

L'optique non linéaire, une véritable alchimie

La mise au point des premiers lasers en 1960 a ouvert la voie au domaine de l'optique non linéaire, où les effets ne sont plus proportionnels aux causes. Sa compréhension intime nécessite de faire appel à la dualité onde-particule de la lumière, afin de décrire les phénomènes de couplage avec la matière qui s'accompagnent de la modification de sa fréquence et de ses propriétés quantiques. Spectroscopie de pointe et information quantique sont les grandes bénéficiaires de ce domaine en pleine expansion. Les défis sont désormais de couvrir au mieux tout le spectre électromagnétique et de disposer d'une ingénierie des nouveaux états quantiques de la lumière.



▲ La station antarctique Concordia est équipée de deux Lidar qui analysent la composition de l'atmosphère en sondant l'absorption de la lumière.



Benoît Boulanger
PHYSICIEN,
UNIVERSITÉ
GRENOBLE ALPES
*Il est chercheur à
l'Institut Néel.*



Riad Haidar
PHYSICIEN, ÉCOLE
POLYTECHNIQUE,
PALAISEAU
*Il est directeur de
recherche à l'Onera.*



Sara Ducci
PHYSICIENNE,
UNIVERSITÉ
DE PARIS
*Elle est chercheuse
au laboratoire MPQ.*



Quand les effets sont proportionnels aux causes, le cadre est celui de la physique dite linéaire. C'est celle que tout professeur commence par enseigner à ses élèves. Elle se décline dans toutes les branches de la physique, dont l'optique. Dans ce domaine, lorsqu'on éclaire un matériau avec de la lumière, la couleur de cette dernière ne change pas. Sauf au-delà d'un certain seuil d'illumination. On entre alors dans le domaine dit « non linéaire », aux applications très nombreuses et que les chercheuses et chercheurs continuent d'explorer.

Pour pouvoir détecter les effets optiques non linéaires, il est nécessaire de disposer d'une forte densité de puissance lumineuse, c'est-à-dire d'une forte concentration de photons (particules élémentaires de la lumière) par unité de temps et de surface. C'est pourquoi il a fallu attendre l'avènement du laser, à partir des années 1960, pour révéler cette nouvelle physique. Le seuil mentionné précédemment est en effet d'environ 1 mégawatt par centimètre carré (MW/cm²) ou 1 million de joules par seconde et par centimètre carré. Or les lasers dont nous disposons aujourd'hui atteignent couramment plusieurs centaines de MW/cm², ce qui rend cette exploration très efficace et prometteuse.

Deux descriptions permettent d'appréhender les mécanismes en jeu dans l'optique non linéaire : l'approche « classique », où la lumière est considérée comme une onde ; l'approche quantique, où son aspect corpusculaire est pris en compte.

Dans la première, lorsqu'on éclaire de la matière – par exemple un cristal – avec un laser intense, le rayonnement électromagnétique de ce dernier se couple avec les électrons du cristal. Ce couplage entre lumière et matière induit un déplacement des électrons, qui crée un rayonnement dont l'amplitude ne varie pas proportionnellement à celle du champ électrique de la lumière excitatrice, d'où le nom d'optique non linéaire. La lumière rayonnée présente alors des caractéristiques différentes de la lumière laser incidente, avec en particulier la création de nouvelles fréquences. L'intensité du phénomène non linéaire dépend en grande partie des propriétés de symétrie et du type de liaisons chimiques de la matière, mais aussi de la capacité de celle-ci à permettre une interférence constructive, appelée « accord de phase », entre la polarisation induite – qui traduit l'excitation de la matière – et la lumière que cette dernière rayonne.

MODIFIER LA FRÉQUENCE ET L'ÉTAT QUANTIQUE DE LA LUMIÈRE

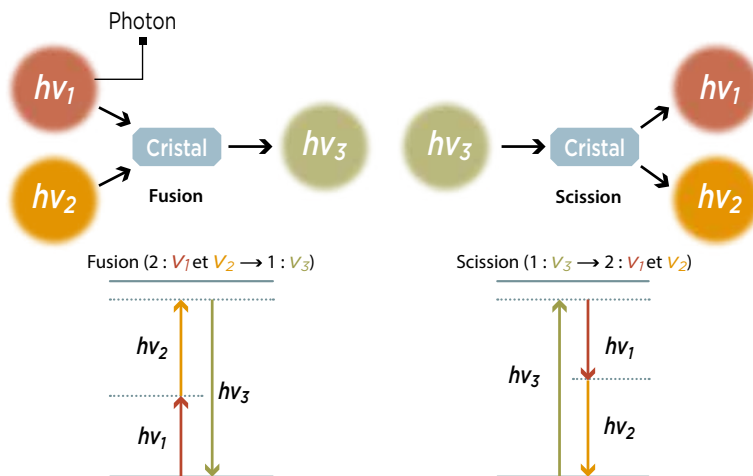
À cette description ondulatoire classique correspondent des processus de fusion ou de scission de photons dans l'approche quantique. Ainsi, deux photons peuvent fusionner en un seul (processus $2 \rightarrow 1$) quand ceux-ci illuminent un milieu non linéaire. À l'inverse, un seul photon arrivant sur un milieu non linéaire peut se scinder en deux nouveaux photons (processus $1 \rightarrow 2$). L'énergie se conservant – comme dans tout processus de physique –, la fréquence du photon incident est alors la somme des fréquences des photons créés (et l'inverse pour la fusion) (voir figure p. 48). Ainsi, ces phénomènes quantiques permettent de modifier

la fréquence de la lumière pour atteindre de nouveaux régimes. Par ailleurs, des propriétés quantiques particulières apparaissent lors de ces processus de scission, comme celle dite de l'« intrication » ou de la « compression quantique » : elles sont dues au fait que la paire de photons émis partage une fonction d'onde commune, car chacun est issu du même photon parent. Il existe aussi des processus quantiques à 4 photons ($3 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 3$ et $2 \rightarrow 2$).

Parmi toutes ces configurations, seule la génération de triplets de photons ($1 \rightarrow 3$), prometteuse pour l'information quantique, est encore au stade du laboratoire (1). Toutes les autres sont suffisamment avancées, en particulier la génération de paires de photons ($1 \rightarrow 2$), pour donner lieu à des applications très utiles allant de la création de fréquences différentes – pour le Lidar (*Light detection and ranging*), par exemple – à la génération de paires de photons intriqués pour l'information quantique. Détaillons ces exemples emblématiques.

1 SPECTROSCOPIE PAR LIDAR

Le Lidar fut l'un des premiers instruments à tirer parti de l'interaction non linéaire entre lumière et matière. Dans ce système opto-électronique, une onde mère issue d'un laser est envoyée sur un cristal non linéaire (par exemple, du phosphate de titanyle et de potassium), ce qui engendre deux ondes filles dont les fréquences sont accordables à la demande. Les premiers systèmes, nommés « oscillateurs paramétriques optiques » (OPO), ont été mis au point dans les années 1960. Mais il a fallu attendre les années 1980 pour parvenir à réaliser des instruments opérationnels. Aujourd'hui, l'enjeu réside dans la miniaturisation de ces sources non linéaires. Les OPO, au cœur des Lidar spectroscopiques, sont ainsi des outils remarquables pour la détection des polluants atmosphériques et des gaz à effet de serre, par exemple. Comme tous les éléments chimiques, ces derniers absorbent en effet la lumière à des fréquences précises, ce qui constitue leur signature. Or il est extrêmement difficile, voire impossible dans de nombreux cas, de fabriquer un laser capable d'émettre exac-



tement la fréquence adaptée pour la détection d'un polluant ou d'un gaz donné. Grâce à leur large plage de fréquences, les OPO permettent d'analyser efficacement la composition de l'atmosphère, en sondant à distance l'absorption de la lumière (2). Mieux encore, en associant analyse des gaz et mesure de distance ou de vitesse, qui sont d'autres applications des Lidar, ces instruments permettent de cartographier en 3D et en temps réel des paramètres de l'atmosphère, et ce aussi bien à partir du sol que de l'espace (grâce à des versions embarquées). Ce qui ouvre un vaste champ d'exploration pour les enjeux environnementaux.

2 TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Du côté quantique, l'exploitation du processus $1 \rightarrow 2$ est un moyen fantastique pour engendrer des paires de photons présentant des corrélations. Il s'agit de corrélations entre un ou plusieurs paramètres décrivant leur état (fréquence, direction de propagation, polarisation...). C'est ce que l'on nomme « intrication », un des aspects les plus surprenants de la physique quantique : quand deux photons sont intriqués, une mesure effectuée sur l'un permet de connaître instantanément les propriétés de l'autre, quelle que soit la distance les séparant. Après avoir suscité des débats enflammés parmi les fondateurs de la mécanique quantique, cette propriété a été démontrée dans plusieurs types de systèmes (lire p. 20). Elle constitue aujourd'hui l'une des

UNE ÉNERGIE CONSERVÉE

Lorsque deux photons fusionnent ou, au contraire, lorsqu'un photon se scinde, l'énergie est conservée. Cette conservation s'écrit $h\nu_1 + h\nu_2 = h\nu_3$, où ($h\nu_1, h\nu_2, h\nu_3$) sont les quanta d'énergie des photons mis en jeu, h la constante de Planck et (ν_1, ν_2, ν_3) les fréquences. Les traits horizontaux pleins et en pointillé correspondent aux niveaux d'énergie respectivement de la matière et du champ électromagnétique.

ressources fondamentales dans le domaine des technologies quantiques, un champ de recherche en pleine croissance impliquant physiciens, informaticiens, ingénieurs et chimistes autour d'applications comme le calcul, les communications ou la métrologie. L'utilisation de photons intriqués permet ainsi, par exemple, de garantir la sécurité de canaux de communication (cryptographie quantique), d'accélérer la vitesse de calcul par rapport aux ordinateurs actuels, ou d'améliorer la précision de mesure de certains systèmes par rapport aux techniques classiques.

DES DISPOSITIFS PHOTONIQUES QUANTIQUES EN SÉRIE

L'optique non linéaire est également en bonne position pour relever l'un des enjeux majeurs pour une large diffusion des technologies quantiques : la mise au point de dispositifs photoniques miniaturisés, robustes, simples d'utilisation et pouvant être fabriqués de façon industrielle. Ainsi, au cours de ces dernières années, une grande variété de sources intégrant de photons intriqués a été réalisée en utilisant différents types de matériaux à propriétés optiques non linéaires. Parmi eux, les semi-conducteurs – déjà à la base des technologies de communication et de calcul actuelles – sont des systèmes idéaux pour la miniaturisation et l'intégration de plusieurs composants quantiques sur une même puce (3).

Un autre aspect de ces recherches consiste à parvenir à obtenir le processus $1 \rightarrow 3$ par ces méthodes non linéaires, seule configuration qui demeure pour l'instant du domaine du laboratoire. Le défi est de trouver des stratégies permettant d'augmenter l'efficacité du processus, ce qui permettrait de démultiplier de plusieurs ordres de grandeur les capacités de calcul quantique par rapport à l'utilisation du processus $1 \rightarrow 2$. Et ce grâce à un nouveau protocole dans lequel l'un des trois photons du triplet, en déclenchant un détecteur, viendrait annoncer l'arrivée des deux autres photons. Nous avons bon espoir d'y parvenir à grande échelle d'ici quelques années (4). ■

(1) E. A. Rojas Gonzalez *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 120, 043601, 2018.

(2) E. Cadiou *et al.*, *Opt. Lett.*, 42, 4044, 2017.

(3) A. Orioux *et al.*, *Rep. Prog. Phys.*, 80, 076001, 2017.

(4) A. Vernay *et al.*, *Opt. Express*, 29, 22266, 2021.

Lumière quantique et détection des ondes gravitationnelles

Des interféromètres optiques décèlent les oscillations de l'espace-temps malgré les fluctuations quantiques de la lumière.

Les ondes gravitationnelles, ces infimes vibrations de l'espace-temps issues, par exemple, de la fusion de trous noirs qui se produisent à des milliards d'années-lumière de nous, peuvent désormais être détectées sur Terre. Cet exploit a été rendu possible grâce à des interféromètres optiques extrêmement sensibles. Leur fonctionnement est le suivant : de la lumière laser circule dans deux tubes à vide selon deux directions orthogonales, puis le faisceau est recombinaison après de multiples allers-retours entre des miroirs. Les ondes gravitationnelles sont alors détectées en observant des différences de parcours entre les deux faisceaux, ce que l'on peut voir par interférométrie. La stabilité et la forte puissance du laser utilisé, associées à la qualité et à l'isolation des miroirs dont on mesure la position, permettent d'atteindre cette sensibilité. La limitation est désormais due aux fluctuations quantiques de la lumière, à la fois à haute fréquence (bruit de phase, au-dessus de 200 hertz [Hz]) et à basse fréquence (bruit d'intensité, au-dessous de 50 Hz). Pour

améliorer encore la sensibilité et augmenter ainsi la portée de la détection de ces événements astrophysiques, les interféromètres Advanced Virgo, en Italie, et Advanced Ligo, aux États-Unis, utilisent de la lumière comprimée par des effets non linéaires : le laser principal de l'interféromètre, à la fréquence ν_0 , est utilisé pour créer de la lumière à $2\nu_0$ (processus $2 \rightarrow 1$, lire p. 47), elle-même utilisée pour créer deux photons (processus $1 \rightarrow 2$) à $\nu_0 - f$ et $\nu_0 + f$.

Les corrélations entre ces deux photons émis simultanément diminuent alors le bruit quantique de la lumière à la fréquence f de détection de l'onde gravitationnelle. Cette technique a déjà permis de diminuer le bruit de moitié à haute fréquence (1). Des améliorations en cours permettent d'espérer réduire encore ce bruit d'un facteur 4 à l'horizon 2024. Les prochaines campagnes d'observations par ces instruments devraient ainsi apporter une moisson de nouvelles découvertes d'ondes gravitationnelles! ■

(1) Collaboration Virgo, *Phys. Rev. Lett.*, 123, 231108, 2019.



Pierre-François Cohadon
PHYSICIEN, ÉCOLE NORMALE
SUPÉRIEURE, PARIS

Il est maître de conférences à l'École normale supérieure et chercheur au laboratoire Kastler Brossel.