

COMMENT L'UTILISATION DE PPLN GUIDÉS PEUT RÉVOLUTIONNER L'ASTRONOMIE MOYEN INFRAROUGE

Lucien Lehmann¹, Ludovic Szemendera¹, Ludovic Grossard¹, Laurent Delage¹, Mathieu Chauvet², Florent Bassignot³ et François Reynaud¹

¹ Institut Xlim, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 87 060 Limoges, France

² FEMTO-ST Institute, UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté, 25 000 Besançon, France

³ Femto-Engineering, 15B avenue des Montboucons, 25 000 Besançon, France

lucien.lehmann@xlim.fr

RÉSUMÉ

ALOHA est un projet visant à utiliser les technologies de l'optique non linéaire et guidée dans le domaine de l'imagerie haute résolution en astronomie infrarouge. Notre démarche consiste à inclure un processus de conversion de fréquence sur chaque bras de l'interféromètre pour transposer le signal infrarouge moyen vers le proche infrarouge. Cette méthode permet de relâcher les contraintes sur le bruit thermique de l'instrument et de disposer des composants matures de l'optique guidée. Les premiers tests en laboratoire ont permis de réaliser des franges d'interférence avec un contraste supérieur à 95 % avec 100 fW à l'entrée de chaque bras. L'utilisation de PPLN ridge pourrait significativement améliorer ces résultats.

MOTS-CLEFS : *optique non linéaire ; imagerie haute résolution ; interférométrie*

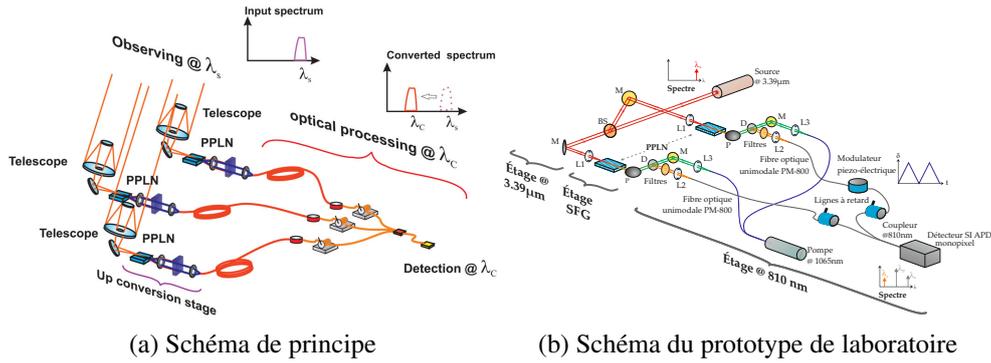
1. INTRODUCTION

En astronomie, le moyen infrarouge (entre 3 et 12 μm) est une bande spectrale riche en information notamment pour l'étude de la formation des systèmes planétaires ou celui des noyaux actifs de galaxies [1]. L'étude détaillée de ces objets nécessite de hautes résolutions angulaires qui ne sont accessibles qu'à l'aide de réseaux de télescopes espacés de plusieurs centaines de mètres, tels que ceux de CHARA ou du VLTI, voire de bases kilométriques. Cependant, ces grands interféromètres soulèvent d'importants problèmes techniques. D'une part, le signal utile, de très faible niveau, est pollué par le rayonnement thermique provenant de toute la chaîne instrumentale. Pour limiter ce phénomène, la solution classique consiste à cryogéniser les instruments travaillant à ces longueurs d'ondes, ce qui est à la fois complexe et coûteux. D'autre part, pour obtenir des contrastes calibrés, un filtrage spatial drastique des faisceaux issus de chaque télescope est nécessaire. Notre proposition pour résoudre ces problèmes consiste à transposer le signal moyen infrarouge vers le proche infrarouge, où il n'est plus noyé dans le bruit thermique et où l'on dispose de composants optiques de grande maturité technologique. Cette transposition est réalisée par le processus non linéaire de somme de fréquences (SFG).

2. PRINCIPE DE ALOHA

Le principe général du projet ALOHA (Astronomical Light Optical Hybrid Analysis) est présenté Figure 1a. Celui-ci se décompose en trois grandes parties : un étage moyen infrarouge, un étage de conversion et un étage proche infrarouge. L'étage moyen infrarouge est constitué du télescope en lui-même ainsi que de quelques miroirs de renvoi. Cette partie a pour rôle de capter la lumière en provenance de l'étoile et de l'amener à l'étage de conversion.

La conversion est l'étape la plus critique du processus. Il s'agit de superposer au sein d'un cristal non linéaire le signal moyen infrarouge très faible flux avec un signal dit « de pompe » d'une douzaine d'ordres de grandeur plus intense. L'utilisation de guides d'onde en tant que milieux non linéaires permet d'allonger la zone d'interaction entre le signal MIR et le signal pompe et ainsi obtenir, en théorie, de bons rendements de conversion avec une puissance de pompe limitée. Maîtriser la puissance de pompe



(a) Schéma de principe (b) Schéma du prototype de laboratoire

M : miroirs de renvoi (or); **BS** : séparatrice de coefficient de partage de 50/50 à 3,39 μm ; **L1** : objectif de focalisation adapté à la longueur d'onde 3,39 μm ; **P** : parabole pour collimater le signal converti à la sortie du cristal et focaliser l'onde de pompe (pour l'injection); **D** : miroir dichroïque pour séparer pompe et signal converti; **L2** : objectif de focalisation pour l'injection du signal converti dans la fibre PM-800; **L3** : objectif de focalisation pour collimater l'onde de pompe.

FIGURE 1: Le projet ALOHA

est indispensable, car si la somme de fréquences est un processus intrinsèquement sans bruit, d'autres effets non linéaires peuvent induire des signaux parasites additionnels.

Les signaux « convertis » issus de chaque télescope sont filtrés spectralement pour éliminer l'onde de pompe résiduelle, puis recombinaison à l'aide d'un coupleur fibré. Pour obtenir des franges d'interférence de haut contraste, il est nécessaire que les bras de l'interféromètre soient quasi identiques. Cela implique la maîtrise de la réponse spectrale de chaque composant non linéaire. Enfin, l'utilisation d'optique fibrée unimodale à maintien de polarisation pour le transport cohérent permet de maîtriser la structure modale, l'état de polarisation et le chemin optique de chaque bras de l'interféromètre.

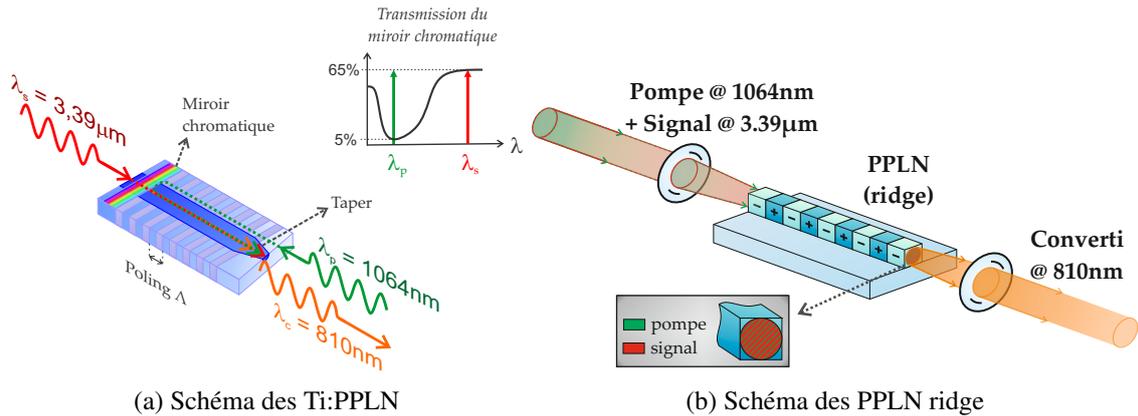
3. PREMIER RÉSULTAT EN LABORATOIRE À 3,39 μm

Pour mettre en évidence le potentiel d'ALOHA à 3,39 μm , un premier prototype a été réalisé en laboratoire. Le schéma expérimental de ce banc est présenté figure 1b. La source astronomique est ici simulée par un laser HeNe continu émettant à 3,39 μm . Une lame séparatrice partage le flux entre les deux bras de l'interféromètre. Un ensemble de miroirs et d'objectifs permet d'injecter le signal MIR dans les composants non linéaires. Il s'agit de guides d'onde de niobate de lithium périodiquement polarisés réalisés par diffusion titane (Ti:PPLN) de 92 mm de long. Ces composants permettent de convertir une bande spectrale d'environ 3 nm autour de 3,39 μm .

Dans chaque bras de l'interféromètre, la conversion de fréquence est réalisée en superposant au signal MIR, un champ provenant d'une même source laser, dite de pompe à 1064 nm. Celui-ci est injecté en sens inverse dans le PPLN avant d'être réfléchi par un miroir dichroïque déposé sur la surface d'entrée du PPLN (figure 2a). Les faisceaux pompe et signal alors copropagatifs génèrent un signal converti à 810 nm. Ce banc a permis de réaliser des franges d'interférence de haut contraste (supérieur à 95 % [2]) avec seulement 100 fW de signal à 3,39 μm à l'entrée de chaque bras de l'interféromètre et une puissance de pompe de 100 mW injectée dans chaque PPLN. La principale limitation de ce prototype provient du faible rendement de conversion (10^{-5}). Ce rendement est directement lié au recouvrement des modes à 810 nm, 1064 nm et 3,39 μm qui sont très différents pour les composants non linéaires Ti:PPLN utilisés[3]. De plus, cette technologie est très sujette aux effets photoréfractifs, ce qui oblige à travailler à des températures de plus de 100 °C.

4. ÉVOLUTIONS ET PERSPECTIVES

Pour pallier ces problèmes, notre choix de composants PPLN s'est porté sur la technologie ridge proposée par FEMTO-ST et son centre de développement technologique FEMTO-Engineering [4] (figure 2b). Au lieu de doper localement le PPLN pour en changer l'indice, le guide est taillé mécaniquement.



(a) Schéma des Ti:PPLN

(b) Schéma des PPLN ridge

FIGURE 2: Comparatif des deux technologies de guidage utilisées

Le saut d'indice entre le ridge ($n_{LN} \approx 2.2$) et l'air ($n_{air} = 1$) ainsi généré permet un guidage fort des trois longueurs d'onde impliquées. Les signaux MIR et pompe possèdent alors des diamètres de mode de propagation très proches (environ $6,2 \mu\text{m}$) pour un guide carré de $8 \mu\text{m}$ de coté, ce qui permet d'envisager un meilleur recouvrement des champs. Les premiers essais avec un composant de 20 mm de long montrent une amélioration d'environ deux ordres de grandeur du rendement de conversion sur une bande d'environ 12 nm autour de $3,39 \mu\text{m}$.

L'élaboration d'un nouvel interféromètre nous permettra d'étudier le degré de ressemblance des nouveaux cristaux en utilisant une source thermique large bande. Enfin, en parallèle des essais en laboratoire, une campagne de tests sur l'un des télescopes de C2PU (Observatoire de la Côte d'Azur) est prévue. Ces mesures nous permettront de déterminer la sensibilité limite de notre instrument sur des cibles astronomiques et de la comparer à celle obtenue avec les méthodes de détection classique.

REMERCIEMENTS

Ce travail est supporté par le Centre National d'Études Spatiales, Thales Alenia Space et l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Lopez, S. Lagarde, W. Jaffe, R. Petrov, M. Schöller, P. Antonelli, U. Beckmann, P. Berio, F. Bettonvil, A. Glindemann, and others, "An Overview of the MATISSE Instrument—Science, Concept and Current Status," *The Messenger*, vol. 157, pp. 5–12, 2014. [Online]. Available : <https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.157-sep14/messenger-no157-5-12.pdf>
- [2] L. Szemendera, P. Darré, R. Baudoin, L. Grossard, L. Delage, H. Herrmann, C. Silberhorn, and F. Reynaud, "In-lab ALOHA mid-infrared up-conversion interferometer with high fringe contrast @ $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 457, no. 3, pp. 3115–3118, Apr. 2016. [Online]. Available : <http://mnras.oxfordjournals.org/lookup/doi/10.1093/mnras/stw196>
- [3] S. Kurimura, Y. Kato, M. Maruyama, Y. Usui, and H. Nakajima, "Quasi-phase-matched adhered ridge waveguide in LiNbO₃," *Applied Physics Letters*, vol. 89, no. 19, p. 191123, Nov. 2006. [Online]. Available : <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2387940>
- [4] M. Chauvet, F. Henrot, F. Bassignot, F. Devaux, L. Gauthier-Manuel, Vincent Pêcheur, H. Maillotte, and B. Dahmani, "High efficiency frequency doubling in fully diced LiNbO₃ ridge waveguides on silicon," *Journal of Optics*, vol. 18, no. 8, p. 085503, 2016. [Online]. Available : <http://stacks.iop.org/2040-8986/18/i=8/a=085503>