réciproque du transport topologique est entièrement restauré. Il reste à mettre en œuvre cette idée.

Les développements de ces dernières années sont impressionnants. Grâce à la topologie, nous sommes en mesure d'imaginer une grande variété de solutions théoriques à la question du transport non réciproque, dont certaines ont été réalisées expérimentalement. Ces résultats sont encourageants et l'intérêt de ces systèmes est incontestable. Le développement de micro-isolateurs optiques et leur intégration semblent un objectif à portée de main, ce qui ouvrira la voie aux circuits intégrés optiques de demain. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Bahari et al., **Nonreciprocal lasing in topological cavities of arbitrary geometries**, *Science*, vol. 358, pp. 636-640, 2017.

P. St-Jean et al., **Lasing in topological edge states of a one-dimensional lattice**, *Nature Photonics*, vol. 11, pp. 651-656, 2017.

D. Solnyshkov et al., **Kibble-Zurek mechanism in topologically nontrivial zigzag chains of polariton micropillars**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, 046402, 2016.

A. V. Nalitov et al., **Polariton Z topological insulator**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, 116401, 2015.

F. D. M. Haldane et S. Raghu, **Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, 013904, 2008.

F. D. M. Haldane, **Model for a quantum Hall effect without Landau levels**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 2015-2018, 1988.