

## Programme et publications COLOQ

Date: Mardi, 03.07.2018	
11:00 - 12:30	O1-C: Session Orale COLOQ #1
Auditorium	
14:00 - 16:00	O2-C: Session Orale COLOQ #2
Auditorium	
Date: Mercredi, 04.07.2018	
17:30 - 19:00	PO-01 B: Session posters COLOQ #1
Salle B19bis	
Date: Jeudi, 05.07.2018	
16:45 - 18:45	PO-02 B: Session posters COLOQ #2
Salle B19bis	
Date: Vendredi, 06.07.2018	
8:30 - 10:30	O7-C: Session Orale COLOQ #3
Auditorium	
11:00 - 12:30	O8-C: Session Orale COLOQ #4
Auditorium	

## **Présentations**

## O1-C: Session Orale COLOQ #1

*Heure:* Mardi, 03.07.2018: 11:00 - 12:30 · *Salle:* Auditorium **11:00 - 11:40** *Invitée* 

## Spectroscopie par peignes de fréquence à deux microns

#### A. Parriaux, K. Hammani, G. Millot

ICB UMR 6303 CNRS/Université Bourgogne Franche-Comté, France; guy.millot@u-bourgogne.fr

Nous démontrons une nouvelle méthode de conversion de deux peignes de fréquence mutuellement cohérents dans une fibre hautement non linéaire. La méthode est basée sur l'instabilité de modulation d'ordre 4 qui permet une conversion de 1,57 µm à 2 µm. Les peignes à deux microns sont utilisés pour la spectroscopie d'absorption du dioxyde de carbone.

## 11:40 - 12:05

Invitée

#### SEMICONDUCTOR SECOND-ORDER NONLINEAR NANOPHOTONICS

#### C. Gigli, G. Marino, V. F. Gili, I. Roland, M. Ravaro, I. Favero, G. Leo

Laboratoire MPQ, Université Paris Diderot & CNRS; giuseppe.leo@univ-paris-diderot.fr

The last years have witnessed a huge progress in dielectric nanophotonics, with a transition from linear and  $\chi^{(3)}$  properties to intrinsically stronger  $\chi^{(2)}$  effects. Here we provide an overview of our contribution to this new research domain, from the demonstration of second harmonic generation in AlGaAs nanoantennas to the most recent developments.

#### 12:05 - 12:30 Invitée

#### MANIPULATION DES INTERACTIONS ENTRE LES PHOTONS ET LES PHONONS DANS LES FIBRES OPTIQUES

## J.-C. Beugnot

FEMTO-ST, France; ic.beugnot@femto-st.fr

La diffusion Brillouin permet de générer des phonons grâce à l'interaction entre deux ondes optiques. Ce phénomène peut être contrôlé en utilisant des guides d'ondes de dimensions micrométriques comme des fibres optiques étirées et ouvre la voie de nouvelles applications dans le domaine de la métrologie et du traitement de l'information.

## O2-C: Session Orale COLOQ #2

*Heure:* Mardi, 03.07.2018: 14:00 - 16:00 · *Salle:* Auditorium **14:00 - 14:40** 

Invitée

## NANOBOB: A CUBESAT MISSION CONCEPT FOR QUANTUM COMMUNICATION EXPERIMENTS IN AN UPLINK CONFIGURATION

## E. Kerstel<sup>1,2</sup>, A. Gardelein<sup>3</sup>, M. Barthelemy<sup>2,4</sup>, C. S. U. G. Team<sup>2</sup>, S. Tanzilli<sup>5</sup>, M. Fink<sup>6</sup>, S. K. Joshi<sup>7</sup>, R. Ursin<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Université Grenoble Alpes, LIPHY, France; <sup>2</sup>Centre Spatial Universitaire de Grenoble, France; <sup>3</sup>Air Liquide Advanced Technologies, Grenoble, France; <sup>4</sup>Université Grenoble Alpes, IPAG, France; <sup>5</sup>Université Cote d'Azur, INPHYNI, France; <sup>6</sup>IQOQI, Austrian Academy of Sciences, Vienna, Austria; <sup>7</sup>University of Bristol, UK; <u>erik.kerstel@univ-grenoble-alpes.fr</u>

A ground-to-space quantum key distribution (QKD) mission concept and the accompanying feasibility study for the development of the low earth orbit CubeSat payload are presented. The versatile space segment is compatible with a multiple of QKD protocols, as well as quantum physics experiments.

## 14:40 - 15:05

Invitée

#### Implémentation optique reconfigurable de réseaux quantiques complexes

V. Parigi<sup>1</sup>, J. Nokkala<sup>2</sup>, F. Arzani<sup>1</sup>, F. Galve<sup>3</sup>, R. Zambrini<sup>3</sup>, S. Maniscalco<sup>2</sup>, J. Piilo<sup>2</sup>, N. Treps<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LKB, France; <sup>2</sup>University of Turku, Finland; <sup>3</sup>IFICS, Spain; <u>valentina.parigi@lkb.upmc.fr</u>

Nous proposons une procédure expérimentale optique pour la réalisation de réseaux complexes quantiques. Nous avons établi une correspondance entre des réseaux quantiques complexes et des processus optiques non linéaires multimodes pompés par des peignes de fréquence suivis d'une détection sélective en mode.

#### 15:05 - 15:30 Invitée

IIIVILEE

#### Comportement contre-intuitif des états triplets de photons en régime de variables continues

## E. A. Rojas Gonzáles<sup>1,2</sup>, A. Borne<sup>3</sup>, B. Boulanger<sup>4</sup>, A. Levenson<sup>1</sup>, <u>K. Bencheikh<sup>1</sup></u>

<sup>1</sup>C2N, France; <sup>2</sup>Department of Engineering Sciences, The Ångström Laboratory, Uppsala University, SE-75121 Uppsala, Sweden; <sup>3</sup>Weizmann Institutes of Science, Rehovot 7610001, Israel; <sup>4</sup>Institut Néel, CNRS/Université Grenoble Alpes, 38402 Grenoble, France; <u>kamel.bencheikh@c2n.upsaclay.fr</u>

Nous donnons dans ce papier une description des propriétés quantiques des triplets de photons générés par un processus non linéaire du troisième ordre dans le régime des variables continues. On s'intéresse aux intrications à trois corps que peuvent présenter les triplets.

## 15:30 - 15:55

Invitée

## Photonique Quantique intégrée sur Silicium

F. Mazeas<sup>1</sup>, D. Oser<sup>2</sup>, C. Alonso-Ramos<sup>2</sup>, X. Le Roux<sup>2</sup>, D. Pérez-Galacho<sup>2</sup>, E. Cassan<sup>2</sup>, D. Marris-Morini<sup>2</sup>, O. Alibart<sup>1</sup>, T. Lunghi<sup>1</sup>, E. Picholle<sup>1</sup>, S. Tanzilli<sup>1</sup>, L. Vivien<sup>2</sup>, <u>L. Labonté<sup>1</sup></u>

<sup>1</sup>Université Côte d'Azur, Institut de Physique de Nice, CNRS, Parc Valrose, 06108 Nice, France; <sup>2</sup>Université Paris Sud, Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, 91405 Orsay, France; <u>laurent.labonte@unice.fr</u>

Nous présentons l'intégration dense de fonctions optiques linéaires et non-linéaires sur un même substrat de silicium permettant la génération, le filtrage et le routage d'états quantiques. Chacune de ces fonctions sera finement qualifiée, que ce soit de manière classique ou de manière quantique.

## PO-01 B: Session posters COLOQ #1

Heure: Mercredi, 04.07.2018: 17:30 - 19:00 · Salle: Salle B19bis

## **COMPRESSION NON-LINEAIRE DANS UNE CELLULE DE GAZ**

L. Lavenu<sup>1,2</sup>, M. Natile<sup>3,4</sup>, F. Guichard<sup>2</sup>, Y. Zaouter<sup>2</sup>, <u>X. Délen<sup>1</sup></u>, M. Hanna<sup>1</sup>, E. Mottay<sup>2</sup>, P. Georges<sup>1</sup> <sup>1</sup>Laboratoire Charles Fabry, Palaiseau; <sup>2</sup>Amplitude Systèmes, Pessac; <sup>3</sup>Amplitude Technologies, Lisses; <sup>4</sup>LIDyL, Gif-sur-Yvette; xavier.delen@institutoptique.fr

Nous démontrons la compression temporelle non-linaire d'une source laser Yb dans une cellule de gaz remplie d'Argon. Les impulsions de 160 µJ 275 fs sont comprimées à 33 fs pour une énergie de sortie de 135 µJ correspondant à une transmission globale de 85%. Cette nouvelle technique de compression temporelle offre de nombreuses perspectives.

#### Production d'impulsions femtosecondes comprimées par génération paramétrique en simple passage T. Kouadou, L. La Volpe, S. De, C. Fabre, V. Parigi, N. Treps

Laboratoire Kastler Brossel, France; tiphaine.kouadou@lkb.upmc.fr

Nous développons une expérience de génération paramétrique en simple passage à partir d'impulsions lumineuses femtosecondes. Elle permet de produire, sur une grande plage de fréquences, de la lumière comprimée (squeezed light) dans plusieurs modes spectraux et temporels.

#### Génération de lumière comprimée multimode dans un micro-résonateur en anneau

#### <u>É. Gouzien<sup>1</sup></u>, V. D'Auria<sup>1</sup>, A. Zavatta<sup>2,3</sup>, M. Kues<sup>4</sup>, C. Reimer<sup>4</sup>, S. Sciara<sup>4</sup>, Y. Zhang<sup>4</sup>, R. Morandotti<sup>4</sup>, L. Labonté<sup>1</sup>, S. Tanzilli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Côte d'Azur, Institut de Physique de Nice (INPHYNI), CNRS UMR 7010, France; <sup>2</sup>LENS and Department of Physics, Universitá di Firenze, Italia; <sup>3</sup>Istituto Nazionale di Ottica (INO-CNR) Largo Enrico Fermi 6, Italia; <sup>4</sup>INRS Énergie, Matériaux et Télécommunications, Varennes, Québec, Canada; elie.gouzien@unice.fr

Nous avons étudié la génération d'états comprimées multimodes de la lumière par un micro-résonateur gravé sur silicium, substrat présentant une susceptibilité électrique d'ordre trois, en présence de deux pompes. Ceci permet de générer de l'intrication entre plusieurs modes dans le cadre des applications de la lumière aux technologies quantiques.

#### PIEGEAGE COHERENT DE POPULATION SUR JET THERMIQUE DE CESIUM : COMPARAISON DE **METHODES D'EXCITATION**

## J. Cotxet<sup>1</sup>, J. Staes<sup>1</sup>, H. Travis<sup>1</sup>, P. Perez<sup>1</sup>, R. Schmeissner<sup>1</sup>, S. Guérandel<sup>2</sup>

Thales Avionics SAS. France: <sup>2</sup>Observatoire de Paris: cotxet@etud.insa-toulouse.fr

Le piégeage cohérent de césium (CPT) sur un jet thermique peut exciter une transition d'horloge. Malgré ses avantages, cette approche n'a jamais été adressé de manière industrielle. L'étude présentée ici caractérise l'efficacité du piégeage cohérent des atomes en fonction de la cohérence des sources lasers qui permettent l'interaction CPT.

#### Manipulation optique de vortex d'Abrikosov dans les supraconducteurs

## <u>A. Rochet<sup>1,2</sup></u>, W. Magrini<sup>1</sup>, A. Bouzdine<sup>2</sup>, P. Tamarat<sup>1</sup>, B. Lounis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LP2N, France; <sup>2</sup>LOMA, France; <u>antonine.rochet@institutoptique.fr</u>

Nous avons mis en place une méthode optique permettant de générer in situ une paire de vortex/anti-vortex d'Abrikosov dans un film supraconducteur. Cette technique, en champ lointain, assure la rapidité du procédé et préserve la qualité de l'échantillon. Une unique impulsion laser sépare un vortex d'un anti-vortex de quelques micron.

#### Heralding of a single collective excitation in a 1D atomic array close to an optical nanofiber

#### J. Raskop, N. Corzo, A. Chandra, A. Sheremet, J. Laurat

Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France; jeremy.raskop@lkb.upmc.fr

Our group focuses on the study of interactions between photons guided by nanoscale waveguides and arrays of trapped atoms. We report on our latest results and on the experimental realization of a heralded single collective excitation in a cold atomic ensemble of atoms trapped in the evanescent field of an optical nanofiber.

#### Ingénierie d'Etats Quantiques En Fréquence Dans Une Puce Photonique Semi-conductrice

S. Francesconi<sup>1</sup>, F. Baboux<sup>1</sup>, G. Boucher<sup>1</sup>, J. Belhassen<sup>1</sup>, A. Lemaître<sup>2</sup>, M. Amanti<sup>1</sup>, S. Ducci<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot - CNRS UMR 7162 Paris, France; <sup>2</sup>Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS/Université Paris Sud, UMR 9001, 91460 Marcoussis, France; saverio.francesconi@univ-paris-diderot.fr

Nous présentons une nouvelle technique pour contrôler les corrélations en fréquence de paires de photons générées par conversion paramétrique dans une puce en AlGaAs. La méthode proposée permet un contrôle simple et flexible des corrélations en fréquence, sans aucune manipulation externe.

#### Limites de stabilité des liens optiques fibrés

#### K. Saab<sup>1</sup>, O. Lopez<sup>1</sup>, E. Cantin<sup>2</sup>, D. Xu<sup>2</sup>, P.-E. Pottie<sup>2</sup>, A. Amy-Klein<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de physique de laser (LPL), France; <sup>2</sup>Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, Système de Référence Temps-Espace, France; <u>kassem.saab@univ-paris13.fr</u>

Les liens optiques permettent le transfert quasi idéal d'une fréquence optique ultrastable. L'instabilité d'un lien optique fibré est liée à l'erreur de mesure de phase du signal transmis, en partie due aux effets non réciproques de propagation du signal. Nous présentons une étude des limites en particulier dues aux effets de polarisation.

#### Génération et détection de lumière comprimée sur puce

<u>F. Mondain</u><sup>1</sup>, T. Lunghi<sup>1</sup>, B. Fedrici<sup>1</sup>, D. Aktas<sup>1</sup>, F. Doutre<sup>1</sup>, M. De Micheli<sup>1</sup>, A. Zavatta<sup>2,3</sup>, V. D'Auria<sup>1</sup>, S. Tanzilli<sup>1</sup> <sup>1</sup>Institut de Physique de Nice (InPhyNi), France; <sup>2</sup>Istituto Nazionale Di Ottica, INO-CNR, Iargo enrico fermi, 50125, Firenze, Italy; <sup>3</sup>Lens and Department of Physics, Universita Di Firenze, 50019 sesto fiorentino, Firenze, Italy; francois.mondain@unice.fr

Nous présentons ici une puce optique sur niobate de lithium qui combine pour la première fois la génération de lumière comprimée et la partie optique de la détection homodyne associée.

#### Manipulation multispectrale du moment orbital angulaire d'un faisceau large-bande.

## M. Ghadimi Nassiri

CNRS, Université de Bordeaux, France; mikael.ghadimi-nassiri@u-bordeaux.fr

Nous proposons un nouveau type d'outil permettant une interaction spin-orbite modulable sur une large bande spectrale. Ce système est basé sur un réseau de d´efauts de cristaux liquides localisés adressés en tension.

#### Photoémission induite par laser de nanopointes de tungstène et de diamant

#### O. Torresin

LCAR, Université de Toulouse, CNRS; torresin@irsamc.ups-tlse.fr

Nous présentons des résultats expérimentaux d'émission d'électrons à partir de nanopointes de tungstène et de diamant en régime continu et femtoseconde. La différence des régimes d'émission permet une comparaison entre ces deux matériaux.

#### Optical hybrid entanglement of light for remote state preparation and Einstein-Podolsky-Rosen steering

A. Cavaillès, H. Le Jeannic, J. Raskop, T. Darras, G. Guccione, J. Laurat

Laboratoire Kastler Brossel, France; <a href="mailto:adrien.cavailles@lkb.upmc.fr">adrien.cavailles@lkb.upmc.fr</a>

Having succeeded in generating hybrid continuous- and discrete-variable entanglement of light, we now report on the use of this resource in two hybrid protocols: the remote preparation of arbitrary CV qubits as well as the demonstration of Einstein-Podolsky-Rosen steering, using in both cases high-efficiency homodyne detection setups.

#### Programmable complex linear transformation with a multimode fiber for quantum information

<u>S. Leedumrongwatthanakun</u><sup>1</sup>, L. Innocenti<sup>2</sup>, H. Defienne<sup>1,3</sup>, T. Juffmann<sup>1,4</sup>, A. Ferraro<sup>2</sup>, M. Paternostro<sup>2</sup>, S. Gigan<sup>1</sup> <sup>1</sup>Laboratoire Kastler Brossel, ENS-Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Collège de France 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France; <sup>2</sup>Centre for Theoretical Atomic, Molecular and Optical Physics, School of Mathematics and Physics, Queens University Belfast, Belfast BT7 1NN, UK; <sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Princeton University, Princeton, NJ, 08544, USA; <sup>4</sup>Faculty of Physics, University of Vienna, Strudlhofgasse 4, 1090 Vienna, Austria; saroch.leedumrongwatthanakun@lkb.ens.fr

Combination of a spatial light modulator and a multimode fiber can be used as a platform for programmable complex linear transformations. We show that two-photon quantum interference can be controlled among different spatial-polarization modes in a deterministic way, thus demonstrating reconfigurable photonic platform for quantum information.

#### Un microscope à gaz quantique pour une nouvelle expérience d'atomes de strontium ultrafroids.

#### A. Molineri

Laboratoire Charles Fabry, France; anais.molineri@institutoptique.fr

Nous construisons actuellement une nouvelle expérience d'atome froid sur l'atome de strontium pour étudier la dynamique de systèmes hors-équilibre. Le poster que je présenterais sera axé principalement sur la construction de l'expérience, mettant en avant les avantages expérimentaux du strontium et décrivant le système d 'imagerie utilisé.

#### Bruit relatif d'intensité dans un micro-laser à modes de galerie en verre ZBLALiP dopé Erbium

## J.-B. Ceppe<sup>1,2</sup>, Y. Dumeige<sup>1</sup>, P. Féron<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Rennes 1, France; <sup>2</sup>Université de Lille, France; <u>jean-baptiste.ceppe@univ-lille1.fr</u>

Nous présentons ici un modèle théorique du bruit d'intensité d'un Laser de classe B prenant en compte un terme de couplage non-linéaire entre les fluctuations du nombre de photons et de l'inversion de population. Ce modèle est ensuite appliqué aux micro-Lasers à modes de galerie en verre ZBLALiP dopé aux ions Erbium.

#### ÉTUDE DYNAMIQUE DE CAVITE TALBOT AVEC AMPLIFICATEUR OPTIQUE A SEMI-CONDUCTEUR

## V. Billault<sup>1</sup>, V. Crozatier<sup>1</sup>, M. Schwarz<sup>1</sup>, G. Feugnet<sup>1</sup>, G. Baili<sup>1</sup>, H. Guillet de Chatellus<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Thales Research and Technology, 1 Avenue Augustin Fresnel, 91120 Palaiseau, France; <sup>2</sup>Laboratoire Interdisciplinaire de Physique, CNRS, Université Joseph Fourier, UMR 5588, BP 87, 38402 Saint Martin d'Héres, France; vincent.billault@thalesgroup.com

Nous avons développé un nouveau laser à effet Talbot basé sur un amplificateur optique à semi-conducteur (SOA). Nous avons mis en évidence la dynamique de création et d'extinction du peigne optique, et présentons les premières mesures de bruit de phase et de gigue temporelle pour différentes conditions de Talbot.

#### ARCHITECTURES DE POMPAGE POUR L'ÉMISSION BIFRÉQUENCE D'UN LASER VECSEL

P. Rigaud<sup>1</sup>, <u>S. Janicot</u><sup>1</sup>, G. Baili<sup>2</sup>, F. Gutty<sup>2</sup>, I. Sagnes<sup>3</sup>, G. Beaudoin<sup>3</sup>, P. Georges<sup>1</sup>, G. Lucas-Leclin<sup>1</sup> <sup>1</sup>Laboratoire Charles Fabry, IOGS, CNRS, Université Paris-Saclay; <sup>2</sup>Thales Research & Technology; <sup>3</sup>Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Saclay; <u>sylvie.janicot@institutoptique.fr</u>

Nous décrivons les travaux menés en vue d'améliorer les performances d'un laser VECSEL bifréquence conçu pour une horloge atomique à piégeage cohérent de population. Nous avons en particulier mis en évidence que le pompage sur deux spots distincts est bénéfique tant pour augmenter la puissance laser que pour réduire le bruit d'intensité du laser.

#### Caractérisation de l'amplificateur du système laser pré-stabilisé pour advanced Virgo

F. Cleva, J.-P. Coulon, F. Kéfélian, M. Merzougui

ARTEMIS, Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Nice, France; frederic.cleva@oca.eu

Advanced Virgo est la version de seconde génération du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo. Sa sensibilité est accrue d'un facteur 10, grâce notamment à l'augmentation de la puissance optique. Un amplificateur 95 W a été étudié et caractérisé. Ses performances mesurées son compatibles avec les exigences du nouveau système laser pré-stabilisé.

### T OMOGRAPHIE DE LA ROTATION DE POLARISATION INDUITE PAR UNE BO ÎTE QUANTIQUE UNIQUE EN CAVIT É

P. Hilaire<sup>1,2</sup>, C. Anton<sup>1</sup>, C. Millet<sup>1</sup>, A. Harouri<sup>1</sup>, A. Lemaître<sup>1</sup>, I. Sagnes<sup>1</sup>, O. Krebs<sup>1</sup>, N. D. Kimura<sup>1</sup>, N. Somaschi<sup>1</sup>, P. Senellart<sup>1</sup>, L. Lanco<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>C2N CNRS, France; <sup>2</sup>Université Paris Diderot; <u>paul.hilaire@c2n.upsaclay.fr</u>

Afin d'estimer les contributions cohérente et incohérente d'un dispositif de cavité-QED, nous avons développé une technique de tomographie de polarisation qui permet de reconstruire complètement la matrice densité de polarisation de la lumière. Cette technique nous permet de déterminer les mécanismes de bruit à l'œuvre dans notre échantillon.

#### The nonlinear chi(2) directional coupler: a versatile source for continuous variables quantum information

D. Barral Raña<sup>1</sup>, N. Belabas<sup>1</sup>, K. Bencheikh<sup>1</sup>, A. Levenson<sup>1</sup>, V. D'Auria<sup>2</sup>, S. Tanzilli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies C2N, CNRS, Université Paris-Saclay; <sup>2</sup>Université Côte d'Azur, Institut de Physique de Nice (INPHYNI), CNRS UMR 7010; <u>david.barral@c2n.upsaclay.fr</u>

We show the versatility of the nonlinear directional coupler as a source for continuous variables quantum information. We study its operation in the degenerate spontaneous down-conversion, optical parametric amplification and second harmonic generation regimes. We present examples of Gaussian steering and bipartite and quadripartite entanglement.

## Utilisation de fibres à couplage inhibé pour le controle de l'intrication spectrale de paires de photons

<u>M. Cordier</u><sup>1</sup>, A. Orieux<sup>2</sup>, B. Debord<sup>3</sup>, F. Gérome<sup>3</sup>, A. Gorse<sup>4</sup>, M. Chafer<sup>3</sup>, E. Diamanti<sup>2</sup>, P. Delaye<sup>5</sup>, F. Benabid<sup>3</sup>, I. Zaquine<sup>1</sup> <sup>1</sup>LTCI, Télécom ParisTech, France; <sup>2</sup>LIP6, Laboratoire d'Informatique de Paris 6, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Sorbonne Universit\'es, 75005 Paris, France; <sup>3</sup>GPPMM Group, XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, Univ Limoges, Limoges, France; <sup>4</sup>GLOphotonics S.A.S., 123 rue Albert Thomas, Limoges, France; <sup>5</sup>LCF, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Univ Paris-Saclay, 91127 Palaiseau cedex, France; martin.cordier@telecom-paristech.fr

Nous démontrons expérimentalement comment les propriétés de dispersion des fibres à coeur creux à couplage inhibé permettent de contrôler les corrélations spectrales des paires de photons générées par mélange à quatre ondes dans une fibre remplie de gaz non linéaire.

#### Des sources semi-conductrices de photons uniques indiscernables

<u>A. Harouri<sup>1</sup></u>, N. Somaschi<sup>1</sup>, H. Ollivier<sup>1</sup>, G. Coppola<sup>1</sup>, C. Anton<sup>1</sup>, J. Loredo<sup>1</sup>, A. Lemaitre<sup>1</sup>, I. Sagnes<sup>1</sup>, L. Lanco<sup>2</sup>, P. Senellart<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, France; <sup>2</sup>Université Paris Diderot; <u>abdelmounaim.harouri@c2n.upsaclay.fr</u>

Nous présentons la fabrication reproductible de sources semiconductrices de photons uniques montrant une indiscernabilité supérieure à 90% et une brillance fibrée supérieure à 6%. Ceci est obtenu en excitant de façon résonante un exciton neutre ou chargé piégé dans une boîte quantique placée au centre de la cavité à 50 nm près.

## COMBINAISON COHÉRENTE D'AMPLIFICATEURS SEMICONDUCTEURS & CONVERSION NON-LINÉAIRE DANS LE VISIBLE

## P. Albrodt, P. Georges, <u>G. Lucas-Leclin</u>

Laboratoire Charles Fabry, IOGS, CNRS, Université Paris-Saclay; gaelle.lucas-leclin@institutoptique.fr

Nous décrivons une source laser reposant sur la combinaison cohérente de trois amplificateurs semiconducteurs. La puissance extraite est de 12,9 W. Le faisceau infrarouge est converti dans le visible dans un cristal de PPLN, avec une efficacité nonlinéaire qui atteint 4,5 %/W, et une puissance de 2,1 W à 488 nm est ainsi obtenue.

## Etude du bruit d'un laser VECSEL bifréquence pour l'application aux horloges au césium <u>G. Gredat</u><sup>1</sup>, H. Liu<sup>1</sup>, G. Baili<sup>2</sup>, F. Gutty<sup>2</sup>, F. Goldfarb<sup>1</sup>, I. Sagnes<sup>3</sup>, F. Bretenaker<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Aimé Cotton (CNRS, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay), France; <sup>2</sup>Thales Research & Technology, Palaiseau, France; <sup>3</sup>Centre de Nanosciences et Nanotechnologie (C2N) (CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay), Marcoussis, France; <u>gregory.gredat@u-psud.fr</u>

Nous étudions le bruit d'un laser VECSEL émettant deux ondes polarisées orthogonalement à 852 nm, longueur d'onde utilisée pour sonder les résonances CPT du Césium. Nous décrivons le bruit d'intensité des deux modes, le bruit de phase de leur battement et nous établissons un modèle permettant d'isoler les facteurs cruciaux pour réduire le bruit.

#### Réduction du bruit d'un laser VECSEL bifréquence par pompage totalement corrélé

<u>G. Gredat</u><sup>1</sup>, H. Liu<sup>1</sup>, S. De<sup>1</sup>, I. Fsaifes<sup>1</sup>, A. Ly<sup>1</sup>, R. Vatré<sup>1</sup>, G. Baili<sup>2</sup>, S. Bouchoule<sup>3</sup>, F. Goldfarb<sup>1</sup>, F. Bretenaker<sup>1</sup> <sup>1</sup>Laboratoire Aimé Cotton (CNRS, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay), France; <sup>2</sup>Thales Research & Technology, Palaiseau, France; <sup>3</sup>Centre de Nanosciences et Nanotechnologie (C2N) (CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay), Marcoussis, France; <u>gregory.gredat@u-psud.fr</u>

Nous présentons un laser VECSEL bifréquence à très bas bruit à la longueur d'onde télécom et la stratégie adoptée à l'aide de bruits de pompe 100% corrélés en phase entre les deux modes. Nous montrons que le dichroïsme induit un effet thermique expliquant une partie du bruit de phase, l'autre contribution étant attribuée à l'émission spontanée.

#### Détection homodyne résolue spectralement pour l'information quantique avec peigne de fréquences

T. Michel, A. Dufour, Y.-s. Ra, C. Fabre, V. Parigi, N. Treps

Laboratoire Kastler Brossel - Sorbonne Université, France; thibault.michel@lkb.upmc.fr

Nous présentons ici une technique de mesure appelée détection homodyne multipixel. Celle-ci permet de mesurer simultan ément l'ensemble des corrélations spectrales d'un champ optique. Nous utilisons cette technique de mesure afin d'implémenter des protocoles d'information quantique à variables continues utilisant des peignes de fréquences.

#### Source laser compacte embarquable pour un senseur inertiel à ondes de matière

S. Templier<sup>1,2</sup>, B. Battelier<sup>1</sup>, B. Barrett<sup>1,2</sup>, P. Cheiney<sup>2</sup>, F. Napolitano<sup>2</sup>, H. Porte<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LP2N, France; <sup>2</sup>iXBlue, France; <u>simon.templier@institutoptique.fr</u>

Nous proposons une architecture laser incluant un modulateur I&Q qui permet d'une part la réduction du biais sur la mesure d'un interféromètre atomique, d'autre part la simplification de l'architecture en transférant la complexité du contrôle de la diode laser vers la source micro-onde du modulateur.

#### Centres NV du diamant pour l'analyse spectrale de signaux radiofréquence

#### L. Mayer, T. Debuisschert

THALES Research and Technology, France; ludovic.mayer@thalesgroup.com

Le centre coloré NV du diamant est un défaut qui possède des propriétés de spin et photophysiques remarquables. En particulier, la détection optique de ses résonances de spin électroniques dans le domaine des radiofréquences peut être exploitée pour réaliser un dispositif compact pour l'analyse spectrale instantanée dans la gamme des GHz.

#### Corrélations spectrales des bruits dans les lasers VECSELs bifréquences

#### G. Gredat<sup>1</sup>, C. H. Chow<sup>1</sup>, A. Ly<sup>1</sup>, H. Liu<sup>1</sup>, S. De<sup>2</sup>, N. Treps<sup>2</sup>, I. Sagnes<sup>3</sup>, F. Goldfarb<sup>1</sup>, F. Bretenaker<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Aimé Cotton (CNRS, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay), France; <sup>2</sup>Laboratoire Kastler Brossel (UPMC-Sorbonne Universités, CNRS, ENS-PSL Research University, Collège de France), 4 place Jussieu, 75252 Paris, France; <sup>3</sup>Centre de Nanosciences et Nanotechnologie (C2N), CNRS, Université Paris-Saclay, Marcoussis, France; <u>gregory.gredat@upsud.fr</u>

Nous présentons une analyse des composantes principales des modes de bruit d'un laser VECSEL émettant deux ondes polarisées orthogonalement à 852 nm. Après l'étude de la matrice de covariance étendue des bruits d'intensité, nous rapportons l'apparition de corrélations spectrales en exacerbant les non-linéarités par une modulation de la pompe.

## Non réciprocité de l'émission des paires de photons dans les milieux non linéaires non uniformes

## T. Harlé<sup>1</sup>, M. Cordier<sup>2</sup>, I. Zaquine<sup>2</sup>, P. Delaye<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School CNRS, Université Paris-Saclay, 91127 Palaiseau, France; <sup>2</sup>Laboratoire Traitement et Communication de l'Information, Télécom Paristech, 75013 Paris; <u>thibault.harle@institutoptique.fr</u>

Nous démontrons grace à un modèle analytique qu'une non-uniformité spatiale de l'accord de phase, dans les sources de paires de photons, s'accompagne d'une non-réciprocité du spectre d'émission, lorsque le sens de propagation est inversé. Il en résulte une dégradation de l'indiscernabilité des paires intriquées dans les montages de type Sagnac.

#### FULL POLARIZATION CONTROL OF VERTICAL ORGANIC LASERS

O. Mhibik, R. Fedrizzi-Dillenburg, T. Leang, S. Forget, <u>S. Chénais</u>

LPL, France; <a href="mailto:sebastien.chenais@univ-paris13.fr">sebastien.chenais@univ-paris13.fr</a>

Etude des propriétés de polarisation de cavité verticale des lasers biologiques dans lesquels tant le résonateur que le moyen de gain présentent la symétrie cylindrique autour de l'axe de cavité.

## O7-C: Session Orale COLOQ #3

*Heure:* Vendredi, 06.07.2018: 8:30 - 10:30 · *Salle:* Auditorium 8:30 - 9:10

Invitée

PROPAGATION NON LINEAIRE DANS LES FIBRES OPTIQUES MULTIMODES

K. Krupa<sup>1</sup>, R. Dupiol<sup>2,3</sup>, E. Deliancourt<sup>2</sup>, R. Guenard<sup>2</sup>, A. Tonello<sup>2</sup>, M. Fabert<sup>2</sup>, J.-L. Auguste<sup>2</sup>, A. Desfarges-Berthelemot<sup>2</sup>, V. Kermene<sup>2</sup>, A. Barthelemy<sup>2</sup>, U. Minoni<sup>1</sup>, D. Modotto<sup>1</sup>, G. Millot<sup>3</sup>, S. Wabnitz<sup>1,4</sup>, <u>V. Couderc<sup>2</sup></u>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Brescia, via Branze 38, 25123, Brescia, Italy; <sup>2</sup>Université de Limoges, XLIM, UMR CNRS 7252, 123 Avenue A. Thomas, 87060 Limoges, France; <sup>3</sup>Université Bourgogne Franche-Comté, ICB, UMR CNRS 6303, 9 Avenue A. Savary, 21078 Dijon, France; <sup>4</sup>Instituto Nazionale di Ottica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (INO-CNR), via Branze 38, 25123, Brescia, Italy; <u>vincent.couderc@xlim.fr</u>

Nous présentons un nouveau type de propagation non linéaire dans les fibres multimodes à gradient d'indice. Celui-ci induit une auto-organisation spatiale de la lumière et se traduit par un transfert de la puissance véhiculée par les modes d'ordre haut vers le mode fondamental. Une amélioration de la brillance du rayonnement en sortie est observée.

#### 9:10 - 9:35

Invitée

#### Dynamique de condensats de Bose-Einstein dans des réseaux optiques modulés en temps

J. Billy, E. Michon, M. Arnal, V. Brunaud, C. Cabrera-Gutiérrez, A. Fortun, D. Guéry-Odelin

Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité; IRSAMC; Université de Toulouse, UPS; CNRS; Toulouse; juliette.billy@irsamc.ups-tlse.fr

Je présenterai plusieurs expériences réalisées avec des condensats de Bose-Einstein dans des réseaux optiques modulés en phase et/ou en amplitude. Selon la fréquence de modulation choisie, la modulation permet de renormaliser la profondeur du réseau, d'induire une transition de phase dynamique ou encore des transitions interbandes.

## 9:35 - 10:00

Invitée

#### Turbulence intégrable en optique : mesure ultrarapide des fluctuations de la phase et de l'amplitude

P. Suret, A. Tikan, R. El Koussaifi, C. Szwaj, S. Bielawski, C. Evain, S. Randoux

Université de Lille - laboratoire PHLAM, France; pierre.suret@univ-lille1.fr

Nous passons en revue les différentes approches expérimentales récentes qui perettent d'étudier la "turbulence intégrable" dans des expériences d'optique fibrée. En particulier nous reportons un dispositif original de mesure ultra-rapide de la phase et de l'amplitude d'ondes lumineuses aléatoires [A. Tikan {it et. al}, Nat. Photon., 2018].

#### 10:00 - 10:25

Invitée

#### GÉNÉRATION DE LUMIÈRE SUPERTHERMIQUE HORS-ÉQUILIBRE DANS DES NANOLASERS BIMODAUX

### M. Marconi<sup>1</sup>, J. Javaloyes<sup>2</sup>, P. Hamel<sup>1</sup>, F. Raineri<sup>1,3</sup>, A. Levenson<sup>1</sup>, A. Yacomotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>C2N, France; <sup>2</sup>UIB, Spain; <sup>3</sup>Université Paris Diderot, France; mathias.marconi@c2n.upsaclay.fr

Nous étudions la statistique des photons émis par les modes propres d'un système de deux nanolasers à cristaux photoniques couplés en régime de pompage pulsé. Nous montrons que ce processus hors-équilibre est un nouveau mécanisme responsable de la génération de lumière superthermique sur le mode faible d'un laser bimodal.

## O8-C: Session Orale COLOQ #4

Heure: Vendredi, 06.07.2018: 11:00 - 12:30 · Salle: Auditorium

11:00 - 11:40

Invitée

## OPTICAL SELECTION RULES IN 2D MATERIALS BASED ON TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES X. Marie

## LPCNO, France; marie@insa-toulouse.fr

The spectacular progress in controlling the electronic properties of graphene has triggered research in alternative 2D crystals. Monolayers of transition-metal dichalcogenides have emerged as promising nanostructures for opticsl and electronics. In this talk I will give an overview of the optical properties of these 2D semiconductors.

## 11:40 - 12:05

Invitée

## PROPAGATION D'ONDES SONORES DANS UN GAZ DE BOSE SUPERFLUIDE BIDIMENSIONNEL

## J. Beugnon

LKB, France; <a href="mailto:beugnon@lkb.ens.fr">beugnon@lkb.ens.fr</a>

Les ondes sonores peuvent être utilisées pour caractériser le milieu dans lequel elles se propagent. Nous avons étudié expérimentalement la propagation d'ondes sonores dans un gaz de Bose ultrafroid bidimensionnel et mesuré des vitesses du son compatibles avec les prédictions d'hydrodynamique superfluide pour une gamme étendue de températures.

#### 12:05 - 12:30

Invitée

## MELANGE D'ONDES ET DETECTION DE PHASE AVEC LES VALVES OPTIQUES A CRISTAUX LIQUIDES

#### U. Bortolozzo<sup>1</sup>, J.-P. Huignard<sup>2</sup>, <u>S. Residori<sup>1</sup></u>

<sup>1</sup>INPHYNI, France; <sup>2</sup>Jphopto-consultant; <u>stefania.residori@inphyni.cnrs.fr</u>

Nous présentons les propriétés principales des valves optiques et leur réponse non-linéaire qui permet de réaliser le mélange d'ondes selon divers schémas d'interaction. Des exemples d'applications sont présentés, comme la lumière lente, l'interférométrie, la détection à distance et l'holographie dynamique.

## COMPORTEMENT CONTRE-INTUITIF DES ÉTATS TRIPLETS DE PHOTONS EN RÉGIME DE VARIABLES CONTINUES

E. A. Rojas Gonzales<sup>1,2</sup>, A. Borne<sup>3,4</sup>, B. Boulanger<sup>4</sup>, J. A. Levenson<sup>1</sup>, K. Bencheikh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies CNRS/Université Paris-Saclay, 91460 Marcoussis, France

<sup>2</sup> Department of Engineering Sciences, The Ångström Laboratory, Uppsala University, SE-75121

*Uppsala, Suède* <sup>3</sup> Weizmann Institutes of Science, Rehovot 7610001, Israel

<sup>4</sup> Institut Néel, CNRS/Université Grenoble Alpes, 38402 Grenoble, France

kamel.bencheikh@c2n.upsaclay.fr

## Résumé

Nous donnons dans ce papier une description des propriétés quantiques des triplets de photons générés par un processus non linéaire du troisième ordre dans le régime des variables continues. On s'intéresse particulièrement aux propriétés de corrélations et d'intrications à trois corps que peuvent présenter les triplets. Nous détaillons les résultats dans les différents cas étudiés et montrons notamment que dans le cas de la génération spontanée, les triplets ne sont pas corrélés, contrairement aux photons jumeaux.

**MOTS-CLEFS :** *Optique quantique ; Optique non linéaire ; Intrication ; Variables continues* 

Le développement de sources lumineuses cohérentes et intenses a permis l'émergence de l'optique non-linéaire et de l'optique quantique. Ceci a permis de nombreuse démonstrations inédites et des démonstrations fondamentales dans le domaine de l'optique quantique, parmi lesquelles la génération de photons jumeaux. Les états quantiques associés aux photons jumeaux sont des états non-classiques de lumière qui ont profondément influencé le domaine de l'information quantique. Nous pouvons anticiper que les états quantiques associés aux triplets de photons, appelés les états triplets, joueront un rôle similaire à celui jouait par les photons jumeaux au cours de 50 dernières années. Les états triplets sont obtenus par conversion non linéaire du troisième ordre dans un milieu ayant une susceptibilité diélectrique d'ordre trois. Au cours du processus, un photon pompe d'énergie  $\hbar \omega_p$  donne naissance un triplets de photons  $\hbar \omega_1$ ,  $\hbar \omega_2$ ,  $\hbar \omega_3$ , avec la conservation d'énergie  $\omega_p = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ . Dans le régime des variables continues, qui s'intéresse aux fluctuations quantiques des observables quadratures du champ, nous démontrons qu'il est erroné d'extrapoler les connaissances acquises sur les photons jumeaux et leurs états quantique au cas des triplets de photons.

Dans la présentation, nous décrirons la génération et l'amplification des triplets de photons dans le régime des variables continues. Le point de départ de notre étude est la résolution des équations d'évolution des modes triplets en utilisant le développement Baker-Haussdorff des équations de Heisenberg [1]. Le résultat le plus notable et contre-intuitif est obtenu dans le cas de la génération spontanée des triplets de photons. Nous démontrons l'absence totale d'intrication à trois corps des triplets. Ce résultat contredit le comportement des photons jumeaux dans les mêmes conditions. Nous discuterons également dans la présentation tous les résultats obtenus : de la génération spontanée au cas de l'amplification où les trois modes sont présents initialement avec la pompe, excités pas des états cohérents  $|\alpha_1 >$ ,  $|\alpha_2 >$  et  $|\alpha_3 >$ . Ce dernier cas montre une dépendance en phase du gain paramétrique, défini comme la rapport du nombre moyen de photons après interaction sur le nombre moyen de photons incidents pour chaque mode. Ce comportement ressemble à celui de 'amplification paramétrique du second-ordre où des régime d'amplification et de déamplification sont observés. Néanmoins dans le cas des triplets, le gain dépend non seulement de l'intensité de la pompe mais également de la semence, c'est à dire, du nombre moyen de photons injecté par mode. La figure 1(a) montre l'évolution du gain en fonction de la phase relative



FIGURE 1 : (a) : Gain de la génération de triplets de photons totalement ensemencée en fonction de la phase relative  $\phi_p - (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)$  de l'injection par rapport à la phase de la pompe. Le nombre moyen de photons de la semence est de  $5 \times 10^{10}$  par mode. (b) : Critère d'intrication Sen fonction du nombre moyen de photons de la semence. La phase relative est fixée à  $\pi/2$  pour un gain maximal. La courbe rouge est obtenue en mesurant simultanément les trois modes pour déterminer l'intrication. La courbe bleue est obtenue en ne mesurant que deux modes sur trois. la ligne discontinue à S = 2 représente la limite quantique. Lorsque S < 2, les trois modes sont dits complètement intriqués.

 $\phi_p - (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)$ , pour un nombre moyen de photons donné de la semence ou de l'injection. La figure 1(b) montre le critère d'intrication *S*[2] que nous avons déterminé dans le cas de la génération des triplets de photons complètement injectée. Lorsque le critère *S* est inférieur à 2, les trois modes sont purement intriqués. Cette intrication est dépendante à la fois du nombre moyen de photons de l'injection, de la susceptibilité diélectrique d'ordre trois et de la puissance de la pompe. Nous démontrons également que l'intrication est robuste aux pertes optiques et est préservée jusqu'à plus de 30 % de pertes [1].

## Références

- [1] E. A. Rojas Goonzalez, A Borne, B Boulanger, J. A. Levenson, and K. Bencheikh, "Continuous-variable triple-photon states quantum entanglement," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, 043601, 2018.
- [2] P. van Loock, and A. Furusawa, "Detecting genuine multipartite continuous-variable entanglement," *Phys. Rev. A*, vol. 67, 052315, 2003.

## DYNAMIQUE DE CONDENSATS DE BOSE-EINSTEIN DANS DES RÉSEAUX OPTIQUES MODULÉS EN TEMPS

## Juliette Billy, Eric Michon, Maxime Arnal, Vincent Brunaud, Citlali Cabrera-Gutiérrez, Aéla Fortun, David Guéry-Odelin

Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité; IRSAMC; Université de Toulouse, UPS; CNRS; Toulouse

juliette.billy@irsamc.ups-tlse.fr

## Résumé

Je présenterai plusieurs expériences réalisées avec des condensats de Bose-Einstein dans des réseaux optiques modulés en phase et/ou en amplitude. Selon la fréquence de modulation choisie, la modulation permet de renormaliser la profondeur du réseau, d'induire une transition de phase dynamique ou encore des transitions interbandes.

**MOTS-CLEFS :** condensats de Bose-Einstein, réseau optique

La physique de condensats de Bose-Einstein piégés dans des réseaux optiques modulés sinusoïdalement en phase et/ou en amplitude est très riche. Elle dépend de l'amplitude de modulation et de la fréquence de la modulation v. Nous nous sommes intéressés au cas de réseaux unidimensionnels de profondeur modérée et avons étudié différents régimes de fréquence.

## 1. MODULATION À HAUTE FRÉQUENCE : RENORMALISATION DE LA PROFONDEUR DU RÉSEAU OPTIQUE

L'effet d'une modulation de phase à haute fréquence est de renormaliser la profondeur du potentiel périodique. Les atomes ressentent dans ce contexte un potentiel moyenné dans le temps, dont la profondeur effective est donnée par :

$$s_{\rm eff} = s \mathcal{J}_0(2\varphi_0) \tag{1}$$

avec s la profondeur du réseau statique,  $\mathcal{J}_0$  la fonction de Bessel d'ordre 0 et  $\varphi_0$  l'amplitude de la modulation de phase.

Nous avons vérifié cette renormalisation expérimentalement, en chargeant adiabatiquement un condensat de Bose-Einstein dans un réseau optique modulé en phase à la fréquence v = 500 kHz. A partir de la figure d'interférence obtenue après temps de vol, nous déterminons la profondeur effective du potentiel moyenné, ce qui nécessite une calibration très précise de la profondeur d'un réseau [1, 2]. Les mesures expérimentales obtenues pour différentes amplitudes de modulation sont en très bon accord avec les valeurs attendues (1). Nous avons également démontré le changement de signe de la fonction de Bessel, en étudiant l'évolution temporelle du système après un changement soudain de l'amplitude de modulation. La renormalisation (1) permet ainsi d'effectuer un déphasage brutal du potentiel périodique d'une phase  $\pi$  (exactement), combiné à un changement de sa profondeur.

## 2. MODULATION À BASSE FRÉQUENCE : TRANSITION DE PHASE DYNAMIQUE

Pour une modulation de phase à basse fréquence, le taux tunnel entre sites du réseau est renormalisé par une fonction de Bessel et peut ainsi prendre des valeurs négatives. Lorsqu'on place un condensat dans un réseau modulé en phase tel que le taux tunnel effectif est négatif, il subit une transition de phase dynamique vers un état dit alterné (staggered state) correspondant à une alternance de signe de la phase d'un puits du réseau à l'autre. Cet état a déjà été observé expérimentalement. Nous nous sommes intéressés à la dynamique de formation de cet état [3] : en particulier nous avons mesuré expérimentalement le temps de nucléation de cet état une fois la modulation allumée et étudié son évolution en fonction du taux tunnel effectif, de la densité atomique ou encore de la fréquence de modulation. Nous avons comparé nos résultats expérimentaux à des simulations numériques, effectuées par P. Schlagheck de l'université de Liège et qui reposent sur un modèle prenant en compte les fluctuations quantiques. Cette comparaison nous a permis d'identifier leur rôle dans le mécanisme de nucléation des états alternés. Nous avons enfin démontré la possibilité de former des états alternés pour une modulation de phase à résonance, alors même que le taux tunnel effectif est positif.

## 3. MODULATION À RÉSONANCE : TRANSITIONS INTERBANDES

Dans le régime de fréquence intermédiaire, à résonance avec la structure de bande du réseau, nous avons vérifié que la modulation à des fréquences proches de transitions interbandes permettait de transférer efficacement de l'énergie aux atomes. Nous avons comparé les excitations induites par une modulation de phase et par une modulation d'amplitude. Les transitions autorisées diffèrement dans les deux cas, du fait des règles de sélection. Nous avons enfin pu observer et étudier l'effet des interactions interatomiques sur les transitions interbandes, en faisant varier la densité atomique.

## Références

- [1] A. Fortun, C. Cabrera-Gutiérrez, G. Condon, E. Michon, J. Billy, D. Guéry-Odelin, *Direct Tunneling Delay Time Measurement in an Optical Lattice*, Phys. Rev. Lett. **117**, 010401 (2016).
- [2] C. Cabrera-Gutiérrez, E. Michon, V. Brunaud, T. Kawalec, A. Fortun, M. Arnal, J. Billy, D. Guéry-Odelin, *Ultrarobust calibration of an optical lattice depth based on a phase shift*, arXiv :1801.08784 (2018).
- [3] E. Michon, C Cabrera-Gutiérrez, A. Fortun, M. Berger, M. Arnal, V. Brunaud, J. Billy, C. Petitjean, P. Schlagheck, D. Guéry-Odelin, *Out-of-equilibrium dynamics of a Bose Einstein condensate in a periodically driven band system*, arXiv : 1707.06092 (2017).

## GÉNÉRATION DE LUMIÈRE SUPERTHERMIQUE HORS-ÉQUILIBRE DANS DES NANOLASERS BIMODAUX

## Mathias Marconi<sup>1</sup>, Julien Javaloyes<sup>2</sup>, Philippe Hamel<sup>1</sup>, Fabrice Raineri<sup>1,3</sup>, Ariel Levenson<sup>1</sup>, Alejandro M. Yacomotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>.Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91460 Marcoussis, France.

<sup>2</sup>.Departament de Física, Universitat de les illes Balears, C/ Valdemossa km 7.5, 07122 Mallorca, Spain.

<sup>2</sup>. Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 73013 Paris, France.

mathias.marconi@u-psud.fr

#### Résumé

Nous étudions la statistique des photons émis par les modes propres d'un système de deux nanolasers à cristaux photoniques couplés en régime de pompage pulsé. Nous montrons que ce processus hors-équilibre est un nouveau mécanisme responsable de la génération de lumière superthermique sur le mode faible d'un laser bimodal.

**MOTS-CLEFS :** *statistique, cristaux photoniques, nanolasers couplés, hors-équilibre.* 

## 1. INTRODUCTION

Dans les cavités optiques à semi-conducteurs, des statistiques de photons non-triviales peuvent résulter de l'interaction lumière-matière à l'échelle nanométrique. Par exemple, les fluctuations superthermiques  $[g^{(2)}(\tau = 0) > 2]$  ont été observées dans des cavités à micro-piliers monomodes résultant de l'émission super-radiantes de boîtes quantiques [1], ou bien encore du switch de polarisation dans des dispositifs bimodaux en polarisation [2]. Dans les micro/nano lasers couplés par onde évanescentes, la capacité de contrôler la force du couplage –à la fois entre les cavités et entre les modes – rend possible l'observation de bifurcations non-linéaires telles que la brisure spontanée de symétrie entre cavités [3], on encore une diffusion d'énergie asymétrique du mode bleu (mode liant (B), en phase) au mode rouge (mode anti-liant (AB), en antiphase) [4].

Dans ce travail, nous montrons théoriquement et expérimentalement une nouvelle route pour la génération de lumière superthermique dans des nanolasers fortement couplés. Ces fluctuations sont le résultat de la variation rapide de la puissance de pompe qui induit un flux d'énergie transitoire produisant naturellement des fluctuations superthermiques à queues longues sur le mode non-lasant du système [5]. Les statistiques issues de ce processus sont d'une nature différente de celles observées dans les micro-piliers bimodaux [2].

## 2. RÉSULTATS

Nos deux nanolasers couplés sont fabriqués à partir de cristaux photoniques (PhC) gravés dans une membrane en InP contenant des puits quantiques d'InGaAsP émettant à 1.5  $\mu$ m (Fig. 1a). L'échantillon est pompé optiquement à 800 nm avec des impulsions lasers de 100 ps se répétant à 100 kHz. Le mode B ayant moins de pertes optiques lase au seuil. L'émission est collectée grâce à un objectif de microscope (N.A. = 0.95) dont le plan focal image est imagé sur une caméra afin d'obtenir le profil de champ lointain. Nous utilisons deux fibres monomodes afin de sélectionner simultanément deux régions du champ lointain : une autour de k = 0 (mode B) et une autre décalée selon l'axe x pour le mode AB (Fig. 1b). Les signaux sont envoyés vers deux photo-détecteurs à



Fig 1: a) Nanolasers à PhC couplés avec ingénierie de la barrière (trous colorés). Cercle en tirets: pompe. b) Plan de Fourier. c) Séquences d'impulsions émises sur le mode AB (rouge) et B (bleu). d) PDF du nombre de photons sur le mode B obtenue à partir de la Fig. 1c (barres) et du modèle complet (ligne). e,f) Densité de photons numériques pour x avant (e) et au maximum d'intensité f). Ligne rouge : distribution de l'équilibre de l'équation de Fokker-Planck pour x.

avalanche dont la réponse est proportionnelle à l'énergie des impulsions reçues. Nos séries temporelles contiennent  $10^4$  impulsions, dont l'énergie est quantifiée en nombre de photons *n*. Fig. 1c montre des séries simultanées sur les modes AB et B pour P = 6P<sub>s</sub>, où P<sub>s</sub> est la puissance de seuil. Nous déduisons de ces séries les distributions de probabilités (PDF) sur les deux modes. Tandis que le mode AB montre des fluctuations poissoniennes, celles développées sur le mode B sont superthermiques (g<sup>(2)</sup>(0) = 3) et s'accompagnent d'une queue longue dans les PDF (Fig. 1d). Cette valeur obtenue à partir de la variance des séries temporelles est confirmée par une mesure Hanbury Brown and Twiss (HBT) réalisée avec des détecteurs à photons uniques supra-conducteurs.

Nous reproduisons les résultats expérimentaux avec un modèle semi-classique stochastique pour les cavités couplés. Quand le couplage est très fort, ce système complexe peut-être réduit à une seule variable dynamique, la difference de population des modes  $x = (I_B-I_{AB}) / (I_B+I_{AB})$ , où  $I_{B(AB)}$  sont les intensités des modes B (AB). Ainsi x=-1 correspond au mode AB lasant, et x = 1 au mode B non-lasant. L'échange d'énergie de B à AB se produit dans un temps égal à leur difference de gain net, estimé à une centaine de ps. En appliquant des impulsions de pompe assez courtes, l'intensité intra-cavité évolue avec le temps de vie des photons (~10 ps). Ce processus devient plus rapide que l'échange d'énergie entre les modes: le système est alors mis hors-équilibre. L'énergie s'écoule d'un état initial "random" (distributions plates, Fig. 1e) vers x=-1 (AB) en laissant une distribution de *x* à queue longue (Fig. 1f).

## 3. CONCLUSION

Nous avons mis en évidence un nouveau mécanisme hors-équilibre universel pour la génération de lumière superthermique. Nous pouvons dès lors envisager de sculpter via ce processus des statistiques de photons dans des réseaux plus complexes de nanocavités couplées.

## 4. RÉFÉRENCES

[1] Janhke F. et al., "Giant photon bunching superradiant pulse emission and excitation trapping in quantum-dot nanolasers", *Nat. Comm.*, Vol. 7, 11540, 2016.

[2] Leymann H. A. M et al., "Intensity fluctuations in bimodal micropillar lasers enhanced by quantum-dot gain competition", *PRA*, Vol.**87**, 053819, 1986.

[3] Hamel P. et al., "Spontaneous mirror-symmetry breaking in coupled photonic crystal nanolasers", *Nat. Phot.*, Vol. 9, 311-315, 2015.

[4] Marconi M. et al., "Asymmetric mode scattering in strongly coupled photonic crystal nanolasers", *Opt. Lett.*, Vol. **41**, 5628-5631, 2016.

[5] Marconi M. et al., "Far-from-Equilibrium Route to Supertherml Light in Bimodal Nanolasers", *Phys. Rev. X*, **8**, 011013 (2018).

## IMPLÉMENTATION OPTIQUE RECONFIGURABLE DE RÉSEAUX QUANTIQUES COMPLEXES

J. Nokkala<sup>1</sup>, F. Arzani<sup>2</sup>, F. Galve<sup>3</sup>, R. Zambrini<sup>3</sup>, S. Maniscalco<sup>1</sup>, J. Piilo<sup>1</sup>, N. Treps<sup>2</sup>, and V. Parigi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Turku Centre for Quantum Physics, Department of Physics and Astronomy, University of Turku, FI-20014, Turun Yliopisto, Finland

<sup>2</sup> Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-PSL Research University, Collège de France; Campus P.M. Curie, F-75252 Paris, France

<sup>3</sup> IFISC (UIB-CSIC), Instituto de Fisica Interdisciplinary Sistemas Complejos, UIB Campus, 07122 Palma de Mallorca, Spain

valentina.parigi@lkb.upmc.fr

## Résumé

Nous proposons une procédure expérimentale optique pour la réalisation de réseaux complexes quantiques. L'organisation d'un certain nombre d'objets quantiques selon une topologie complexe arbitraire est difficile à mettre en œuvre expérimentalement. Nous avons établi une correspondance entre des réseaux quantiques complexes et des processus optiques non linéaires multimodes pompés par des peignes de fréquence suivis d'une détection sélective en mode. Nous décrivons dans l'exposé un protocole pour l'implémentation déterministe de réseaux reconfigurables. La plate-forme est particulièrement bien adaptée pour l'étude expérimentale de la dynamique des états quantiques dans des réseaux complexes et des effets topologiques dans des protocoles de communication ou d'information quantique qui exploitent des réseaux complexes d'intrication.

MOTS-CLEFS: topologie complexe ; réseaux quantiques ; peignes quantiques optiques

## 1. INTRODUCTION

La théorie des réseaux a joué un rôle dominant dans la compréhension de la structure des systèmes complexes et de leur dynamique. Récemment, l'étude des réseaux complexes quantiques, c'est-à-dire de collections de systèmes quantiques disposés dans une topologie non régulière, a permis de réaliser des progrès significatifs dans une multitude de contextes différents, y compris, par exemple, le transport quantique, les systèmes quantiques ouverts, la communication quantique, la violation extrême du réalisme local, et les théories de la gravité quantique [1, 2, 3]. Nous proposons ici une procédure expérimentale entièrement optique et reconfigurable de réseaux complexes quantiques, qui a le potentiel d'implémenter n'importe quelle topologie, de régulière à complexe.

## 2. IMPLÉMENTATION OPTIQUE

La plate-forme est constituée de systèmes intrinsèquement multimodes basés sur des processus paramétriques et pompés par des peignes de fréquence optique. Le spectre de ces lasers est constitué d'environ cent mille composantes de fréquence. Le processus paramétrique dans le cristal non linéaire couple toutes ces fréquences optiques, et génère des états quantiques Gaussiens multimodes. Ces états peuvent être décrits par une collection de différents modes spectraux ou temporels de la lumière qui peuvent être adressés individuellement et occupés simultanément par des états non-classiques de la lumière. Cette ressource peut être organisée, grâce à la mise en forme des impulsions et l'utilisation de mesures projectives multimodes, comme un réseau où l'on peut contrôler le nombre de noeuds (modes optiques) et la topologie des liens (interaction entre les modes) au sein du réseau. La plate-forme permet une mise en œuvre déterministe et reconfigurable du réseau, c'est-à-dire que l'on peut modifier la topologie du réseau sans modifier la configuration expérimentale. La nature quantique des réseaux est fournie par la capacité à initialiser les oscillateurs dans les états quantiques et / ou des relations d'intrication générées entre les nœuds. La mise en œuvre d'une partie de cette stratégie a déjà permis de démontrer qu'on pouvait ainsi fabriquer des états intriqués multipartites [4, 5]. Ici nous décrivons un scénario plus général, avec des outils expérimentaux supplémentaires et le développement d'une théorie qui établit les paramètres pour la simulation des réseaux quantiques [6].



FIGURE 1 : Structure graphique de 3 réseaux étudiés. A est une chaîne périodique avec 51 nœuds, l'amplitude d'interaction est réduite à la moitié tous les trois nœuds. B est une chaîne linéaire, où des raccourcis sont ajoutés. Au centre, la structure des raccourcis est affichée. C est un réseau aléatoire de 50 nœuds.

## Références

- [1] G. Bianconi, "Interdisciplinary and physics challenges of network theory", *Europhysics Letters* vol. 111, p. 56001, 2015.
- [2] J. Biamonte, M. Faccin, M. De Domenico "Complex networks : from classical to quantum", arXiv preprint arXiv :1702.08459, 2017.
- [3] H.-P. Breuer, E.-M. Laine, J. Piilo, and B. Vacchini, "Colloquium : Non-Markovian dynamics in open quantum systems", *Rev. Mod. Phys.* vol. 88, p. 021002, 2016.
- [4] J. Roslund, R. Medeiros de Araujo, S. Jiang, C. Fabre, and N. Treps., "Wavelength-multiplexed quantum networks with ultrafast frequency combs", *Nat. Photon.* vol. 8, p. 109, 2014.
- [5] Y. Cai, J. Roslund, G. Ferrini, F. Arzani, X. Xu, C. Fabre, and N. Treps, "Multimode entanglement in reconfigurable graph states using optical frequency combs", *Nat. Communications* vol. 8, p. 15645, 2017.
- [6] J. Nokkala, F. Arzani, F. Galve, R. Zambrini, S. Maniscalco, J. Piilo, N. Treps, and V. Parigi, "Reconfigurable optical implementation of quantum complex networks", arXiv preprint arXiv:1708.08726, 2017

## MANIPULATION DES INTERACTIONS ENTRE LES PHOTONS ET LES PHONONS DANS LES FIBRES OPTIQUES

## **Jean-Charles Beugnot**

<sup>1</sup> Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université Bourgogne Franche-Comté, 25030 Besançon, France ic.beugnot@femto-st.fr

#### Résumé

La diffusion Brillouin permet de générer des phonons grâce à l'interaction entre deux ondes optiques. Ce phénomène peut être contrôlé en utilisant des guides d'ondes de dimensions micrométriques comme des fibres optiques étirées et ouvre la voie de nouvelles applications dans le domaine de la métrologie et du traitement de l'information.

**MOTS-CLEFS** : fibre optique effilée, diffusion Brillouin, optique non linéaire.

## 1. INTRODUCTION

Ces dernières années, le développement des fibres optiques dont la dimension transversale du cœur correspond à la longueur d'onde optique (comme les fibres optiques microstructurées, PCF, photonic crystal fiber) ou encore les fibres optiques effilées (TOF, tapered optical fiber) ont permis de manipuler entre autres la dispersion et les non linéarité optique. Cette structuration à l'échelle du micromètre modifie également la diffusion Brillouin qui est une interaction entre deux ondes optiques et une onde acoustique (ou deux photons avec un phonon acoustique) [1]. L'onde acoustique diffuse la lumière, en y portant l'empreinte de sa vitesse sous la forme d'un décalage de fréquence Doppler de l'onde diffusée. En raison de la loi de conservation de l'énergie, le photon diffusé est décalée en fréquence par la fréquence des phonons. Lorsque l'effet Brillouin est stimulé l'amplitude du paquet d'ondes acoustiques et de l'onde optique diffusée augmente de façon exponentielle, en tirant la puissance de la pompe incidente. Cette diffusion due à l'effet Brillouin débouche sur plusieurs applications : la fabrication des lasers avec une largeur spectrale de quelques kHz (lasers ultra cohérents) ou encore la fabrication des capteurs de contraintes et température.

L'utilisation de fibres optiques effilées modifie les interactions entre les ondes optiques et acoustiques présentent dans le processus de diffusion Brillouin et offre de nouvelles perspectives de développement.

## 2. RESULTATS

La figure 1 représente des spectres expérimentaux de rétrodiffusion Brillouin spontanée obtenus dans 3 fibres optiques différentes. Les spectres sont mesurés avec une détection hétérodyne qui permet d'observer dans le domaine radiofréquence le battement entre l'onde Stokes rétrodiffusée et une partie de l'onde de pompe qui est un laser cohérent et continu émettant à la longueur d'onde de 1550nm.

Sur la figure 1.a, nous pouvons voir le spectre de rétrodiffusion Brillouin obtenu dans une fibre optique standard de télécommunications. La fréquence de résonance de 10.8 GHz est liée au décalage Doppler induit par le déplacement de l'onde élastique. Sur la figure 1.b, le spectre mesuré dans une PCF possédant un diamètre de cœur de 2.9µm fait apparaître un spectre large contenant

plusieurs résonances. Ce spectre élargi résulte du couplage complexe dû à la microstructure air/silice de la fibre.



Figure 1. Spectre de rétrodiffusion Brillouin dans (a) une fibre optique standard de télécommunications longueur 237m, (b) une fibre optique microstructurée d'une longueur de 100m (image de la microstructure dans l'encart), (c) une fibre optique effilée de longueur 8cm et de diamètre 1µm. Les spectres sont obtenus pour une longueur d'onde laser de 1550nm.

Enfin, la fibre optique effilée dont le diamètre est de  $1\mu m$ , fait apparaitre plusieurs résonances Brillouin à des fréquences bien distinctes comme on peut le voir sur la figure 1.c. Nous avons observé, en plus des ondes élastiques longitudinales classiques de la diffusion Brillouin mais à des fréquences de l'ordre de 9 GHz, des ondes élastiques de surface à des fréquences de 5.5 GHz [2]. Cette diversité de fréquences reflète la présence de plusieurs processus d'interaction entre les photons et les phonons dans ces guides de dimension micrométrique. Ce spectre multi résonant permet de déterminer le diamètre de la fibre optique effilée avec une grande précision [4].

## CONCLUSION

Ces dernières années, plusieurs travaux expérimentaux menés sur la diffusion Brillouin stimulée dans les fibres optiques microstructurées ou les fibres optiques effilées ont montré un comportement très différent en comparaison aux fibres standards. Nous avons par exemple observé la génération d'onde acoustique de surface dans les fibres optiques de silice effilées. Ces nouvelles caractéristiques sont intrinsèquement liées aux dimensions transversales submicronique des fibres optiques effilées qui modifient profondément la distribution modale des ondes acoustiques et optiques.

#### Références

[1] R. W. Boyd, Nonlinear Optics, (Academic Press, Boston, 2009).

[2] J-C. Beugnot and V. Laude "Electrostriction and guidance of acoustic phonons in optical fibers," PRB, 86, p.224304, (2012).

[3] J-C. Beugnot, S. Lebrun, G. Pauliat, H. Maillotte, V. Laude, T. Sylvestre "Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre," Nature communications, 5, (2014).

[4] A. Godet, A. Ndao, T. Sylvestre, V. Pecheur, S. Lebrun, G. Pauliat, J-C. Beugnot, and K. Phan Huy, "Brillouin spectroscopy of optical microfibers and nanofibers," Optica 4, 1232-1238 (2017).

## MELANGE D'ONDES ET DETECTION DE PHASE AVEC LES VALVES OPTIQUES A CRISTAUX LIQUIDES

## Umberto Bortolozzo<sup>1</sup>, Jean-Pierre Huignard<sup>2</sup>, et Stefania Residori<sup>1</sup>

Institut de Physique de Nice, UMR7010, CNRS, Université de Nice-Sophia Antipolis, 1361 route des Lucioles, 06560 Valbonne, France

<sup>2</sup> Jphopto-consultant, 20 rue Campo Formio, 75013 Paris, France

stefania.residori@inphyni.cnrs.fr

## RESUMÉ

Les cristaux liquides offrent une plateforme unique et versatile pour les dispositifs optiques. Les modulateurs spatiaux de lumière permettent, par exemple, de contrôler localement phase et amplitude d'un faisceau laser. Les valves optiques sont des modulateurs spatiaux qui associent les cristaux liquides à un matériau photosensible, ce qui permet d'optimiser la réponse électro-optique et de substituer l'adressage en pixels par un adressage tout-optique. Nous présentons les propriétés principales des valves optiques et leur réponse non-linéaire qui permet de réaliser le mélange d'ondes selon divers schémas d'interaction. Des exemples d'applications sont présentés, comme la lumière lente, l'interférométrie, la détection à distance et l'holographie dynamique.

**MOTS CLES :** cristaux liquides, holographie dynamique, détection de phase.

## 1. INTRODUCTION

Les dispositifs à cristaux liquides représentent l'état de l'art des technologies actuelles pour le contrôle spatio-temporel des faisceaux optiques. En particulier les modulateurs spatiaux de lumière (SLM) offrent une manière unique de façonner un front d'onde, car ils permettent de contrôler point par point l'amplitude et la phase sur toute la section transverse d'un faisceau. Les valves optiques à cristaux liquides (LCLV) sont des modulateurs spatiaux de lumière adressés optiquement, où la





matrice des pixels des SLM est remplacée par un substrat photosensible [1]. Les fonctions de contrôle sont donc directement transférées par le faisceau optique, ou par un faisceau optique auxiliaire qui sert de faisceau d'écriture. De plus la LCLV permet l'écriture et lecture simultanées de la distribution d'indice dans les cristaux liquides, ainsi que des réseaux dynamiques sont inscrits en illuminant la valve avec deux ou plusieurs faisceaux qui interférent. Dans ce cas le mélange d'ondes qui se produit dans la valve donne lieu à un échange dynamique d'amplitude et phase (Fig.1). Un cas particulier de SLM adressé optiquement est celui de l'holographie digitale, où une camera fournit le milieu d'enregistrement et est couplée à un SLM qui

produit la fonction de phase [2]. Diverses fonctions optiques des LCLV ont été démontrées dans les dernières années, comme la formation des structures spatiales [3], la conjugaison de phase [4], les cavités non-linéaires [5], l'holographie dynamique [6,7], la lumière lente [8], l'interférométrie [9,10] et la détection à distance [11].

#### 2. DESCRIPTION DES TRAVAUX

La valve optique se compose d'un film de cristaux liquides nématiques interposés entre une fenêtre en verre et un matériau photoconducteur. Une tension de biais est appliquée au dispositif. L'orientation des cristaux liquides est contrôlée optiquement grâce au photoconducteur qui change localement sa conductivité en fonction de l'intensité d'éclairage. Grâce à leur biréfringence,

l'orientation des cristaux liquides se traduit en un changement d'indice de réfraction. La LCLV se



**Figure 2. Détection de phase.** Tension de sorties de la photodiode en fonction de l'amplitude de la modulation de phase sur le signal.

comporte donc comme un milieu Kerr où l'indice varie avec l'intensité selon l'expression  $n=n_s+n_iI$ , avec  $n_s$ l'indice stationnaire et n<sub>s</sub> le coefficient non linéaire. Des réseaux dynamiques sont inscrits en éclairant la valve avec deux faisceaux, référence  $E_s$  et signal  $E_s$  (Fig. 1). Si le signal porte une modulation de phase, la partie à basse fréquence est automatiquement filtrée par l'hologramme dynamique capable de s'adapter aux changements lents, alors que la partie à haute fréquence (>100 Hz) est transmise sur les ordres diffractés et peut être détectée directement en mesurant l'intensité avec une photodiode (PD).

Un interféromètre adaptatif peut être réalisé en utilisant la valve optique pour recombiner les faisceaux [7]. L'intensité mesurée par la photodiode est directement proportionnelle à l'amplitude de la modulation de phase, qu'on doit détecter,  $I_{PD} \propto \delta\varphi \sin(\Omega t)$ . Un exemple de mesures obtenues avec cette

Un exemple de mesures obtenues avec cette méthode est montré en Fig.2. La fréquence de la modulation était 1.4 kHz et la photodiode était placée sur la direction de la référence pour laquelle les courbes théoriques prévoient le maximum de sensibilité [6]. Pour cet ensemble de mesures, et pour les conditions expérimentales de cette caractérisation, une sensibilité de l'ordre de 50  $\mu$ rad/ $\sqrt{Hz}$  peut être estimée.

#### 3. CONCLUSION

Les valves optiques à cristaux liquides sont des dispositifs versatiles qui permettent de réaliser des schémas de mélange d'ondes dans différentes conditions expérimentales. Les résultats obtenus montrent des performances très attractives en détection de phase, avec des sensibilités élevées et offrant la possibilité d'opérer en conditions réalistes dans des milieux bruités ou affectés par des perturbations à basse fréquence.

#### REFERENCES

[1] P. Aubourg, J.P. Huignard, M. Hareng, and R. A. Mullen, "Liquid crystal light valve using bulk monocrystalline  $Bi_{12}SiO_{20}$  as the photoconductive material", Appl. Opt. **20**, 3706-3712 (1982).

[2] U. Bortolozzo, D. Dolfi, J.P. Huignard, S. Molin, A. Peigné, and S. Residori, "Self-adaptive vibrometry with CMOS-LCOS digital holography", Opt. Lett. **40**, 1302–1305 (2015).

[3] U. Bortolozzo, S. Residori, A. Petrosyan, and J.P. Huignard, "Pattern formation and direct measurement of the spatial resolution in a photorefractive liquid crystal light valve", Opt. Comm. **263**, 317–321 (2006).

[4] U. Bortolozzo, S. Residori, and J.P. Huignard, "Self-pumped phase conjugation in a liquid crystal light valve with a tilted feedback mirror", Opt. Lett. **32**, 829–831 (2007).

[5] U. Bortolozzo, A. Montina, F.T Arecchi, J.P. Huignard, and S. Residori, "Spatiotemporal pulses in a liquid crystal optical oscillator", Phys. Rev. Lett. **99**, 023901, (2007).

[6] U. Bortolozzo, S. Residori, and J.P. Huignard, "Picometer Detection by Adaptive Holographic Interferometry in a Liquid Crystal Light Valve", Opt. Lett. **34**, 2006 (2009).

[7] A. Peigné, U. Bortolozzo, S. Residori, S. Molin, P. Nouchi, D. Dolfi, and J.P. Huignard, "Adaptive holographic interferometer at 1.55 μm based on optically addressed spatial light modulator", Opt. Lett. **40**, 5482–5485 (2015).

[8] S. Residori, U. Bortolozzo, and J.P. Huignard, "Slow and fast light in liquid crystal light valves", Phys. Rev. Lett. **100**, 203603 (2008).

[9] U. Bortolozzo, S. Residori, and J.P. Huignard, "Slow-light birefringence and polarization interferometry", Opt. Lett. **35**, 2076–2078 (2010).

[10] U. Bortolozzo, S. Residori, J. Rubin, and J.P. Huignard, "Sagnac interferometer with adaptive nonlinear detection", Opt. Lett. **36**, 520–522 (2011).

[11] U. Bortolozzo, S. Residori, and J. Howell, "Precision doppler measurements with steep dispersion" Opt. Lett. **38**, 3107–3110(2013).

## NANOBOB: A CUBESAT MISSION CONCEPT FOR QUANTUM COMMUNICATION EXPERIMENTS IN AN UPLINK CONFIGURATION

Erik Kerstel<sup>\*1,2</sup>, Arnaud Gardelein<sup>3</sup>, Mathieu Barthelemy<sup>1,4</sup>, The CSUG Team<sup>#,2</sup>, Sébastien Tanzilli<sup>5</sup>, Matthias Fink<sup>6</sup>, Siddarth Koduru Joshi<sup>7</sup>, Rupert Ursin<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LIPhy, 38000 Grenoble, France

<sup>2</sup> Centre Spatial Universitaire de Grenoble, 38000 Grenoble, France

<sup>3</sup> Air Liquide Advanced Technologies, Grenoble, France

<sup>4</sup> Univ. Grenoble Alpes, IPAG, 38000 Grenoble, France

<sup>5</sup> Univ. Côte d'Azur, CNRS, INPHYNI, Parc Valrose, 06108 Nice, France

<sup>6</sup> Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI), Vienna, Austria

<sup>7</sup> University of Bristol, Dept. of Electrical and Electronic Engineering, BS8 1UB United Kingdom

\* erik.kerstel@univ-grenoble-alpes.fr

## RESUME

A ground-to-space quantum key distribution (QKD) mission concept and the accompanying feasibility study for the development of the low earth orbit CubeSat payload are presented. The versatile space segment is compatible with a multiple of QKD protocols, as well as quantum physics experiments.

**KEYWORDS:** *nanosatellite*; *uplink QKD*; *entanglement*; *cryptography* 

## **1.** INTRODUCTION

Quantum Key Distribution (QKD), i.e., the quantum secure exchange of secret keys between two parties usually identified as Alice and Bob, provides a level of communication security that cannot be obtained by classical cryptographic means, including those based on numerical algorithms. Quantum information can be coded into polarization states of single photons. In a properly designed experiment, an eavesdropping attempt by a third party ("Eve"), would necessarily lead to detectable errors, since the no-cloning theorem states that an arbitrary unknown quantum state cannot be copied perfectly. Given our ever-growing reliance on secure data communication,

the intrinsic security of quantum communication largely outweighs the disadvantages of additional complexity and cost. QKD has already been demonstrated to be a practical way to distribute secret keys between two parties in a number of fiber networks. However, losses limit the maximum distance between two parties to a few hundreds of km, as the no-cloning theorem prohibits the use of standard optical amplifiers. Much progress has been made in the development



Fig. 1. Global QKD using a trusted node satellite.

of quantum repeaters, but this remains an extremely challenging solution. For the foreseeable

<sup>&</sup>lt;sup>#</sup> The CSUG NanoBob Team is composed of the following engineers, *students*, and educators who all contributed at different stages to the current study: Yves Gilot (STMicroelectronics), Etienne LeCoarer (UGA), Juana Rodrigo (Rolls Royce), Thierry Sequies (UGA), *Vincent Borne* (UGA), *Guillaume Bourdarot* (UGA), *Jean-Yves Burlet* (UGA), *Alexis Christidis* (UGA), *Jesus Segura* (UGA), Benoit Boulanger (UGA), Véronique Boutou (UGA), Mylène Bouzat (Air Liquide), Mathieu Chabanol (UGA), Laurent Fesquet (UGA), Hassen Fourati (UGA), Michel Moulin, Jean-Michel Niot (Air Liquide), Rodrigo Possamai Bastos (UGA), Bogdan Robu (UGA), Etienne Rolland (UGA), and Sylvain Toru (UGA).

future, satellites are the only option enabling to go beyond the limits posed by fiber absorption or Earth's curvature for exchanging secret keys on a global scale. In this scheme, the satellite exchanges different secure keys with different optical ground stations (OGSs). Performing bitwise XOR operations on the keys [1,2], the different OGSs can be connected securely, with the satellite acting as a trusted node.

## 2. THE NANOBOB INFRASTRUCTURE

NanoBob will demonstrate optical quantum communication in free space between an OGS and a nanosatellite in an uplink configuration. Placing the entangled photon source ("Alice") on the ground, the space segment contains Bob's detection system only: less power consuming, smaller and less complex, thus increased reliability. The space segment payload is also versatile: the receiver is compatible with multiple QKD protocols and other quantum physics experiments, such as investigating entanglement decoherence in a gravitational potential. To our knowledge, NanoBob, having completed its Mission Definition Review following CNES/ESA guidelines, is so far the most advanced European project focusing on the use of entangled photons and a CubeSat platform [3]. In order to extend the geographical reach of the OGSs at the metropolitan scale and the number of end-users that can exploit the same OGS we will design a synchronized quantum network.

#### 3. FEASIBILITY STUDY

The NanoBob CubeSat will be launched in a Sun Synchronous Orbit (SSO) at a height of 550 km and a local hour of 22h30, in order to achieve a minimum time in orbit of 3 years while enabling the satellite to have a maximum of encounters with different OGSs in a variety of locations. A Size, Mass and Power analysis has shown that the payload is compatible with the 12U CubeSat standard form factor [4].

Using conservative estimates of the relevant experimental parameters we have performed a

detailed analysis of the typical encounter between satellite and OGS and the associated atmospheric attenuation. This in turn enables the calculation of the rate at which secure keys can be constructed (Fig. 2). With expected rates well over  $10^5$  bits per encounter we can estimate that with current technology a single CubeSat can already distribute secure keys globally at a price level below  $100 \in /kbit$ .



**Fig. 2 Secure key production during one overpass.** The bell-shape curves show the secure key rate (left axis) for two scenarios: The solid curves are for a direct overpass, the dashed curves for a pass at a horizontal distance of 500 km. t=0 corresponds to the distance of closest approach. The other curves give the total key length per pass (right y-axis). The red curves correspond to a dark count rate per detector of 250 cps, the blue curves are for 1000 cps. In all cases the coincidence time window (dominated by detector jitter) equals 100 ps, except for the light-blue curve, for which the time window equals 200 ps. For the simulation we assumed that the source generates  $3 \cdot 10^8$  pairs/s, a conservative estimate of the envisioned performance. The link attenuation was calculated for atmospheric conditions characterized by a Fried parameter  $r_0 = 20$  cm. All other conditions are as in [3].

#### REFERENCES

[1] Ursin R, Jennewein T, Kofler J, Perdigues JM, Cacciapuoti L, de Matos CJ, Zeilinger A. *Space-QUEST: Experiments with quantum entanglement in space*. Europhysics News. 2009;40;3; 4.

[2] Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Handsteiner, J., Liu, B., ... Pan, J.-W. Phys. Rev. Lett, 2018; 120(3), 30501.

[3] Kerstel E. et al. Nanobob: A Cubesat Mission Concept for Quantum Communication Experiments in an

*Uplink Configuration*. <u>http://arxiv.org/abs/1711.01886</u>. Accepted for publication in Eur. Phys. J. – QT.

[4] Hevner R et al. (2011). Adv. Standard for CubeSats. SSC11-II-3 in AIAA/USU Conf. Small Satellites.

## **OPTICAL SELECTION RULES IN 2D MATERIALS BASED ON TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES**

# C. Robert<sup>1</sup>, T. Amand<sup>1</sup>, M. Glazov<sup>2</sup>, D. Lagarde<sup>1</sup>, E. Courtade<sup>1</sup>, M. Manca<sup>1</sup>, B. Han<sup>1</sup>, S. Shree<sup>1</sup>, P. Renucci<sup>1</sup>, T. Taniguchi<sup>3</sup>, K. Watanabe<sup>3</sup>, B. Urbaszek<sup>1</sup>, <u>X. Marie<sup>1</sup></u>

<sup>1</sup>Université de Toulouse, INSA-CNRS-UPS, LPCNO, 135 Av. Rangueil, 31077 Toulouse, France <sup>2</sup>Ioffe Institute, 26 Polytechnicheskaya, 194021 St.Petersburg, Russia <sup>3</sup>National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0044, Japan

## marie@insa-toulouse.fr

The spectacular progress in controlling the electronic properties of graphene has triggered research in alternative atomically thin two-dimensional crystals. Monolayers of transition-metal dichalcogenides (TMD) such as  $MoS_2$  have emerged as very promising nanostructures for optical and electronic applications. In this talk I will give an overview of the optical properties of these 2D semiconductors.

We present linear and non-linear optical spectroscopy experiments in TMD monolayers  $MoS_2$ ,  $MoSe_2$  and  $WSe_2$  which evidence the giant neutral exciton binding energy (~500 meV) and its consequences on ultra-fast intrinsic radiative lifetime at low temperature [1,2,3,4].

The optical selection rules for interband transitions in these TMD monolayers (ML) are investigated by polarization-resolved photoluminescence experiments with a signal collection from the sample edge. We observe clear signatures of the emitted light with the electric field oriented perpendicular to the ML plane, corresponding to the optical transition of "dark" neutral excitons forbidden at normal incidence used in standard optical spectroscopy. These studies, performed at zero external magnetic field, yield a direct determination of the bright-dark exciton splitting [5].

The key role played by exciton exchange interaction will also be discussed. It has a dramatic impact on both the luminescence yield through the interplay between bright and dark excitons [3] and on the spin/valley depolarization mechanism [6,7].

### REFERENCES

- [1] Wang et al, PRL **114**, 97403 (2015); Cadiz et al, PRX **7**, 021026 (2017)
- [2] Lagarde et al, PRL 112, 047401 (2014); Robert et al, PRB 93, 205423 (2016)
- [3] Wang *et al*, Nature Com. **6**, 10110 (2015)
- [4] Robert et al, PR Mat. 2, 011001(R) (2018)
- [5] Wang et al, PRL **119**, 047401 (2017); Robert et al, PRB **96**, 155423 (2017)
- [6] Glazov et al, PRB Rapid Com. 89, 201302 (2014)
- [7] Wang et al, PRL 115, 117401 (2015); Wang et al, PRL 117, 187401 (2016)

## PHOTONIQUE QUANTIQUE INTEGREE SUR SILICIUM

## Florent Mazeas<sup>1,\*</sup>, Dorian Oser<sup>2,\*</sup>, Carlos Alonso-Ramos<sup>2</sup>, Xavier Le Roux<sup>2</sup>, Diego Pérez-Galacho<sup>2</sup>, Éric Cassan<sup>2</sup>, Delphine Marris-Morini<sup>2</sup>, Olivier Alibart<sup>1</sup>, Tommaso Lunghi<sup>1</sup>, Éric Picholle<sup>1</sup>, Sébastien Tanzilli<sup>1</sup>, Laurent Vivien<sup>2</sup> et Laurent Labonté<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Côte d'Azur, Institut de Physique de Nice, CNRS, Parc Valrose, 06108 Nice, France

<sup>2</sup> Université Paris Sud, Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, 91405 Orsay, France

\*les 2 auteurs ont contribué équitablement à ce travail

laurent.labonte@inphyni.cnrs.fr

## Résumé

Nous présentons l'intégration dense de fonctions optiques linéaires et non-linéaires sur un même substrat de silicium permettant la génération, le filtrage et le routage d'états quantiques. Chacune de ces fonctions sera finement qualifiée, que ce soit de manière classique ou de manière quantique. Ce travail ouvre la voie à la manipulation d'états quantiques complexes à l'aide de circuits photoniques innovants.

**MOTS-CLEFS** : Information Quantique, Photonique sur Silicium

## 1. INTRODUCTION

L'information quantique a établi un nouveau paradigme dans le domaine des communications et du traitement de l'information, grâce à des protocoles qui permettent une sécurité accrue dans l'échange des données et un traitement massivement parallèle des informations. De manière complémentaire, l'optique intégrée bénéficie d'une maturité telle qu'il est possible de réaliser l'ensemble des briques élémentaires (routeur, filtres, interféromètres de Mach-Zehnder etc) nécessaires à la réalisation de systèmes photoniques intégrés complexes. Dans cette perspective, où fiabilité et réduction d'échelle des dispositifs priment, les circuits optiques intégrés denses, multifonctionnels et reconfigurables, sont appelés à jouer un rôle majeur. Nous visons ainsi un déploiement progressif d'une nouvelle optique intégrée basée sur le silicium, dont les propriétés permettent d'aller au-delà de l'état de l'art dans le domaine de l'information quantique. Nous présentons plus particulièrement dans ces travaux des générateurs de paires de photons intriqués agiles dont la qualité d'intrication représente l'état de l'art des sources intégrés, des filtres stop-bande entièrement ajustables basés sur l'association de coupleurs modaux et de filtres de Bragg dont l'architecture est inédite, et enfin de démultiplexeurs en longueurs d'ondes (figure 1). La perspective de ce travail sera d'associer ces briques élémentaires pour la manipulation d'états quantiques photoniques complexes dans le but de réaliser un démonstrateur d'intrication annoncée dont les applications se situent dans le domaine de la cryptographie, la métrologie et le calcul quantiques.



Figure 1 : Puce photonique sur silicium générant un état à 2 photons annoncé. Deux lasers de pompe (port T) excitent deux cavités nonlinéaire (NL) en forme de micro-anneaux, puis créent deux paires de photons intriqués. Deux filtres de Bragg (BR) rejettent les deux pompes, puis grâce à un système de démultiplexage (drop), les 2 photons de chaque paires sont séparés. Un modulateur électrooptique permet le routage de l'information. Enfin, la détection sur puce (DET) de 1 photon de chaque paire annonce la diffusion au sein du réseau de l'état quantique généré (état NOON ou 2 photons uniques)

## 2. REALISATION ET QUALIFICATION DES FONCTIONS INTEGREES SUR SILICIUM

## a. Générateurs de paires de photons intriqués

La partie NL de la figure 1 représente un micro-résonateur en forme d'anneau fabriqué sur un substrat de Si, au sein duquel des paires de photons intriqués sont générées. La réponse spectrale du système est un peigne de fréquences où l'espacement entre deux résonances successives correspond à

l'intervalle spectral libre de la cavité. Le principe de l'expérience consiste à exciter le microrésonateur sur une résonance, puis de recueillir une paire de photons intriqués naturellement en énergie-temps sur deux résonances symétriques par rapport à la longueur de pompe.

Nous avons qualifié cette intrication grâce à un dispositif interférométrique en mesurant les franges d'interférences à deux photons en fonction de la phase optique de l'interféromètre [Fra89]. Nous nous attachons à relever cette figure d'interférences pour les canaux complémentaires contigus au canal dans lequel se trouve la pompe, mais également situés dans des canaux plus éloignés afin de déterminer la dimension de notre système. Les visibilités brutes déduites de ces courbes sont en moyenne de  $(98.8 \pm 2.0)\%$  pour 4 paires de canaux.

## b. Filtres de Bragg

A cause de l'importante différence de puissance entre le faisceau de pompe et les paires de photons générées, des filtres avec de forts taux de réjection (TR) intégrés sont requis pour pouvoir utiliser ces sources de paires de photons sans bruit résiduel provenant de la pompe. De plus, les exigences sur ces filtres intégrés ne concernent pas seulement le TR, mais également une bande passante étroite (typiquement autour de 1 nm). L'implémentation de ces filtres sur puce est, de nos jours, un vrai défi à relever. Nous avons conçu et caractérisé des architectures de filtres de Bragg inédites basées sur des structures sub-longueur d'ondes associées à un coupleur modal permettant d'obtenir des TR au moins égal à 50 dB (tableau 1a)[Pér17]. Notre mesure est limitée par le niveau de bruit photonique des outils de caractérisation classique. Plusieurs architectures de filtres seront présentées montrant ainsi la richesse qu'offre le Si pour l'intégration de filtres à très fort TR.



Tableau 1 : spectres de transmission (a) d'un filtre de Bragg en série avec un micro-résonateur, (b) d'un coupleur directionnel et (c) d'un démultiplexeur

c. Manipulation de l'information : coupleur directionnel et démultiplexeur

Des dispositifs intégrés de coupleurs directionnels et de démultiplexeur de l'information (voir "EOC" et "drop" de la Fig. 1) basés respectivement sur des interféromètres de Mach-Zehnder et des microrésonateurs ont également été conçus permettant de manipuler et de diriger l'information générée au sein de la puce photonique. Leur réponse spectrale est illustrée au tableau 1b et 1c. De faibles pertes d'insertion associées à une grande dynamique et une forte sélectivité en longueur d'onde en font des composant à l'état de l'art des dispositifs intégrés.

## 3. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Nous avons montré que la plateforme technologique « photonique sur Silicium » est particulièrement adaptée à la génération et la manipulation d'états quantiques complexes au vu des performances à l'état de l'art de chacune des fonctions optiques élémentaires décrites ici. Les perspectives consistent à caractériser la puce de la figure 1 intégrant l'ensemble des fonctionnalités testées séparément. Cette puce a été fabriquée et les premières caractérisations seront montrées lors de la conférence.

## RÉFÉRENCES

Ce travail est effectué dans le cadre du projet ANR-SITQOM-15-CE24-0005. [Fra89] J.D. Franson, Phys. Rev. Lett. **62**, 2205 (1989) [Maz16] F. Mazeas *et al.*, Opt. Express **24**, 28731 (2016). [Pér17] D. Pérez-Galacho *et al.*, Optics Letters **42**, 1468 (2017)

## PROPAGATION D'ONDES SONORES DANS UN GAZ DE BOSE SUPERFLUIDE BIDIMENSIONNEL

## J.L. Ville, R. Saint-Jalm, É. Le Cerf, M. Aidelsburger, S. Nascimbene, J. Dalibard, J. Beugnon

Laboratoire Kastler Brossel, Collège de France, CNRS, ENS-PSL University, Sorbonne Université, 11 Place Marcelin Berthelot, 75005 Paris, France

beugnon@lkb.ens.fr

## Résumé

Les ondes sonores peuvent être utilisées pour caractériser le milieu dans lequel elles se propagent. Nous avons étudié expérimentalement la propagation d'ondes sonores dans un gaz de Bose ultrafroid et confiné à deux dimensions. Nous avons mesuré des vitesses du son compatibles avec les prédictions d'hydrodynamique superfluide pour une gamme étendue de températures.

MOTS-CLEFS : Superfluidité, Gaz de Bose, Second son, Onde sonore

## 1. INTRODUCTION

La mesure de la vitesse et de l'atténuation du son dans un milieu donné peut être utilisée pour caractériser ce milieu. Dans le domaine des fluides quantiques, la description de l'hélium liquide en dessous de sa température critique se fait usuellement par un modèle à deux fluides qui prédit la présence de deux modes de propagation du son usuellement nommés premier et second son et observés depuis de nombreuses années [1]. La propagation des ondes sonores dans des condensats de Bose-Einstein dilués se révèle être différente du cas de l'helium liquide à cause de la plus grande compressibilité de ces gaz [2]. L'existence de deux modes est toujours prédite, mais leur nature est différente. Dans cet article, nous étudions la propagation d'ondes sonores dans un gaz de Bose à deux dimensions. Ce régime n'est pas accessible pour l'hélium liquide car le substrat supportant le film d'hélium empêche la propagation libre de la fraction normale et rend inapplicable le modèle à deux fluides. Le cas bidimensionnel revêt un intérêt particulier puisque, pour un gaz en interaction faible, la vitesse du son est directement proportionnelle à la racine carrée de la densité superfluide [3, 4]. Cette densité superfluide est une observable difficile d'accès dans le domaine des gaz quantiques, mais elle est centrale à la description de la phase superfluide puisqu'elle diffère de la fraction condensée, contrairement au cas à trois dimensions. De plus, la densité superfluide présente une discontinuité au point critique qui est une signature forte de la transition de phase topologique de type Kosterlitz-Thouless qui décrit le passage de la phase normale à la phase superfluide lorsque l'on abaisse la température du gaz [5].

## 2. **PROPAGATION D'ONDES SONORES**

Nous avons observé la propagation d'ondes sonores dans un gaz d'atomes de rubidium uniforme refroidi à basse température. Le dispositif expérimental est décrit dans les références [6, 7]. Nous piégeons des atomes dans une combinaison de potentiels lumineux répulsifs. Les atomes sont chargés dans un nœud d'un réseau optique suivant la direction verticale et ainsi confinés à deux dimensions. Le confinement dans le plan est créé en imageant la puce d'un modulateur spatial de lumière et forme ainsi un potentiel arbitraire au niveau des atomes, comme un rectangle de dimension  $L_x \times L_y = 30(1) \times 38(1) \,\mu$ m dans le cas présent. On excite ensuite une onde sonore en modulant brutalement la densité du gaz à une extrémité de ce rectangle. Nous observons la propagation d'un trou de densité qui rebondit plusieurs fois sur les parois de la boîte rectangulaire pour un gaz dégénéré (voir Fig. 1a-b). Ce trou de densité se propage à une vitesse de quelques mm/s, de l'ordre de la vitesse Bogoliubov du gaz  $c_{\rm B}$ , qui décrit la vitesse des ondes sonores à température nulle.



FIGURE 1 : (a) Image par absorption du gaz dans l'état initial. La partie supérieure du gaz est maintenue à une densité plus faible par un potentiel additionnel dont le retrait va provoquer la propagation d'un trou de densité. (b) Images intégrées suivant x pour différent temps après l'excitation de l'onde sonore. La ligne noire est un un ajustement de la propagation du minimum de densité. (c) Évolution de la vitesse du son normalisée en fonction de la température normalisée à la température critique. La ligne continue correspond au modèle hydrodynamique [3].

La variation de la vitesse du son en fonction de la température a été prédite dans le régime hydrodynamique pour lequel les collisions dans le gaz sont suffisamment nombreuses pour assurer un équilibre local lors de la propagation de l'onde [3]. Pour des interactions faibles, cette variation reflète celle de la fraction superfluide [4]. Ici, la fraction superfluide doit varier d'environ 1 à température nulle à environ 1/2 à la température critique. La vitesse normalisée du son étant approximativement proportionnelle à la racine carré de la densité superfluide, elle doit varier d'environ 30 % sur le même intervalle, en accord qualitatif avec ce que nous observons (voir Fig. 1c).

#### CONCLUSION

Nous avons caractérisé la variation de la vitesse du son dans un gaz de Bose 2D. Un seul type d'ondes sonores est visible, et nous attribuons nos observations à un mode de second son [3]. Ce mode correspond majoritairement à une excitation de densité de la fraction superfluide. Le premier son est peu excité car il se couple mal à une excitation de densité, comme prédit par [3], et pourra faire l'objet d'une étude ultérieure. Nous avons aussi caractérisé l'amortissement des ondes sonores dans ce régime de paramètres et au-dessus de la température critique (voir la référence [8]).

## Références

- [1] R. Donnelly, "The two-fluid theory and second sound in liquid helium," *Phys. Today*, vol. 62, no. 10, pp. 34–39, 2009, Available here.
- [2] A. Griffin and E. Zaremba, "First and second sound in a uniform Bose gas," *Phys. Rev. A*, vol. 56, pp. 4839–4844, Dec 1997, Available here.
- [3] T. Ozawa and S. Stringari, "Discontinuities in the first and second sound velocities at the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, p. 025302, Jan 2014, Available here.
- [4] M. Ota and S. Stringari, "Second sound in a two-dimensional Bose gas : From the weakly to the strongly interacting regime," *Phys. Rev. A*, vol. 97, p. 033604, 2018, Available here.
- [5] Z. Hadzibabic and J. Dalibard, "Two-dimensional Bose fluids : An atomic physics perspective," *Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 34, p. 389, 2011.
- [6] J. L. Ville, T. Bienaimé, R. Saint-Jalm, L. Corman, M. Aidelsburger, L. Chomaz, K. Kleinlein, D. Perconte, S. Nascimbène, J. . Dalibard, and J. Beugnon, "Loading and compression of a single two-dimensional Bose gas in an optical accordion," *Phys. Rev. A.*, vol. 95, p. 013632, 2017, Available here.
- [7] M. Aidelsburger, J. L. Ville, R. Saint-Jalm, S. Nascimbène, J. Dalibard, and J. Beugnon, "Relaxation dynamics in the merging of N independent condensates," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, p. 190403, 2017, Available here.
- [8] J. L. Ville et al, "Sound propagation in a uniform superfluid two-dimensional Bose gas," *en préparation*, 2018.

## **PROPAGATION NON LINEAIRE DANS LES FIBRES OPTIQUES MULTIMODES**

K. Krupa<sup>1</sup>, R. Dupiol<sup>2,3</sup>, E. Deliancourt<sup>2</sup>, R. Guenard<sup>2</sup>, A. Tonello<sup>2</sup>, M. Fabert<sup>2</sup>, J. L. Auguste<sup>2</sup>, A. Desfarges-Berthelemot<sup>2</sup>, V. Kermene<sup>2</sup>, A. Barthélémy<sup>2</sup>, U. Minoni<sup>1</sup>, D. Modotto<sup>1</sup>, G. Millot<sup>3</sup>, S. Wabnitz<sup>1,4</sup>, V. Couderc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Brescia, via Branze 38, 25123, Brescia, Italy

<sup>2</sup> Université de Limoges, XLIM, UMR CNRS 7252, 123 Avenue A. Thomas, 87060 Limoges, France

<sup>3</sup> Université Bourgogne Franche-Comté, ICB, UMR CNRS 6303, 9 Avenue A. Savary, 21078 Dijon, France

<sup>4</sup> Instituto Nazionale di Ottica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (INO-CNR), via Branze 38, 25123, Brescia, Italy

### vincent.couderc@xlim.fr

## Résumé

Nous présentons un nouveau type de propagation non linéaire dans les fibres optiques multimodes à gradient d'indice. Celui-ci induit une auto-organisation spatiale de la lumière et se traduit par un transfert spontané de la puissance véhiculée par les modes d'ordre haut vers le mode fondamental. Une amélioration de la brillance du rayonnement en sortie est observée. Ce mécanisme non linéaire entraine également une évolution significative du champ global dans les domaines temporel et fréquentiel.

MOTS-CLEFS : Propagation non linéaire, effets spatio-temporels, fibres multimodales

## 1. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, on a observé un regain d'intérêt pour la recherche sur la propagation non linéaire dans les fibres multimodes à gradient d'indice (GRIN MMF) pouvant donner lieu à la démonstration expérimentale de différents effets atypiques tels que les solitons multimodaux, la génération d'ondes dispersives ainsi qu'une auto-organisation spatiale améliorant la brillance du rayonnement laser de sortie [1, 2, 3]. Les fibres optiques multimodes fournissent un environnement idéal pour l'étude de la dynamique spatio-temporelle des systèmes multimodaux non linéaires. Dans cet exposé, nous présenterons plusieurs exemples de couplages non linéaires complexes entre les dimensions temporelle et spatiale. Le phénomène le plus inattendu est un effet d'auto-nettoyage spatial du faisceau permettant de transférer l'énergie concentrée dans les modes d'ordres élevés vers celui d'ordre fondamental. Il en résulte l'émission d'un faisceau homogène entouré par un fond irrégulier à faible intensité. L'énergie est principalement confinée dans le mode fondamental de la fibre et le profile transverse du faisceau en sortie est résistant aux perturbations externes de la fibre [3].

## 2. AUTO-NETTOYAGE KERR DANS LES FIBRES MULTIMODES

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats de nos investigations concernant la propagation non linéaire d'impulsions subnanosecondes dans une fibre à profil parabolique en régime de dispersion normale et nous montrerons la dynamique spectaculaire de l'évolution du profil transverse du champ en fonction de la puissance initialement couplée dans le guide (figure 1). Les conditions initiales requises pour l'observation expérimentale de l'auto-nettoyage induit par l'effet Kerr seront discutées et nous montrerons la sensibilité du processus aux paramètres d'injection. Les caractéristiques du faisceau initial permettant d'obtenir l'effet de réorganisation spatiale seront aussi discutées. Nous terminerons cette première partie en présentant notre approche théorique permettant de comprendre la mise en place spontanée de ce processus atypique.



Fig. 1 : (a) évolution du profil transverse du faisceau de sortie en fonction de la puissance couplée dans la fibre ; (b) évolution du paramètre M<sup>2</sup> associé au faisceau de sortie en fonction de la puissance ; exemples de profils du faisceau de sortie (Fibre GRIN MMF 50/125, L<sub>fibre</sub>=3m, 1064 nm, impulsion 750 ps).

Dans un second temps nous montrerons que ce processus complexe d'auto-nettoyage a des répercussions significatives dans le domaine temporel avec le remodelage du profil de l'enveloppe de l'impulsion et qu'un raccourcissement d'un facteur quatre peut être obtenu dans une fibre de seulement 12 mètres de long avec des impulsions de plus de 750 ps de durée initiale. Le domaine spectral peut également subir une forte évolution avec la génération de nouvelles longueurs d'onde grâce à un processus d'instabilité paramétrique basé sur un effet d'imagerie périodique au sein de la fibre [4]. Dans le cas d'une augmentation de la longueur de la fibre (30 m) il est alors possible de mélanger les différents processus pour obtenir la génération d'un supercontinuum de lumière couvrant la quasi-totalité du spectre de transparence de la silice et cela avec une répartition de toutes les longueurs d'onde sur le mode fondamental. L'exploitation des caractéristiques chimiques de la fibre (dopage au germanium) a également permis d'obtenir une conversion de fréquence au second harmonique par effet de marquage (Poling) optique ainsi qu'un nettoyage spatial du rayonnement converti [5].

## **CONCLUSION**

Nous montrons qu'un nouveau processus non linéaire dans les fibres optiques multimodes à profile d'indice de cœur parabolique peut donner naissance à une auto-organisation spatial de la lumière. Une amélioration de la brillance du rayonnement peut alors être obtenue avec une modification significative du champ global dans les dimensions du temps, de l'espace et des fréquences. Des applications tournées vers l'amplification, les lasers et l'imagerie d'éléments biologiques ont été démontrées.

#### Références

[1] L. G. Wright, D. N. Christodoulides, F. W. Wise, "Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres," Nature Photonics 9, 306 (2015).

[2] L. G. Wright, S. Wabnitz, D. N. Christodoulides, and F. W. Wise, "Ultrabroadband Dispersive Radiation by Spatiotemporal Oscillation of Multimode Waves," Physical Review Letter 115, 223902 (2015).

[3] K. Krupa, A. Tonello, B. M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, and V. Couderc, "Spatial beam self-cleaning in multimode fiber.", Nature Photonics 11, 237-241 (2017).

[4] K. Krupa, A. Tonello, B. M. Shalaby, A. Barthélémy, V. Couderc, A. Bendahmane, G. Millot, S. Wabnitz, "Observation of geometric parametric instability sidebands by the periodic spatial self-imaging of multimode waves", Physical Review Letter 116, 183901 (2016).

[5] D. Ceoldo, K. Krupa, A. Tonello, V. Couderc, D. Modotto, U. Minoni, G. Millot, S. Wabnitz, "Second harmonic generation in multimode graded-index fibers: spatial beam cleaning and multiple harmonic sideband generation", Optics Letters 42, 971-974 (2017).

[6] L. G. Wright, D. N. Christodoulides, F. W. Wise, "Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers," Science 358, 94 (2017).

[7] R. Guenard, K. Krupa, R. Dupiol, M. Fabert, A. Bendahmane, V. Kermene, A. Desfarges-Barthelemot, J. L. Auguste, A. Tonello, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc, "Kerr self-cleaning of pulsed beam in ytterbium dopped multimode fiber", Optics Express 25, 4783-4792 (2017).

## SEMICONDUCTOR SECOND-ORDER NONLINEAR NANOPHOTONICS

## C. Gigli, G. Marino, V. F. Gili, I. Roland, M. Ravaro, I. Favero, and G. Leo

Laboratoire MPQ, UMR 7162, Université Paris Diderot – CNRS, Paris, France

giuseppe.leo@univ-paris-diderot.fr

## ABSTRACT

The last two years have witnessed a huge progress in all-dielectric nonlinear nanophotonics, marking the transition from the study of linear and  $\chi^{(3)}$  properties to the exploration of intrinsically stronger  $\chi^{(2)}$  effects. Here we provide an overview of our contribution to this new research domain, from the demonstration of second harmonic generation in AlGaAs nanoantennas to the most recent developments.

#### **INTRODUCTION**

Non-plasmonic nanophotonics is presently attracting a great deal of interest because the optical response of high-permittivity dielectric nanoparticles in a low-refractive-index medium exhibits negligible dissipation and strong multipolar magnetic resonances in the visible and near-infrared spectral ranges [1]. Several linear optical nanostructures have been fabricated with TiO<sub>2</sub>, [2,3] Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Si or Ge, while  $\chi^{(3)}$  nonlinear optical results have been obtained for the last three years in the silicon-on-insulator platform, mostly with third-harmonic generation (THG) [4].

## **GENERAL DESCRIPTION**

In this framework, a monolithic AlGaAs-on-insulator platform constitutes an ideal choice for nanophotonics thanks to a few key properties of AlGaAs: a huge non-resonant  $\chi^{(2)}$  nonlinearity, a large direct bandwidth that can be varied with aluminum concentration becoming two-photon-absorption free in the C-band of optical communications, and the mature technology of heterostructure laser diodes. Until recently, a full development of an AlGaAs platform was hindered by the difficulty of fabricating monolithic shallow waveguides and cavities as in the silicon-on-insulator system, and by the shortcomings of wet selective oxidation of AlGaAs epitaxial layers. The latter, discovered in 1990, results in non-stoichiometric alumina (AlOx) with optical and electrical properties similar to SiO<sub>2</sub> [5]. The use of AlOx layers thinner than 100 nm is common in VCSEL technology [6] and also resulted in the demonstration of an AlGaAs guided-wave optical parametric oscillator [7]. However, fabricating high-quality µm-thick AlOx optical substrates is critical because the selective oxidation of AlGaAs layers induces a strong contraction of the oxide. This typically results in high optical losses in integrated photonic devices, due to defects at the interface between AlOx and the adjacent crystal [8].

In 2017, we have overcome this difficulty by fabricating an AlGaAs heterostructure over an AlOx layer, the latter with a sufficient thickness to confine light in the semiconductor heterostructure by total internal reflection and thus behave as an optical substrate [9]. The first related demonstration has been the second harmonic generation (SHG) by a monolithic nanoantenna at 1.55  $\mu$ m pump wavelength, with a conversion efficiency of 10<sup>-5</sup> at 1.6 GW/cm<sup>2</sup>, pump higher than the record of plasmonic nanoantennas by four orders of magnitude (see figure 1) [10-12].

Following this breakthrough, similar results have been obtained by other groups in Australia and US still on single nanoantennas [13,14]. Then we have studied the complex polarization features of the SHG field [15] and its dependence on fabrication tolerances [16]. We have also focused our investigations on the AlGaAs nano-dimers shown in figure 2 [17], which can be seen as a first step towards the demonstration of a  $\chi^{(2)}$  metasurface. Moreover, we have contributed to the first experiment of spontaneous parametric down-conversion in a single nanoantenna, demonstrating nonlinear AlGaAs

nano-disk sources of high-rate heralded photons with non-classical correlations, establishing a quantum-classical correspondence between SPDC and SFG [18].

Finally, in the last few months we have observed an optically induced, gigantic (up to 60%) and ultra-fast (picosecond) modulation of the SHG from an AlGaAs nanoresonator. In this yet unpublished work, a weak control beam absorbed by a single nanocylinder results in a slight refractive-index change induced by the excess of photo-generated carriers. The latter suffices to cause a change of the resonant mode at the second harmonic and thus a drastic change of the conversion efficiency, insofar the latter is governed by an overlap integral between the interacting fields.



Figure 1. Emission spectrum of an AlGaAs-on-AlOx nanoantenna. [11]



Figure 2. From AlGaAs pillars to dimers: a) scheme; b) SEM picture; and c) zoom on a single dimer.

## CONCLUSION

These results have been obtained thanks to different collaborations with the groups of Costantino De Angelis at the University of Brescia, Dragomir Neshev at the Australian National University, and Michele Celebrano at the Politecnico di Milano. We acknowledge the financial support by Nanophi Erasmus-Mundus EU Program, SATT IdF-Innov, and the SEAM Labex under the PANAMA project.

## REFERENCES

- 1. A. Kuznetsov et al., Sci Rep.2, 492 (2012).
- 2. P. Lalanne et al., Opt. Lett. 23, 1081 (1998).
- 3. N. Yu, F. Capasso, Nature materials 13, 139 (2014).
- 4. M. R. Shcherbakov et al., Nano Lett. 14, 6488 (2014).
- 5. J. M. Dallesasse et al., Appl. Phys. Lett. 57, 2844 (1990).
- 6. K. D. Choquette et al., IEEE Phot. Tech. Lett. 7, 1237 (1995).
- 7. M. Savanier et al., Appl. Phys. Lett. 103, 261105 (2013).
- 8. L. Scaccabarozzi et al., Opt. Lett. 31, 3626 (2006).
- 9. G. Leo et al., patent FR3047840 (2017).
- 10. L. Carletti et al., Optics Express 23, 26544 (2015).
- 11. V. F. Gili et al., Opt. Expr. 24, 15965 (2016).
- 12. L. Carletti et al., Nanotechnology 28 114005 (2017).
- 13. S. Liu et al., Nano Lett. 16, 5426 (2016).
- 14. R. Camacho-Morales, et al., Nano Lett. 16, 7191 (2016).
- 15. L. Ghirardini et al., Opt. Lett. 42, 559 (2017).
- 16. V. F. Gili et al., Nanophotonics, DOI 10.1515/nanoph-2017-0026 (2017).
- 17. D. Rocco et al., Photonics Research (in press).
- 18. G. Marino et al., CLEO, 14-19/5 2017, San Jose, CA., OSA Technical Digest, FTu4D.2 (2017).

## **SPECTROSCOPIE PAR PEIGNES DE FRÉQUENCES À DEUX MICRONS**

## Alexandre Parriaux, Kamal Hammani, Guy Millot

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS/Université Bourgogne Franche-Comté, 21078 Dijon, France

### Guy.Millot@u-bourgogne.fr

## Résumé

Nous démontrons expérimentalement une nouvelle méthode de conversion de deux peignes de fréquence mutuellement cohérents dans une fibre optique hautement non linéaire. La méthode est basée sur l'instabilité de modulation d'ordre 4 qui permet une conversion de 1,57  $\mu$ m à 2  $\mu$ m. Les peignes à deux microns sont utilisés pour la spectroscopie d'absorption du dioxyde de carbone.

**MOTS-CLEFS :** *Peignes de fréquences ; Spectroscopie ; Instabilité de modulation ; Fibre optique* 

## **1. INTRODUCTION**

La spectroscopie à deux peignes de fréquences (SDP) est une technique avant-gardiste utilisée pour sa précision unique, sa sensibilité et sa très grande rapidité d'acquisition [1]. La SDP est basée sur l'interférence de deux peignes avec des taux de répétition légèrement différents. De mise en œuvre souvent complexe, elle peut toutefois être simple et directe lorsque les peignes sont générés à l'aide de modulateurs électro-optiques optimisés aux longueurs d'ondes des télécommunications (~1,55  $\mu$ m) [2]. L'approche électro-optique ne nécessite aucun système de stabilisation très complexe puisque les deux peignes seront générés à partir d'un laser continu *unique* modulé. Malheureusement l'absorption moléculaire est faible dans le domaine télécom. Ainsi nous démontrons une nouvelle technique pour convertir à 2  $\mu$ m un spectromètre à deux peignes initialement développé à 1,57  $\mu$ m. La conversion est basée sur un phénomène d'instabilité de modulation d'ordre 4 (IM4) dans une fibre optique hautement non-linéaire (HNLF) [3,4]. Par conversion de deux peignes avec des fréquences de répétition légèrement différentes, nous effectuons la SDP du dioxyde de carbone aux alentours de 2  $\mu$ m où l'absorption est jusqu'à 100 fois plus intense qu'à 1,57  $\mu$ m.

## 2. Méthodes

L'analyse de stabilité de l'équation de Schrödinger non-linéaire incluant les effets de dispersion jusqu'à l'ordre 4 révèle l'existence du phénomène d'IM4 dans une fibre à dispersion



Fig. 1 : Dispositif expérimental pour la SDP à 2 µm. A 1.55 µm, les paramètres de la fibre hautement non-linéaire sont  $\beta_2 = 1,92x10^{-1} \text{ ps}^2 \text{ km}^{-1}$ ,  $\beta_4 = -4x10^{-5} \text{ ps}^4 \text{ km}^{-1}$  et  $\gamma = 20 \text{ W.km}^{-1}$ .

normale [3,4]. Celui-ci montre qu'une faible perturbation d'une impulsion *pompe* est amplifiée exponentiellement durant sa propagation, générant un *signal* décalé de plusieurs dizaines de THz de la pompe lorsque les paramètres de la fibre sont judicieusement choisis. La figure 1 montre le dispositif expérimental. Deux peignes de fréquences sont générés par modulation électro-optique à 1,57  $\mu$ m avec des fréquences de répétition légèrement différentes [2]. Les deux peignes sont ensuite couplés avec un laser continu de quelques dizaines de mW à 1,31  $\mu$ m pour stimuler la conversion dans la HNLF. Les deux peignes convertis à 2  $\mu$ m sont alors amplifiés dans un amplificateur dopée thulium. Leur interférence est mesurée par un photo-détecteur et un spectre RF est révélé par transformée de Fourier du signal électrique.

#### 3. APPLICATIONS

Le spectromètre est testé pour caractériser l'absorption de  $CO_2$ . La figure 2 montre un exemple de spectre optique obtenu à partir du spectre RF associé. Ce spectre de largeur 3 THz est en excellent accord avec le spectre calculé à partir de la base HITRAN. Les mesures de coefficients d'élargissement collisionnel sont également en très bon accord avec les données HITRAN.



Fig. 2 : Spectre d'absorption du  $CO_2$  à 0,582 atmosphère et comparaison avec la base de données HITRAN.

## CONCLUSION

Nous avons démontré expérimentalement une nouvelle technique de conversion de peignes de fréquence par IM4 dans une HNLF normalement dispersive. La cohérence mutuelle des peignes est préservée durant la conversion ce qui a permis de mesurer l'absorption de  $CO_2$  à 2 µm avec une très grande précision. Le spectromètre tout fibré montre une très grande stabilité et une facilité de mise en œuvre. La conversion de peignes de fréquence par IM4 ouvre de nouvelles opportunités dans le moyen infrarouge, en particulier pour la spectroscopie en temps réel ou encore la détection de traces de gaz pour des applications environnementales ou médicales.

## Références

[2] G. Millot, S. Pitois, M. Yan, T. Hovhannisyan, A. Bendahmane, T. Hänsch, and N. Picqué, "Frequency-agile dual-comb spectroscopy," Nature Photonics 10, 27–30 (2016).

[3] S. Pitois and G. Millot, "Experimental observation of a new modulational instability spectral window induced by fourth-order dispersion in a normally dispersive single-mode optical fiber," Optics Communications 226, 415–422 (2003).

[4] A. Billat, S. Cordette, Y. Tseng, S. Kharitonov, and C. Brès, "High-power parametric conversion from near-infrared to short-wave infrared," Optics Express 22, 14341–14347 (2014).

<sup>[1]</sup> I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," Optica 3, 414–426 (2016).

## **TURBULENCE INTÉGRABLE EN OPTIQUE : MESURE ULTRARAPIDE DES FLUCTUATIONS DE LA PHASE ET DE L'AMPLITUDE**

## <u>Pierre Suret</u><sup>1</sup>, Alexey Tikan<sup>1</sup>, Rebecca El Koussaifi<sup>1</sup>, Christophe Szwaj<sup>1</sup>, Serge Bielawski<sup>1</sup>, Clément Evain<sup>1</sup> et Stéphane Randoux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Phlam, University of Lille, Villeneuve d'Ascq, France

Pierre.Suret@univ-lille.fr

## Résumé

Nous présentons des expériences et des simulations numériques de phénomènes complexes désignés sous le terme "turbulence intégrable". L'observation de ces phénomènes dans des fibres optiques est difficile car les échelles de temps typiques sont la picoseconde ou la fraction de picoseconde. Nous passons en revue les différentes approches expérimentales récentes qui ont permis de mesurer la statistique et la dynamique de "turbulence optique" dans des expériences fibrées. En particulier nous reportons un dispositif original de mesure ultra-rapide de la phase et de l'amplitude d'ondes lumineuses aléatoires [A. Tikan *et. al*, Nat. Photon., 2018]. En utilisant à la fois la signature en phase et en amplitude, nous montrons que le soliton de Peregrine est une structure fondamentale qui apparait spontanément au cours de la propagation d'ondes aléatoires (émission spontanée) dans une fibre optique en régime de dispersion anormale.

**MOTS-CLEFS :** Ultrafast measurement, Optical turbulence, Peregrine soliton, optical fibers

## INTRODUCTION

Les phénomènes complexes qui surgissent au cours de la propagation d'ondes partiellement cohérentes dans un système décrit par l'équation de Schrödinger non linéaire rentrent dans le champ de la *turbulence integrable*. Cette thématique fondamentale introduite par Zakharov correspond à l'étude des phénomènes complexes émergents au cours de la propagation d'ondes aléatoires dans un système décrit par une équation intégrable [1, 2, 3].

## Mesure ultra-rapide de la phase et de l'amplitude d'ondes partiellement cohérentes

Nous reportons des expériences réalisées dans des fibres optique en régime de dispersion anormale (régime focalisant de l'équation de Schrödinger non linéaire). [2, 4, 5]. En particulier, nous présentons des enregistrements "mono-coups" de l'amplitude et de la phase d'ondes scélérates optiques. Ces enregistrements ont été réalisés à l'aide d'un dispositif original appelé microscope temporel hétérodyne [5]. Le point clef du dispositif est une combinaison complètement nouvelle de la mesure hétérodyne et de la stratégie d'imagerie temporelle (lentille temporelle) qui permet l'enregistrement sur des fenêtres temporelles de plusieurs dizaines de picosecondes [6, 4]. Nous présentons également une version simplifiée de notre dispositif (SEAHORSE) qui permet de faire de l'holographie numérique temporelle [5].

Le microscope temporel hétérodyne permet d'observer l'émergence de structures intenses (ondes scélérates) rapides (500 fs) au cours de la propagation d'ondes partiellement cohérentes ayant des échelles de temps initiales de l'ordre de 5 ps (voir la Fig. 1). A l'aide d'un dispositif d'échantillonnage optique asynchrone [2], nous mesurons également avec précision la densité de probabilié de la puissance optique des ondes aléatoires non linéaires fluctuant rapidement au cours du temps. La statistique du champ évolue de la distribution normale vers des distributions fortement non gaussienne. Nos expériences confirment l'apparition d'événements extrêmes dans la turbulence intégrable.



FIGURE 1 : Reproduit de [5]. Amplitude et Phase d'ondes non linéaires aléatoires : expériences et simulations numériques (a) Dispositif expérimental. La lumière émise par une source à émission spontanée amplifiée se propage dans une fibre à maintien de polarisation (PMF) (b-e) : Expériences Phase et puissance optique. (b) Condition initiale typique injectée dans la fibre optique. (c-e) Dynamique typique observée à la sortie de la fibre. (f-i) Simulations numériques. Condition initiale typique (f) et dynamique typique après propagation (g-i)

La connaissance de la phase et de l'amplitude permet maintenant une comparaison précise entre expériences et théorie. La signature des structures en phase et en amplitude permet par exemple de confirmer le role fondamental joué par le soliton de Peregrine en turbulence intégrable [7, 5] (voir en particulier le saut de  $\pi$  de la phase sur les Figs. 1.(e,i)). Nous montrons que nos résultats peuvent être interprétés dans le cadre de l'approche semi-classique de l'équation de Schrödinger non linéaire [7].

## Références

- [1] D. Agafontsev and V. E. Zakharov, "Integrable turbulence and formation of rogue waves," *Nonlinearity*, vol. 28, no. 8, p. 2791, 2015.
- [2] P. Walczak, S. Randoux, and P. Suret, "Optical rogue waves in integrable turbulence," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, p. 143903, Apr 2015.
- [3] S. Randoux, P. Walczak, M. Onorato, and P. Suret, "Nonlinear random optical waves : Integrable turbulence, rogue waves and intermittency," *Physica D : Nonlinear Phenomena*, pp. –, 2016.
- [4] P. Suret, R. El Koussaifi, A. Tikan, C. Evain, S. Randoux, C. Szwaj, and S. Bielawski, "Single-shot observation of optical rogue waves in integrable turbulence using time microscopy," *Nat. Commun.*, vol. 7, 2016.
- [5] A. Tikan, S. Bielawski, C. Szwaj, S. Randoux, and P. Suret, "Single-shot measurement of phase and amplitude by using a heterodyne time-lens system and ultrafast digital time-holography," *Nat. Photon.*, vol. 12, 2018.
- [6] B. H. Kolner and M. Nazarathy, "Temporal imaging with a time lens," *Optics letters*, vol. 14, no. 12, pp. 630–632, 1989.
- [7] A. Tikan, C. Billet, G. El, A. Tovbis, M. Bertola, T. Sylvestre, F. Gustave, S. Randoux, G. Genty, P. Suret, and J. M. Dudley, "Universality of the peregrine soliton in the focusing dynamics of the cubic nonlinear schrödinger equation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, p. 033901, Jul 2017.