

ÉTATS ORIGINAUX DE LA LUMIÈRE PAR STRUCTURATION 3D DE L'ÉMISSION D'UN LASER À MÉTASURFACE

**Nathan VIGNE¹, Baptiste CHOMET¹, Alaeddine ABBES¹, Mohamed SEGHILANI¹, Stéphane BLIN¹,
Mikhael MYARA¹, Grégoire BEAUDOIN², Luc LEGRATIET², Konstantinos PANTZAS², Isabelle SAGNES²,
Philippe LALANNE³, Stéphane DENET⁴, Arnaud GARNACHE^{1*}**

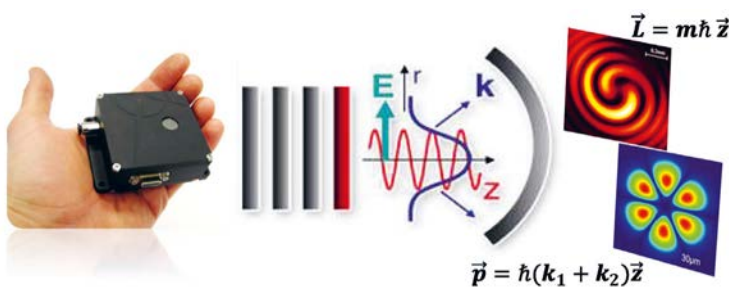
¹IES CNRS, Univ. Montpellier, France

²C2N CNRS/UPSaclay, Palaiseau, France

³LP2N CNRS, IOGS Bordeaux, France

⁴INNOPTICS, Talence, France

*arnaud.garnache@ies.univ-montp2.fr



La génération d'états de photon cohérents puissants dans le proche-IR et THz, présentant une structuration 3D spatio-temporelle, représente un défi physique et technologique. Elle est d'intérêt pour les applications : pinces optiques, capteurs, microscopie,

LIDAR, télécoms, spectroscopie... Ces états originaux sont ici générés en exploitant les nanotechnologies à semi-conducteur III-V et les lasers à cavité externe verticale intégrant une métasurface : lumière VORTEX, bi-fréquences pour le THz, ou sans mode.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110946>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

LASER À SEMI-CONDUCTEUR III-V À ÉMISSION VERTICALE POUR LE CONTRÔLE ET LA STRUCTURATION 3D DE LA LUMIÈRE

La génération laser directe d'états de photon cohérents puissants dans le spectre proche-IR au THz présentant une structuration 3D spatio-temporelle et de l'état de polarisation du champ, représente un défi physique et technologique pour une émission sans élément externe délétère. De telles sources

photoniques à capacité d'intégration couvrent un large panel d'intérêt fondamental et applicatif sociétal : pinces optiques pour la bio-physique, capteurs de vitesse de co-dimension 2D, microscopie sub-diffraction, LIDAR, télécoms, spectroscopie, spintronic, physique quantique... Ces états originaux sont ici générés en exploitant les micro-lasers à cavité externe à émission verticale (VECSEL) basés sur les nanotechnologies et l'épitaxie de semi-conducteurs III-V développées

au C2N RENATECH [1], intégrant une métasurface perturbatrice des fonctions d'onde propres $\vec{\Psi}(\vec{r}, t)$ d'une cavité optique à fort $Q \gg 10^6$ et brisant la symétrie-PT. Cette technologie tire avantage à la fois du concept du laser à l'état solide en terme de cohérence et puissance, et du laser à semi-conducteur à puits quantiques offrant la flexibilité en longueur d'onde, l'intégration et l'ingénierie de l'interaction lumière matière pour son contrôle et son accordabilité.

**ÉTATS COHÉRENTS
ORIGINAUX DE LA LUMIÈRE
CONTRÔLÉE SPATIALEMENT
ET TEMPORELLEMENT**

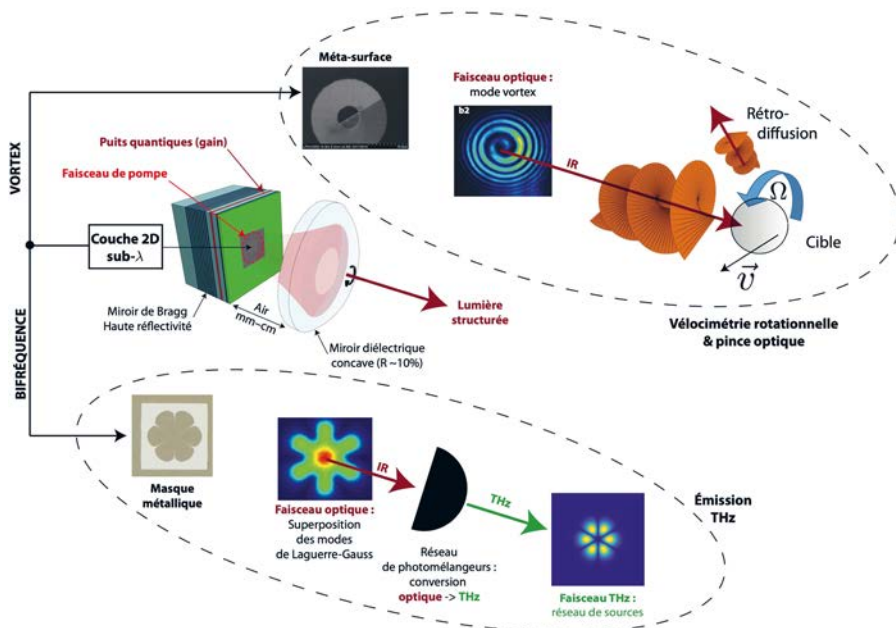
Émission laser stable simultanée de deux modes transverses LG à deux fréquences d'espacement THz

Nous abordons ici la génération laser structurée par deux fonctions d'onde transverses et longitudinales non dégénérées générant un battement temporel THz stable de la porteuse optique sinusoïdale continue (Fig.1). L'utilisation de deux longueurs d'ondes optiques simultanées est d'intérêt pour les applications utilisant des lidars, pour lever les incertitudes des mesures de distances pour les véhicules autonomes, ou encore pour le contrôle environnemental et l'étude de l'atmosphère par spectroscopie d'absorption différentielle. Une autre application clef est la transposition de fréquences par photo-mélange des deux fréquences *via* une photodiode, un photo-conducteur, un cristal non linéaire ou tout autre composant répondant non-linéairement au champ

électrique incident. Selon le principe du battement, le mélange de faisceaux de fréquences différentes dans un composant ou un milieu non linéaire permet la génération d'un signal à la différence de fréquence. Cette technique est d'intérêt en particulier dans le domaine des communications en espace libre, et particulièrement pour les problématiques radio-sur-fibre, car elle permet de transposer des signaux optiques en signaux hyperfréquences. Pour des différences de fréquences émergeant dans la gamme térahertz (100 GHz – 30 THz), cette approche photonique permet de répondre au besoin persistant de sources térahertz pratiques et agiles. L'intérêt d'utiliser un laser unique émettant sur deux fréquences, est de limiter la transposition du bruit de fréquence du laser à la fréquence terahertz, dès lors qu'une part de ce bruit de fréquence est commune aux deux modes lasers.

L'obtention d'une émission laser cohérente stable à deux fréquences d'écart spectral GHz-THz au sein d'une même cavité laser est délicate à ●●●

Figure 1. Concept et technologie intégrée d'une source photonique à états cohérents de photons originaux. Micro-laser à émission verticale à cavité externe à nanotechnologies à semiconducteur III-V. Contrôle spatio-temporel 3D+1 de l'émission laser structurée et polarisée par une métasurface diélectrique et un masque métallique sub-longueur d'onde anisotropes. Émissions cohérentes puissantes accordables : VORTEX à moments linéaire et rotationnelle; fonction bi-fréquences et conversion THz cohérente accordable.



L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



OPTIQUES LASER d'Edmund Optics®

Edmund Optics® propose une large gamme de composants optiques parfaits pour les applications laser.

- ✓ **Métrologie de pointe pour une conformité rigoureuse aux spécifications**
- ✓ **Composants standard prêts à l'envoi et élargissement continu du portefeuille**
- ✓ **Conception et fabrication personnalisées jusqu'à la production en série**
- ✓ **Partenaires innovants dans le domaine des technologies LIDT haut de gamme**

Pour en savoir plus sur les optiques laser d'EO, rendez-vous sur:

www.edmundoptics.fr/LO



+33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.fr

stabiliser, contrairement à une émission laser bicolore formée par deux transitions indépendantes avec un écart grand devant l'énergie thermique kT . Lorsque des milieux à gain inhomogène sont utilisés, le manque de sélection par le gain permet généralement l'émission d'un grand nombre de modes longitudinaux. Pour des milieux à gain homogène tel qu'étudié ici, et en l'absence de phénomènes non-linéaires (« *spatial-hole burning* », mélange à quatre ondes, etc.), le laser tend généralement à ne fonctionner que sur le mode le plus fort, par compétition modale dans le milieu à gain. Ainsi, l'obtention d'une émission cohérente bi-fréquence consiste généralement à séparer spatialement les modes dans la cavité laser, en utilisant deux modes de polarisation, deux modes longitudinaux ou transverses. Cette dernière approche offre une solution intéressante car compacte et robuste physiquement [2]. Le rayonnement laser émet deux ondes co-propagatives avec un moment linéaire total $\vec{p} = \hbar(k_1 + k_2)\vec{z}$, $k_i = 2\pi/\lambda_i$ les vecteurs d'onde paraxiaux du faisceau (vecteur de Poynting), et un spectre bi-énergies (bi-fréquences) $E_{1,2} = \hbar k_{1,2}$. Dans une cavité optique à miroirs sphériques à symétrie de révolution, le champ électromagnétique peut se décomposer

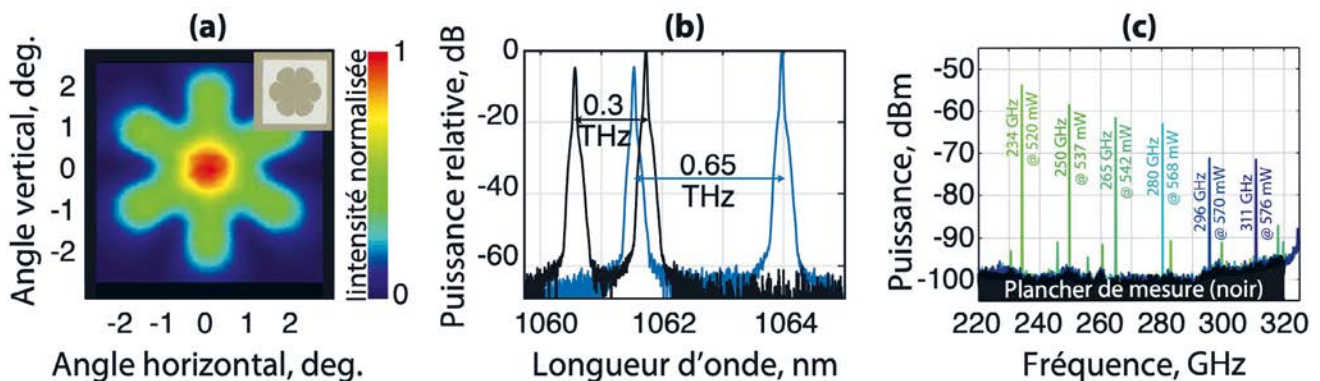
sur une base propre de fonctions d'onde transverses Laguerre-Gauss (LG), et sinusoïdales longitudinalement (« peigne de fréquences »). Il est possible de ne sélectionner que deux modes transverses à l'aide d'un masque de pertes métalliques d'épaisseur nanométrique, de forme transverse complémentaire à la somme de l'intensité des modes choisis. En sélectionnant le mode fondamental Gaussien (LG00) et un mode dégénéré d'ordre supérieur présentant un nœud du champ au centre (LG0 m), la diminution de la corrélation spatiale transverse permet de réduire la dynamique de compétition modale pour atteindre un régime stationnaire bi-modes simultanés, en conservant une aire de battement exploitable $>10\%$. La figure 2(a) montre le faisceau transverse en sortie du laser permettant la sélection des modes LG00 & LG02 dégénéré. Grâce au gradient de pompage radial, le mode fondamental (lobe central) et le mode d'ordre supérieur (lobes périphériques) ne fonctionnent pas à la même température, donc à des fréquences différentes, offrant ainsi la possibilité d'accorder la différence de fréquence par le pompage optique (Fig. 2(b)). Enfin, la simultanéité des deux ondes est confirmée par la génération de la fréquence de battement grâce

à l'excitation d'une photodiode rapide connectée à une antenne THz. Les spectres THz obtenus pour différents pompages sont présentés figure 2(c), montrant l'accordabilité de l'onde THz cohérente (50–900 GHz démontrés). La cohérence du signal THz montre un spectre de bruit de fréquence de quatre ordres de grandeurs plus faibles que le spectre de bruit de fréquence du bruit optique, grâce à la corrélation des sources de bruit au sein du même système.

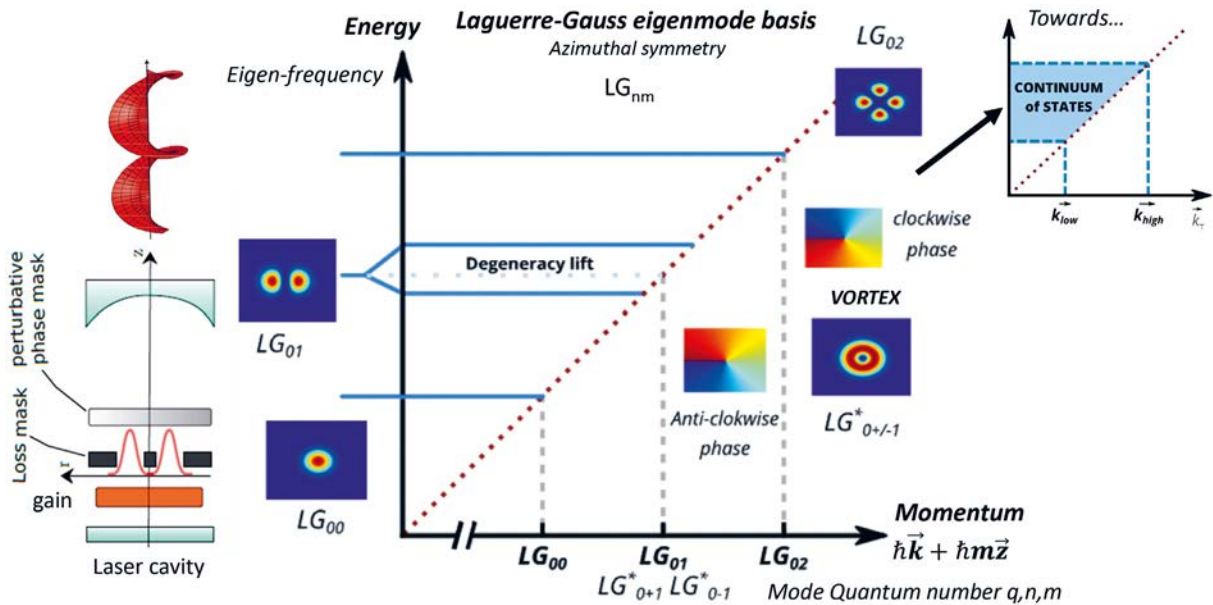
Faisceau Vortex de haute cohérence à moment angulaire orbital contrôlé en charge m et sens \pm

Nous abordons ici la génération laser structurée par une fonction d'onde transverse unique hélicoïdale à singularité de phase et longitudinale sinusoïdale (Fig.1). Cet état de la lumière est l'état Vortex [3], pour lequel la phase évolue de manière azimutale au cours de la propagation. L'état de photon porte alors un moment angulaire orbital $\vec{L} = \hbar m \vec{z}$, de charge m entière relative, en plus du moment linéaire $\vec{p} = \hbar k \vec{z}$, $k = 2\pi/\lambda$ le vecteur d'onde longitudinal du faisceau paraxial (flux du vecteur de Poynting). L'émission est ici générée en régime continue monofréquence suivant l'axe fort cristallographique (anisotropie du gain des puits quantiques). Le mode Vortex s'obtient par levée de dégénérescence et brisure de symétrie Parité-Temps des états propres de la base Laguerre-Gauss à symétrie de révolution de charge identique $|m\rangle$. Ceci est réalisé ●●●

Figure 2. (a) Contrôle des modes propres transverses Laguerre-Gauss (LG), émis par une cavité laser bi-mode non dégénérée : superposition du mode fondamental et du mode LG03 dégénéré (masque Métallique intégré en encart). (b) Spectre optique de l'émission bi-fréquences à faible pompage (noir) et fort pompage (bleu). (c) Émission THz accordable obtenue par photo-mélange dans une photodiode rapide.



CONTRÔLE DES ÉTATS PROPRES D'UNE CAVITÉ LASER



Concept physique et géométrie d'une source photonique à états cohérents originaux. Exemple de diagramme de dispersion énergies - moments de la cavité laser à haute finesse. Valeurs et états propres à symétrie cylindrique du champ $\vec{E} = \sum_{qnm} A_{qnm}(t) \varphi_{nm}(r, \theta) e^{i\omega_q t - k_q z} \vec{x}$: nombre quantique longitudinal q (ISL) du peigne de fréquence, nombre quantique radial n et azimutal m de la base Laguerre-Gauss perturbée par une couche artificielle de phase et de pertes (méta-surface) pour la levée de dégénérescence et la brisure de symétrie Parité-Temps (ou non) des moments angulaires orbitales $\vec{L} = \hbar m \vec{z}$. φ_{nm} fonctions d'ondes transverses LG. $A(t)$ une enveloppe lentement variable du temps. \vec{x} vecteur propre transverse fort de polarisation du champ de la cavité anisotrope. L'interaction stimulée lumière-matière va sélectionner les modes forts : un ou deux modes d'ordre supérieur nm , un vortex gauche ou droite de charge m . L'encart à droite illustre le concept en cours d'une cavité sans mode présentant un quasi-continuum d'états de cavité (1D suivant (z,t) et/ou 2D suivant r).



**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE
AU SERVICE DE L'INNOVATION**



Hi-Tech Detection Systems

OPTO ÉLECTRONIQUE

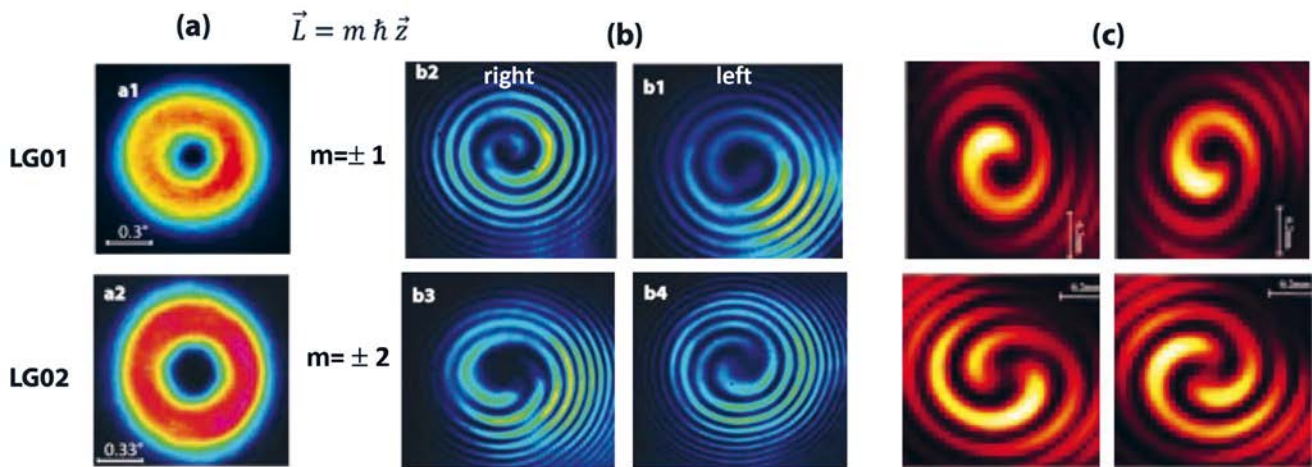
SOLUTIONS SPÉCIFIQUES / PRODUITS STANDARDS /
SERVICE SUR MESURE / POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

EMETTEURS UV-VIS-IR
LEDs et Power LEDs / Sources lumineuses à LED ou Xénon
Diodes lasers / Lampes flash Xénon / Corps noirs miniatures

DÉTECTEURS UV-VIS-IR
Pyrodecteurs / Thermopiles / Imageurs thermiques
Photodiodes PIN et APD / Si, InGaAs / Barettes, quad
SPCM, CPM, Compteurs de photons

APPLICATIONS : INDUSTRIELLES, AÉRONAUTIQUES, GRAND PUBLIC, MÉDICALES, SCIENTIFIQUES, DÉFENSE, AUTOMOBILE

Société HTDS - info@htds.fr - www.htds.fr - Tel : +33 (0)1 64 86 28 28



grâce à une méta-surface perturbatrice non réciproque du moment angulaire orbitale. Ceci permet de différencier les deux modes propres tournant en sens opposé autour de l'axe optique, la compétition modale permettant de ne conserver que la fonction d'onde la plus homogène. Le mode fondamental et les modes d'ordre supérieur non souhaités sont supprimés par diffraction et absorption sur un défaut artificiel. Tel que présenté figure 3(a), le mode obtenu a une allure de « donut », les ondes stationnaires azimutales ne pouvant exister avec un seul mode à symétrie de révolution. L'interférence de ce mode avec une onde plane de référence est présentée figure 3(b), montrant une simple ou double spirale caractéristique du comportement hélicoïdal de la phase du champ vortex, ici contrôlé en charge et sens avec respectivement $m = \pm 1$ et ± 2 .

De tels faisceaux lasers à la limite quantique en terme de cohérence sont d'intérêt pour les applications : microscopie sub-diffraction ; pinces optiques et rhéologie pour appliquer une rotation et une translation à une particule ; vélocimétrie à longue distance pour mesurer par rétrodiffusion des vitesses linéaires et rotationnelles à haute sensibilité et résolution ; physique quantique ; nano-fabrication ; télécoms par multiplexage spatiale DWDM en codant sur les numéros quantiques qnm des modes...

Figure 3. Contrôle des modes propres transverses Laguerre-Gauss, émis par une cavité laser vortex non dégénérée, (a) d'ordre 01/02 de moment angulaire orbital $m = \pm 1/2$. Figure d'interférences des ondes gauche/droite (b) et simulations associées (c).

PERSPECTIVES

Ce concept physique et technologique de composant micro-laser à semi-conducteur III-V permet de générer directement, contrôler et accorder des états de photons originaux structurés spatio-temporellement 3D+1 en polarisation (linéaire, voir circulaire — état de spin), offrant une intégration centimétrique du système (transfert technologique PME INNOPTICS) [4] d'intérêt pour les applications. La génération de faisceaux structurés du type Bessel-Gauss non-diffractant, d'Airy, ou sans mode spatial transverse (continuum) est en cours. Concernant la

structuration temporelle, au-delà du régime à onde continue monofréquence, ces états laser peuvent être obtenus en régime à impulsion courte picoseconde par blocage de modes longitudinaux (peignes de fréquences). Une émission cohérente large bande >100GHz sans mode longitudinal (continuum) a également été démontrée d'intérêt pour la télémétrie-LIDAR [5]. Un projet (INPHYNI) vise à générer des « balles de lumière » [6] décorréliées par localisation spatio-temporellement (solitons), permettant potentiellement un adressage 3D de « bits » de lumière. Pour les sources THz, un projet (IEMN) vise la montée en puissance $\gg \mu\text{W}$ et à structurer spatialement l'émission (« beam steering »).

Remerciements : ANR TAPAS, BLASON, SPATIOTERA ; Réseau national de nanofabrication RENATECH ; ANRT ; SATT A_xLR ; CNRS RENATECH

RÉFÉRENCES

- [1] A. Laurain *et al.*, *Optics Express* **18**, 14627-36 (2010)
- [2] S. Blin *et al.*, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **23**, 1-11 (2017)
- [3] M. Seghilani *et al.*, *Scientific Reports* **6**, 38156 (2016)
- [4] B. Chomet *et al.*, *Applied Optics* **57**, 5224-5229 (2018)
- [5] M. Sellahi *et al.*, *Optics Letters* **40**, 4301-04 (2015)
- [6] P. Camelin, *et al.*, *Optics Letters* **43**, 5367 (2018)